

Titolo: Dalle stelle alla misura del tempo.

Destinatari: Alunni di quinta liceo scientifico.

Obiettivi: Presentare in modo semplice, ma allo stesso tempo approfondito, parti del programma di Geografia Astronomica che spesso sono trattate in modo superficiale (o addirittura omesse), come ad esempio i diversi sistemi di coordinate celesti o i principi sui quali venivano costruiti i vari calendari e le cause delle loro imprecisioni.

Materie coinvolte: Geografia Astronomica, Matematica, Fisica.

Scansione temporale:

Modulo	Contenuti	Ore
Il cielo e la posizione delle stelle	La luce e le tenebre	5
	Costellazioni, pianeti, comete	
	Lo Zodiaco	
	Il cammino dei corpi celesti	
	Tolomeo e Copernico: la nascita della meccanica celeste	
	Volta celeste e posizione delle stelle	
I calendari e la misura del tempo	Coordinate astronomiche	5
	Le ore, il giorno, le settimane	
	Il mese e l'anno	
	Varie specie di anno e la riforma gregoriana	
	Altri calendari	
	L'orologio solare	
Le stagioni e l'obliquità dell'eclittica		

Si tratta di un progetto di approfondimento da svolgere in orario curricolare. Esso ha il fine di presentare i legami e l'armonia esistente tra materie che spesso sono considerate diverse e poco compatibili.

Esso volge anche a presentare una sorta di percorso storico, in cui sono presenti le evoluzioni delle maggiori teorie astronomiche che riguardano il nostro Sistema Solare, ma anche l'evoluzione dei calendari, con tutte le complicazioni che ne conseguono.

Sarebbe stato bello ed interessante operare dei collegamenti con la filosofia, ma in questo caso il lavoro si sarebbe protratto per troppo tempo; infatti, non dobbiamo dimenticare che questo è un progetto da svolgere in orario curricolare e che per ovvi motivi non può occupare troppo tempo.

È utile, a mio avviso, presentare personaggi che spesso vengono omessi nelle trattazioni classiche, come la figura di Tycho Brahe le cui osservazioni sono risultate essere di fondamentale importanza per lo sviluppo degli studi di Keplero. Spesso le leggi di Keplero, a livello scolastico, vengono presentate come un qualcosa a sé stante, senza alcuna giustificazione e, soprattutto, senza una trattazione che tenga conto degli sviluppi precedenti e dei legami con le conoscenze geometriche del tempo, soprattutto le sezioni coniche.

Spesso si perde anche il legame tra la meccanica newtoniana e la meccanica celeste, e la legge di gravitazione non viene presentata come effettiva causa del particolare moto degli astri.

Con questo lavoro si spera di rendere meno misterioso il cammino che ci ha portati, attraverso la storia, all'attuale modello del nostro Sistema Solare e all'adozione del calendario di cui oggi disponiamo.

La luce e le tenebre

Incominciando a domandarsi il come e il perché dei fenomeni, è probabile che gli uomini si saranno meravigliati della luce e delle tenebre ancora prima che dei corpi celesti. Che cosa sono la luce e le tenebre, il giorno e la notte? Che il Sole sia sorgente di luce e di calore a noi sembra una cosa ovvia, ma una volta non era così. Si credeva che la luce fosse stata creata prima, anzi all'origine di tutte le cose, mentre il Sole non era considerato la causa del crepuscolo e neppure della luminosità del cielo in regioni lontane dalla posizione di tale astro. Si pensava che esso fosse come incastonato nello sfondo luminoso del giorno, così da aggiungere semplicemente il suo splendore a quello del cielo. Infatti, continuava ad essere giorno anche quando il Sole era coperto dalle nubi. E cos'è la luce zodiacale? Ancora nel IV secolo S. Ambrogio scriveva: *“dobbiamo rammentarci che la luce del giorno è una cosa e un'altra la luce del sole, della luna e delle stelle, il sole coi suoi raggi dando semplicemente lustro alla luce diurna. Infatti, prima del sorgere del sole, il giorno rischiarava, ma non nel suo pieno fulgore, perché il sole deve ancora contribuire col suo splendore”*.

Analogamente, le tenebre non erano considerate una semplice assenza di luce, ma una sostanza reale e attiva, generatrice di spiriti e di demoni. E come la luce era una specie di vapore chiaro, le tenebre erano un vapore nero che a sera montava dalle profondità della Terra. La sopravvivenza di queste credenze circa la realtà oggettiva della luce e delle tenebre e della loro indipendenza dal Sole, dalla Luna e dalle Stelle, ha permeato il pensiero umano quasi fino ad oggi. Si comprende l'antico terrore delle eclissi, di cui era ritenuta responsabile non la Luna, ma il dragone delle tenebre e del male; era una tragedia cosmica e morale. Ma se in queste concezioni prevalevano la mitologia e un sentimento animistico della natura, tuttavia si era già aperto il lungo e tortuoso cammino della scienza.

Costellazioni, pianeti, comete

Il sorgere ed il tramontare regolare del Sole, la Luna con le sue fasi e la luce zodiacale dovettero essere i fenomeni più impressionanti per i primi osservatori del cielo, insieme naturalmente con le stelle, le quali, pur muovendosi da oriente ad occidente come il Sole e la Luna, non cambiavano la loro posizione relativa e apparivano riunite in gruppi, la cui disposizione finì con il formare nell'immaginazione di chi le guardava particolari configurazioni, fisse come emblemi: le *costellazioni*.

È strano che quasi tutti i popoli abbiano raggruppato le stelle pressappoco allo stesso modo, raffigurandovi i propri miti e i fenomeni stagionali e mensili. I babilonesi furono i primi a dividere la volta celeste in costellazioni secondo schemi che vennero ereditati dagli egiziani, dai greci e quindi da noi, con pochi cambiamenti in cinquemila anni, ma ormai svuotati di qualunque significato culturale.

Fra le stelle, però, ce n'erano cinque che non si potevano inquadrare nelle costellazioni, perché si spostavano rispetto ad esse. I greci li chiamarono *astéres planétai*, cioè stelle erranti o *pianeti*. La storia non ci ha tramandato i nomi dei loro scopritori e in che ordine vennero individuati. Può darsi che Mercurio sia stato scoperto dopo Venere e Giove, tanto più brillanti; e chissà quanti secoli ci vollero per riconoscere che Venere serotina (o Vespero) e Venere mattutina (o Espero) erano il medesimo astro. Oltre a Mercurio, Venere, Marte, Giove e Saturno, che apparivano agli antichi stelle diverse dalle altre perché non erano fisse, c'erano anche le stelle cadenti; e, seppur di rado, provenienti da ogni parte del cielo, si vedevano anche più strane apparizioni che potevano muoversi per mesi tra le stelle fisse. Erano simili a stelle chiomate, donde il nome *comete*.

Lo Zodiaco

Gli uomini si accorsero abbastanza presto che, nonostante il loro vagabondare, i pianeti non si allontanavano mai troppo da quel cammino del Sole e della Luna chiamato dagli astronomi *eclittica* appunto perché è la strada delle eclissi.

Lungo l'eclittica gli antichi considerarono una fascia, di 8° di larghezza, che chiamarono *Zodiaco* e che divisero in dodici parti uguali o segni, iniziando dal punto corrispondente alla posizione

apparente occupata dal Sole all'equinozio di primavera. Le costellazioni comprese in tale zona, e cioè *Ariete, Toro, Gemelli, Cancro, Leone, Vergine, Bilancia, Scorpione, Sagittario, Capricorno, Acquario, Pesci*, diedero i loro nomi ai segni dello Zodiaco.

Il Toro e lo Scorpione dovettero essere le prime a venire indicate perché contrassegnavano la primavera e l'autunno. La rossa Antares faceva spicco nel cuore dello Scorpione, e Aldebaran risplendeva nell'occhio destro del toro.

Si sa che, osservando il sorgere del Sole, si può riconoscerne la posizione nello Zodiaco. Tremila anni prima di Cristo, l'inizio della primavera, o equinozio vernale, era contrassegnato dal Toro, che con le corna sembrava spingere il Sole sulla strada dello Zodiaco, al principio del suo cammino annuale. Poi, all'inizio dell'estate, quando il Sole raggiungeva la massima altezza sull'orizzonte, ritrovava sull'eclittica in quel gruppo di stelle denominato Leone. Fu chiamato in questo modo dai Caldei per spiegare l'eccezionale vigore del Sole estivo: tale calore sembrava dovesse dipendere dall'influenza delle stelle fra cui il Sole si trovava, e perciò era naturale paragonarle al più forte animale delle regioni tropicali. In autunno il Sole si muoveva più basso nel cielo, e l'equinozio d'autunno era simboleggiato dallo Scorpione che stringeva il Sole fra le chele. All'inizio dell'inverno il Sole raggiungeva la costellazione dell'acquario, cosiddetta perché pareva raffigurare un uomo che versa l'acqua da un vaso.

Alcuni suppongono che le costellazioni dello Zodiaco originariamente fossero solo sei: Toro, Gemelli, Leone, Scorpione, Capricorno e Acquario. In seguito, verso il 1000 a.C., poiché, a causa della precessione, al tempo dell'equinozio vernale il Sole non capitava più fra le corna del Toro ma piuttosto verso la sua groppa, mentre in autunno si trovava in cima alle chele dello Scorpione e non più fra di esse, vennero aggiunte le costellazioni dell'Ariete e della Bilancia, le quali indicavano gli equinozi con maggiore precisione. Cancro e Capricorno erano ora al punto più alto e più basso dell'eclittica. Gli astronomi greci adottarono lo Zodiaco verso il 1000 a.C. e da allora continuiamo a parlare di tropico del Cancro e tropico del Capricorno, anche se in realtà i tropici sono oggi contrassegnati da altre stelle (rispettivamente quelle dei Gemelli e del Sagittario) e a parlare di Sole in Ariete e nella Bilancia, mentre dovremmo dire nei Pesci e nella Vergine.

Il cammino dei corpi celesti

Nel corso di una notte si vedono le stelle, la Luna ed i pianeti che si muovono da est verso ovest. In realtà, è la Terra che ruota intorno al proprio asse da ovest ad est a darci l'illusione che sia la volta celeste a ruotare in senso opposto. Mentre le stelle si muovono solidali, quasi fossero conficcate nella volta celeste, la Luna si muove anch'essa verso ovest, ma molto più lentamente, tanto che rispetto alle stelle sembra muoversi verso est. Essa ritarda in media di quasi tutta la sua larghezza, vale a dire del diametro apparente del disco lunare (il che equivale a dire poco più di mezzo grado), all'ora, e tramonta in media 49 minuti più tardi ogni giorno. Proviamo a osservarla. Subito dopo la Luna nuova, il primo sottile falcetto sarà visibile ad ovest, non appena il Sole è tramontato; ma il giorno seguente, alla medesima ora, la Luna sarà più alta nel cielo, più spostata verso est di circa 13°. Giunta l'epoca della Luna piena, essa sorgerà quando il Sole tramonta: in due settimane, quindi, si sarà spostata di 180° da ovest verso est fra le costellazioni. Questo è dovuto al combinarsi dei moti di rotazione della Terra attorno al proprio asse, e di rivoluzione della Luna intorno alla Terra.

Che anche il Sole si sposti verso est rispetto alle stelle, sia pure di appena 1° al giorno e quindi molto più lentamente della Luna, ce ne accorgiamo dal fatto che le costellazioni, che a una certa epoca sono alte nel cielo subito dopo il tramonto, col trascorrere dei giorni anticiperanno fino a tramontare col Sole. È in tal modo che le costellazioni estive e quelle invernali si danno il cambio nel corso dell'anno. Questo spostamento del Sole tra le stelle è causato dal moto di rivoluzione della Terra.

Sempre rispetto alle stelle, vediamo muoversi anche i pianeti da ovest verso est (moto diretto), e in un tempo tanto più lungo quanto più lontano si trovano da noi; però questo movimento non è regolare, ma interrotto da periodi durante i quali il pianeta sembra arrestarsi e rimanere immobile

per qualche giorno (*stazioni*) e poi muoversi in senso contrario (*retrogradazioni*). Questi moti complessi si spiegano con la combinazione dei moti di rivoluzione della Terra e del pianeta.

La nascita della meccanica celeste

Gli antichi spiegavano i moti delle stelle fisse e dei pianeti per mezzo di sfere. Secondo loro, le stelle erano conficcate in una sfera ruotante attorno a due poli diametralmente opposti: una concezione che, per quanto inesatta, era un gran passo in avanti in paragone a quella che presupponeva una Terra piatta ed indefinita. Non solo bisognava che la Terra fosse posta all'interno della sfera delle stelle fisse, ma occorreva anche sistemare all'interno di quest'ultima le altre sfere ed i meccanismi per i moti del Sole, della Luna e dei pianeti, perché gli antichi non riuscivano a concepire come i corpi celesti potessero rimanere isolati gli uni dagli altri. Essi erano convinti che dei corpi isolati sarebbero necessariamente caduti sulla Terra. Dunque bisognava sostenere gli astri con sfere cristalline, i cui movimenti trascinavano quelli dei pianeti.

Claudio Tolomeo ed il sistema geocentrico

Fu un grande astronomo e matematico egiziano del II secolo d.C. Inserito in un centro culturale di grande importanza come Alessandria d'Egitto, raccolse l'eredità di tutto quanto era stato fatto prima, e a sua volta poté esercitare un'influenza capitale sui secoli successivi.

I tempi non erano ancora maturi, per molte ragioni, perché potesse essere accettata una visione di tipo eliocentrico, quale quella che già aveva proposto Aristarco, però si erano accumulate sufficienti osservazioni astronomiche perché si sentisse il bisogno di un'ipotesi generale astronomica che si accordasse con tali dati di osservazione con soddisfacente precisione. Da questo punto di vista, la supposizione che i corpi celesti descrivessero circonferenze concentriche il cui centro era la Terra appariva insufficiente, non potendo dar conto di diversi fatti, tra cui la variazione periodica del diametro apparente dei vari pianeti e del Sole. Valendo ancora, d'altra parte, il vecchio mito greco della pura circolarità nel movimento dei corpi celesti, era necessario trovare una qualche soluzione.

L'astronomia greca ne forniva due: la teoria degli eccentrici secondo cui i corpi celesti potevano percorrere una circonferenza, ma nel centro di questa non v'era la Terra, che era invece un pò spostata rispetto a questo, onde le distanze Terra-corpi celesti potevano variare periodicamente. La seconda soluzione era quella degli epicicli. Bastava supporre che una circonferenza centrata sulla Terra (*deferente*) fosse percorsa non dal corpo celeste considerato, ma dal centro di una seconda circonferenza (*epiciclo*) su cui realmente evolveva il corpo celeste. Ovviamente, se il deferente e l'epiciclo non fossero stati sufficienti per descrivere correttamente il movimento osservato, si sarebbe sempre potuto supporre un secondo epiciclo il cui centro, invece del corpo celeste, avrebbe percorso la circonferenza del primo epiciclo, e così via. Già Ipparco aveva dato una prima sistemazione a tutto il sistema astronomico combinando eccentrici, deferenti ed epicicli, ma solo con Tolomeo il sistema venne esaminato nei particolari e raggiunse la precisione del dettaglio. Per Tolomeo al centro del sistema v'è, naturalmente, la Terra. Si susseguono, nell'ordine: Luna, Mercurio, Venere, Sole, Marte, Giove e Saturno. Seguendo Ipparco, Tolomeo usò un eccentrico per il Sole, mentre per i pianeti venivano usati deferenti ed epicicli.

Il sistema venne descritto dall'autore nel suo *Megālē mathēmatikē syntaxis tēs astronomias* (Grande sintassi matematica dell'astronomia). Il superlativo *meghīstē*, che successivamente sostituì il *megālē* nel titolo originario, finì per denominare l'opera che, tradotta dagli arabi per ordine del califfo Harun al-Rashid all'inizio del secolo IX, acquisendo l'articolo arabo restò denominata *al-Magistī*, e *Almagesto* attraverso i traduttori latini medievali (primo dei quali fu Gherardo da Cremona nel 1175). L'opera ebbe un'enorme importanza e influenza non soltanto sui contemporanei, ma anche nei secoli successivi. Fino alla rivoluzione copernicana l'Almagesto restò infatti la base per la comprensione dell'universo. L'accettazione da parte di Tolomeo delle implicanze astrologiche contribuì ulteriormente a renderlo accetto nei secoli successivi. Il sistema divenne molto complicato. Ogni nuova variazione nella posizione di un corpo celeste, scoperta dall'osservazione, richiedeva l'introduzione di un nuovo epiciclo. Sarà tale complicazione, insieme con l'accuratezza

delle sistematiche osservazioni di Tycho Brahe, che determinerà la rovina del sistema; ma questo, fin che sopravvisse, fornì una prima base per assoggettare al calcolo alle previsioni e alle verifiche i movimenti celesti. Per questo l'Almagesto, pur con il riconoscimento di quanto Tolomeo dovette a Ipparco, resta uno dei monumenti della storia dell'astronomia.

Nel 1543, anno di morte di Nicolò Copernico, veniva pubblicato il *De revolutionibus orbium coelestium*, massima opera del grande astronomo polacco. L'antica concezione geocentrica era sostituita con quella eliocentrica e con la nuova ipotesi del doppio moto della Terra: di rotazione su sé stessa e di rivoluzione attorno al Sole. Essa suscitò molte opposizioni, soprattutto per motivi religiosi.

Nella teoria tolemaica il moto apparente dei pianeti sulla sfera celeste era ritenuto un moto reale e veniva rappresentato, come visto, con orbite circolari intorno alla Terra, dette deferenti, e altre orbite minori, situate sui deferenti, dette epicicli. Il gran contributo di Copernico consiste nell'aver mostrato che si potevano spiegare le osservazioni anche ponendo il Sole al centro, con la Terra ed i pianeti che gli ruotano intorno. Però Copernico non abbandonò mai l'antica e mistica idea delle orbite circolari, col risultato che anch'egli fu costretto ad usare una quantità di epicicli per giustificare i moti irregolari dei pianeti.

Del resto, i tempi erano tutt'altro che maturi, non certo dal punto di vista scientifico e filosofico, ma da quello teologico, perché il sistema copernicano potesse essere oggetto di una revisione critica, che avrebbe significato implicitamente l'accettazione del ribaltamento della visione tolemaica (non a caso Copernico, per paura della Santa Inquisizione, volle che la sua opera fosse resa pubblica solo all'indomani della sua morte).

Tycho Brahe

Tycho Brahe era un astronomo danese che iniziò ad occuparsi di astronomia nel 1560, quando, in occasione dell'eclissi solare del 21 agosto, fu colpito dall'esattezza della previsione di tale evento. Decisiva per il suo impegno futuro nel campo dell'astronomia fu poi l'osservazione, nel 1572, di una nuova stella apparsa nella costellazione di Cassiopea: si trattava di una *supernova* della quale determinò la posizione rispetto alle altre stelle della costellazione e che fece oggetto di costanti osservazioni nei mesi seguenti, potendone constatare le successive variazioni di luminosità e di colore; tali osservazioni furono occasione per studi approfonditi, molto importanti in epoca moderna, che Brahe riportò nell'opera *De nova stella* (1573). L'interesse suscitato dalla sua opera e la notorietà che gliene derivò furono tali che nel 1576, per trattenerlo in patria, re Federico II di Danimarca gli donò a vita l'isola di Hven (odierna Ven, allora danese ed oggi svedese) oltre ad un sussidio in denaro perché egli vi potesse allestire le strutture necessarie per compiere i suoi studi. Brahe creò sull'isola il suo famoso osservatorio *Uraniburgum* e, in un secondo tempo, *Stellaeburgum*, osservatorio il cui edificio era sotterraneo per meglio proteggere gli strumenti e del quale in superficie erano visibili la sporgenza del tetto e le cupole di osservazione.

Sull'isola di Hven, attorniato da validissimi assistenti (tra cui Giovanni Keplero), si dedicò instancabilmente all'osservazione e allo studio dei fenomeni celesti; disponeva anche di un'officina per eseguire personalmente la costruzione degli strumenti, che egli stesso progettava e perfezionava. Nel 1577 Brahe osservò una cometa e, considerandone le successive posizioni, stabilì che essa doveva muoversi molto al di là della Luna, in contrasto con l'interpretazione di Aristotele, a quei tempi ancora ritenuta valida, secondo la quale le comete sarebbero corpi sublunari; su questa sua seconda fondamentale osservazione Brahe pubblicò uno scritto: *De mundi aetherei recentioribus phaenomenis*.

Brahe compì numerose osservazioni sui pianeti, determinandone ripetutamente le posizioni con errore assai basso, nonostante la relativa primitività degli strumenti dell'epoca. Un materiale di osservazione tanto preciso ed abbondante non poteva accordarsi con il modello geocentrico tolemaico, né la formazione teologica di Brahe, rigorosamente conservatrice, gli permetteva di accettare il modello eliocentrico copernicano: Brahe ammirava Copernico e condivideva in parte le

sue critiche al sistema tolemaico, ma in quel tempo anche negli ambienti culturali più aperti erano ancora troppo forti le resistenze perché la rivoluzione copernicana, ormai indifferibile, potesse attuarsi. Brahe trovò così una soluzione di compromesso in un modello geocentrico, il *sistema ticonico*: una Terra immobile attorno alla quale ruotano Luna e Sole, mentre gli altri pianeti (Mercurio, Venere, Marte, Giove e Saturno) ruotano non intorno alla Terra, bensì intorno al Sole. Il sistema ticonico assegnava ai pianeti gli stessi luoghi deducibili per calcolo dal sistema copernicano.

Alla morte di Federico II (avvenuta nel 1588) Brahe non ebbe più l'appoggio del governo danese; fu così costretto ad abbandonare Hven e, dopo alcune dimore provvisorie in suolo danese, trascorse l'ultimo periodo della sua vita a Praga, sotto la protezione dell'imperatore Rodolfo II.

Giovanni Keplero, il prezioso assistente di Brahe, che lo aveva seguito a Praga, si fece scrupoloso esecutore del completamento dell'opera *Astronomiae instauratae progymnasmata*, pubblicata postuma, nel 1602.

Giovanni Keplero scoprì che, per eliminare d'un colpo tutte le difficoltà, bastava considerare le orbite come delle ellissi, e fra il 1609 ed il 1618 enunciò, deducendole dalle osservazioni sulle posizioni dei pianeti, soprattutto di Marte, effettuate da Brahe, le tre leggi che portano il suo nome. Tale deduzione è espressa in termini geometrici, nel tentativo fatto da Keplero di razionalizzare le orbite dei pianeti introducendo dapprima relazioni tra i cinque poliedri regolari (cubo, tetraedro, dodecaedro, icosaedro, ottaedro) e, in seguito, mettendole in relazione con le sezioni coniche contenute nell'opera di Pappo.

Queste le tre leggi di Keplero:

1. *Ogni pianeta si muove descrivendo un'orbita ellittica ed il Sole occupa uno dei due fuochi di questa ellisse;*
2. *Il raggio vettore, o linea immaginaria congiungente il centro del Sole con il centro del pianeta, descrive aree uguali in tempi uguali;*
3. *I quadrati dei periodi di rivoluzione dei pianeti attorno al Sole sono proporzionali ai cubi delle loro distanze medie dal Sole.*

La seconda legge ha per conseguenza che un pianeta si muove più velocemente quando è più vicino al sole (*perielio*), mentre si muove più lentamente quando è nel punto più lontano (*afelio*). Dalla terza legge segue che la velocità di rivoluzione media di un pianeta è tanto maggiore quanto esso è più vicino al Sole. Mercurio, per esempio, ha una velocità media di 48 km/s, la Terra di 29 km/s e Nettuno di 5.7 km/s. La terza legge ci permette anche di determinare le dimensioni del sistema solare quando si conosca la sua scala, che può essere data dall'*unità astronomica* (ua), cioè la distanza Terra-Sole; infatti, il periodo di rivoluzione è ricavabile con l'osservazione (esso va dagli 88 giorni di Mercurio ai 248 anni e mezzo di Plutone). Dalla terza legge di Keplero, infine, si può calcolare la distanza media di un pianeta dal Sole in unità astronomiche, cioè posta uguale ad 1 la distanza Terra-Sole. Quando questa sia nota, lo saranno anche le vere dimensioni del sistema solare. Occorre perciò misurare la vera distanza di un qualsiasi pianeta, e ciò è stato fatto con diversi metodi, come quello basato sull'impiego del radar, che consiste nel trasmettere un impulso di energia e riceverne l'eco. Siccome l'impulso viaggia alla stessa velocità della luce (circa 300000 km/s), l'intervallo fra la trasmissione dell'impulso e la ricezione dell'eco indica la durata del viaggio. Questo esperimento è stato fatto con Venere; con opportuni calcoli si è ottenuto un valore dell'unità astronomica eguale a 149600000 chilometri.

Facciamo un piccolo passo indietro e torniamo a Copernico. All'indomani della pubblicazione del *de revolutionibus orbium coelestium*, si obiettò che se la Terra girava intorno al Sole doveva occupare, a sei mesi di intervallo, delle posizioni molto distanti tra loro ed uguali circa al doppio della distanza media Terra-Sole. Come mai, allora, non si notava nessun cambiamento nella prospettiva delle stelle fisse? Dovevano trascorrere circa tre secoli perché l'obiezione venisse superata; nel 1838 l'astronomo tedesco Friedrich Wilhelm Bessel riuscì a misurare questo effetto di parallasse: effetto tanto maggiore, quanto più è vicina la stella. Però anche le stelle più vicine

presentano spostamenti angolari minimi, inferiori ad 1 secondo d'arco: quantità che solo misure accuratissime e strumenti adatti permettono di rilevare, essendo equivalente all'angolo sotto cui si vedrebbe 1 centimetro a 2 chilometri di distanza. Bessel misurò la posizione della stella 61 *Cygni* rispetto ad un'altra angolarmente vicina, e trovò che la loro distanza apparente variava di circa 0".30 in un anno.

Newton e la legge di gravitazione

Keplero aveva constatato che le orbite planetarie sono delle ellissi, ma senza spiegarne il perché. La risposta la diede Isaac Newton, il quale completò la formulazione delle leggi del moto dimostrando che le leggi di Keplero erano soltanto casi speciali delle seguenti:

1. *Ogni corpo continua nel suo stato di quiete o di moto uniforme in linea retta, a meno che non sia costretto a cambiarlo da un'altra forza che agisca su di esso;*
2. *Il cambiamento di moto è proporzionale alla forza motrice impressa e si esercita nella direzione in cui questa forza è impressa;*
3. *A ogni azione si oppone sempre una reazione uguale; ovvero le mutue azioni di due corpi l'uno sull'altro sono sempre uguali e dirette in senso contrario* (principio di azione e reazione).

Di queste tre leggi la più importante è la prima, con cui è formulato il principio di inerzia secondo il quale un corpo rimane in quiete o in moto se non è disturbato da nessuna forza esterna. Si rendeva così inutile l'idea tolemaica del *Primum Mobile*, ossia della sfera celeste che con la rotazione diurna muoveva tutte quelle più interne in modo che ogni sfera trasferisse il moto alla seguente.

Ma Newton enunciò un'altra legge che introduce il concetto di una forza fondamentale, base di tutta la meccanica celeste. Essa dice: *due corpi si attirano in modo direttamente proporzionale alla loro massa e in ragione inversa al quadrato della loro distanza*. Tutti i moti osservati si possono spiegare con l'inerzia e l'attrazione gravitazionale. Si ricorderà certamente l'aneddoto secondo il quale una mela caduta da un albero avrebbe fatto intuire a Newton che la forza che aveva fatto cascare il frutto era la stessa forza che fa girare la Luna intorno alla Terra, e la Terra e i pianeti intorno al Sole. Newton comprese cioè che la gravità non era un fenomeno puramente terrestre, ma si doveva applicare anche ai corpi celesti.

La prima conseguenza da trarre dalla legge gravitazionale è che ogni pianeta non subisce soltanto l'attrazione del Sole, ma anche quella di tutti gli altri pianeti. Le prime due leggi di Keplero, quindi, che sarebbero rigorosamente esatte se esistessero soltanto il Sole e un pianeta, sono soltanto approssimate, anche se l'attrazione dell'astro centrale è di gran lunga preponderante. È per questo che i pianeti subiscono quei fenomeni che gli astronomi chiamano *perturbazioni*. Lo stesso Newton pervenne a determinare le più importanti perturbazioni, come quelle molto complesse della Luna. La meccanica celeste si occupa appunto del calcolo delle perturbazioni. Essa conduce a previsioni sicure sulle posizioni future degli astri e permette anzi di scoprire la presenza di corpi invisibili (perché oscuri o difficili da osservare o troppo lontani) mediante le perturbazioni subite dai corpi circostanti, come nel caso di Urano e Plutone o di corpi planetari intorno ad altre stelle. Oggi, con l'avvento dell'astronautica, lo studio e i progressi della meccanica celeste sono di fondamentale importanza per il calcolo delle orbite delle sonde spaziali.

La volta celeste e la posizione delle stelle

Come abbiamo già accennato, il moto di rotazione della Terra attorno al proprio asse da ovest ad est crea l'illusione che sia la volta celeste a ruotare da est verso ovest. I punti dove l'asse di rotazione terrestre, prolungato all'infinito, incontra la sfera celeste, vengono detti *poli celesti*. Il polo nord celeste si trova vicinissimo alla Stella Polare; perciò essa appare quasi immobile sulla volta celeste che le ruota attorno. Nei pressi del polo sud non c'è alcuna stella di rilievo. A causa della forma della Terra, si ha un leggero spostamento annuale della posizione dei poli. Come si sa, la Terra non è una sfera perfetta, ma il suo diametro equatoriale è una quarantina di chilometri più grande del diametro polare; il che significa che è leggermente rigonfia all'equatore. Questo modifica

l'influenza esercitata dall'attrazione gravitazionale del Sole e della Luna; ed il risultato è che l'asse della Terra descrive un cono, ed il polo un circolo sulla sfera celeste. L'effetto è analogo a quello di un giroscopio e il fenomeno è noto col nome di *precessione*. Il polo celeste, per descrivere tutta la circonferenza, impiega circa 25800 anni. Oltre a questo fenomeno se ne verifica un altro detto *nutazione* (movimento oscillatorio), dovuto al fatto che la Luna è a volte sopra, a volte sotto il piano dell'orbita della Terra, cosicché essa non sempre esercita la sua attrazione sul rigonfiamento equatoriale della Terra nella stessa direzione in cui l'esercita il Sole. Ne consegue che la linea dei poli descrive in cielo un'ellisse con un'asse maggiore di 18" in un periodo di circa 19 anni. Per via della precessione, la Stella Polare non segnerà sempre il polo nord. Nell'anno 3000 a.C. la Stella Polare era *Thuban* (α *Draconis*), una stella giallina e di una lucentezza più debole di α *Ursae Minoris* (l'attuale Stella Polare). Fra circa 12000 anni, la Stella Polare sarà la brillantissima *Vega* (α *Lyrae*)

Coordinate astronomiche

Proseguendo la descrizione della volta celeste, si chiamano *zenit* e *nadir* rispettivamente il punto al di sopra della nostra testa e quello diametralmente opposto; è detto *orizzonte* il piano perpendicolare alla verticale che li unisce. Il cerchio massimo perpendicolare all'asse terrestre e passante per il centro della Terra è l'*equatore terrestre*, ed *equatore celeste* è la sua intersezione con la sfera celeste. *Eclittica* è il piano dell'orbita terrestre, ed anche il cerchio intersezione di questo piano con la sfera celeste. Piano dell'equatore e piano dell'eclittica formano un angolo di 23°30' (obliquità dell'eclittica). Come già sappiamo, l'eclittica rappresenta il cammino apparente del Sole fra le stelle. All'inizio dell'estate il Sole si trova 23°30' a nord dell'equatore, mentre all'inizio dell'inverno è 23°30' a sud. Ogni anno attorno al 21 marzo (la data non è costante a causa delle imperfezioni del nostro calendario) il Sole taglia l'equatore nel suo cammino da sud a nord. Questo punto è conosciuto come *equinozio di primavera* o *punto d'Ariete*. Sei mesi dopo il Sole raggiunge di nuovo l'equatore, questa volta da nord a sud, e abbiamo l'*equinozio d'autunno*.

Usando questi vari punti di riferimento, ora siamo in grado di fissare sulla sfera celeste la posizione apparente delle stelle.

Un primo sistema di coordinate prende in considerazione due coordinate, l'*altitudine* e l'*azimut*, e come piano di riferimento l'orizzonte dell'osservatore (*coordinate altazimutali*). L'altitudine è l'altezza del corpo sull'orizzonte misurata in gradi; l'azimut è la distanza angolare in gradi fra il punto sud dell'orizzonte e il piede della perpendicolare tirata dall'astro all'orizzonte, e in genere misurata da sud verso ovest. Altitudine e azimut delle stelle cambiano di continuo nel tempo per effetto della rotazione terrestre, e da luogo a luogo in dipendenza dell'orizzonte dell'osservatore.

Un altro sistema prende per riferimento l'equatore, e usa due coordinate che si chiamano *declinazione* e *ascensione retta* (*coordinate equatoriali*). La declinazione è la distanza angolare di un corpo a nord o a sud dell'equatore celeste, e perciò corrisponde alla latitudine geografica. La declinazione della Stella Polare è circa 90° nord o +90° (in realtà è +89°2'), mentre la declinazione di una stella sull'equatore è 0°. Veduta dall'emisfero settentrionale, l'altezza del polo celeste è sempre uguale alla latitudine dell'osservatore. Così, a Palermo, situata alla latitudine di 38° nord, l'altezza della Stella Polare sarà anche di 38°; a Roma, situata a +41° di latitudine, l'altezza del polo è 41°; a Milano, che si trova a +45°, si avrà il polo celeste a 45° d'altezza. Visto dal polo nord terrestre il polo celeste avrà un'altezza di 90°; cosicché si troverà allo zenit, proprio sulla testa dell'osservatore. Dall'equatore terrestre, la Stella Polare apparirà sull'orizzonte, e dall'emisfero sud non si vedrà più. Analogamente, gli abitanti dell'emisfero nord non potranno mai vedere il polo sud celeste.

La seconda coordinata è l'ascensione retta, che si misura dal punto d'Ariete verso est in ore, minuti e secondi di tempo. Il cerchio massimo sulla sfera celeste che passa per i due poli e lo zenit dell'osservatore è conosciuto come *meridiano*. Quando una stella incrocia il meridiano dalla parte più vicina al punto sud, è al suo punto più alto sull'orizzonte, *culminazione superiore* o *mezzocielo*, per un osservatore dell'emisfero boreale. Anche il punto d'Ariete deve naturalmente culminare una

volta ogni rotazione terrestre. L'ascensione retta di una stella è l'intervallo di tempo che passa fra la sua culminazione e quella del punto d'Ariete. Così Vega, che culmina $18^{\text{h}}35^{\text{m}}$ dopo il punto d'Ariete, ha un'ascensione retta di $18^{\text{h}}35^{\text{m}}$. queste due coordinate (declinazione e ascensione retta) restano costanti nel tempo (in realtà variano molto lentamente per effetto della precessione) e per ogni osservatore.

Altre coordinate astronomiche particolarmente utili per gli studi del sistema planetario sono la *longitudine celeste* e la *latitudine celeste*, riferite all'eclittica (*coordinate eclitticali*). La longitudine celeste è l'angolo, misurato in gradi verso est, fra il punto d'Ariete e la base di una perpendicolare tirata dall'oggetto all'eclittica; mentre la latitudine celeste è la distanza in gradi a nord o a sud dell'eclittica, misurata su un arco ad angolo retto sull'eclittica.

Il Sole, la Luna ed i pianeti principali giacciono quasi sull'eclittica; l'inclinazione è di 7° per Mercurio, molto meno per gli altri pianeti (ad eccezione di Plutone, il più lontano, che ha un'inclinazione di 17°). È per questo motivo che essi si trovano sempre nella fascia dello Zodiaco.

Si chiama *circumpolare* una stella che rimane sempre sopra l'orizzonte dell'osservatore. Questo avviene quando la declinazione è maggiore di 90° meno la latitudine del luogo (di osservazione). Così, per un osservatore alla latitudine di 45° (Milano), il limite sarà 45° , ed egli potrà vedere tutto l'anno delle stelle come *Capella* e *Daneb* con declinazione di circa 45° ; mentre non lo potrà un osservatore un po' più a sud. Dal polo nord, l'intero emisfero nord è circumpolare, con l'equatore celeste sull'orizzonte e l'emisfero sud permanentemente invisibile. Il che spiega i sei mesi della notte polare. Infatti, quando il Sole si trova a sud dell'equatore celeste (fra il 22 settembre e il 21 marzo) non sorge mai. Intanto al polo sud si ha un giorno di sei mesi, con un Sole circumpolare per lo stesso periodo.

I calendari e la misura del tempo

La parola calendario deriva dal termine latino *calende* con cui i Romani indicavano il primo giorno di ogni mese. Ma almeno fino a Giulio Cesare e nonostante la riforma di Numa Pompilio, i Romani ebbero un calendario molto grossolano e non si preoccuparono troppo della ricerca dei valori esatti del giorno, del mese e dell'anno, in cui si può dire sia consistita tutta la ricerca astronomica antica.

Le ore

Probabilmente la divisione del giorno in ore la si deve ai Babilonesi. Essi lo divisero per mezzo di clessidre o gnomoni in dodici *kaspu*, corrispondenti a due delle nostre ore., forse per analogia con le dodici lunazioni dell'anno, o perché dodici è un numero divisibile per 2, 3 e 4, o per motivi religiosi, o per tutte queste ragioni. Ogni *kaspu* si divideva a sua volta in sessanta minuti.

Altri popoli, invece, conoscevano soltanto la divisione del giorno in periodi ineguali, come i Persiani, che consideravano cinque periodi: l'aurora (da metà della notte al levare del Sole), il tempo del sacrificio (dal levare del Sole fino a mezzogiorno), la piena luce (da mezzogiorno al tramonto del Sole), il levare degli astri (da dopo il tramonto fino all'apparire delle costellazioni), il tempo della preghiera (dal principio della notte fonda fino a mezzanotte).

I Romani usavano tredici periodi: *diluculum* (albeggiare), *mane* (mattino), *ad meridiem* (verso mezzogiorno), *meridies* (mezzogiorno), *de meridie* (pomeriggio), *suprema* (tramonto), *vespera* (sera), *crepusculum* (crepuscolo), *prima fax* (prima torcia, notte), *concupium* (notte inoltrata), *intempesta nox* (notte profonda), *media nox* (mezzanotte), *gallicinium* (canto del gallo e ripresa del lavoro).

La suddivisione babilonese in ore divenne generale soltanto quando fu adottata dai Greci e più tardi (nel 263 a.C.) dai Romani. La divisione in 24 ore, infine, sembra nata dall'adozione di 12 *kaspu* per contare le ore di luce e di altri 12 per la notte. Naturalmente, le 12 ore esatte di luce e le 12 ore esatte di buio si hanno soltanto al tempo degli equinozi.

Il giorno

Quando comincia il giorno? I Caldei, gli Egiziani e i Persiani lo facevano iniziare al levare del Sole. Se è vero che i Romani andavano a lavorare col canto del gallo, il loro giorno però cominciava col tramonto del Sole, come anche per i Cinesi, per i Greci, per gli Italiani fino a due secoli fa e per i Musulmani ancora oggi. Non solo c'è differenza nell'inizio del giorno, ma anche nella sua durata. Infatti, a poco a poco, si scoprì che esiste una varietà di giorni di 24 ore: il giorno siderale, il giorno solare vero, il giorno solare medio. Però, qualunque sia la varietà, il giorno è legato alla rotazione della Terra su sé stessa, la quale provoca l'apparenza del sorgere e tramontare degli astri, della rotazione della sfera celeste intorno ai poli.

Veniamo ora alla definizione dei vari giorni. Se segniamo l'ora in cui da un dato luogo vediamo una stella passare in corrispondenza di un certo punto sulla superficie terrestre (per esempio il picco di una montagna), e poi segniamo quella in cui vi passerà il giorno dopo, il tempo trascorso sarà il tempo impiegato dalla Terra a compiere una rotazione. Vedremo che sono trascorse 23 ore e 56 minuti, e questo è il *giorno siderale*. Ora supponiamo di usare il Sole invece della stella, e controlliamo il tempo che esso impiega a passare due volte in coincidenza di una stessa mira; questa volta conteremo 24 ore e avremo il *giorno solare*. La ragione di questa differenza è che durante la rotazione su sé stessa la Terra si è anche mossa di un certo tratto della sua orbita intorno al Sole, il che implica che vediamo il Sole in una direzione leggermente diversa. La differenza temporale tra il giorno siderale ed il giorno solare è di circa 4 minuti primi, che equivale ad un supplemento di rotazione che la Terra deve compiere per bilanciare il cammino percorso nella sua orbita intorno al Sole e che la porta a vedere quest'ultimo sotto una direzione diversa (l'angolo tra le due diverse direzioni corrisponde all'arco percorso sull'orbita).

Sebbene il giorno siderale rappresenti il vero periodo di rotazione della Terra, il giorno solare è il giorno usato comunemente, poiché è il Sole che regola la nostra vita. Tuttavia, neanche il giorno solare è di 24 ore esatte. Infatti, se misuriamo la lunghezza del giorno solare per diversi giorni

durante l'anno, noteremo che per alcuni mesi dell'anno il giorno solare supera di qualche secondo le 24 ore, mentre è inferiore di qualche secondo in altri periodi. La ragione è che la Terra accelera il suo moto di rivoluzione al perielio mentre si muove più lentamente all'afelio (in accordo con la seconda legge di Keplero). Per eliminare queste irregolarità, gli astronomi hanno inventato un *Sole fittizio*, che si muove sull'equatore (invece che sull'eclittica come il Sole vero) di moto uniforme, con velocità angolare costante uguale a quella media del Sole vero. L'intervallo di tempo che passa fra l'istante in cui culmina il Sole vero e l'istante in cui culmina il Sole fittizio si chiama *equazione del tempo*. L'intervallo raggiunge un valore massimo di circa 14 minuti (14^m30^s) di ritardo verso la metà di febbraio ed un valore massimo di circa 16 minuti (16^m18^s) di anticipo ai primi di novembre; l'intervallo è invece uguale a zero (cioè il Sole vero coincide col Sole fittizio) quattro volte all'anno: 16 aprile, 14 giugno, 1 settembre, 24 dicembre (occorre però tener presente che queste date possono cadere in giorni diversi nel corso degli anni, dato che l'anno civile non inizia in esatta coincidenza con quello astronomico).

L'intervallo di tempo fra due ritorni del Sole fittizio (o Sole medio) nella stessa posizione, si dice *giorno solare medio*, e il tempo solare medio è quello che segnano i nostri orologi.

Il mese e l'anno

Fin dalla preistoria l'uomo accordò le sue attività venatorie ed agricole alle fasi lunari, e ciascun mese cominciava al tramonto del Sole, nel giorno in cui si vedeva ad ovest il nuovo crescente lunare. Ma dodici di tali mesi, lunghi ciascuno 29 o 30 giorni (poiché di tanto varia, all'incirca, il ciclo delle fasi lunari) assommavano ad appena 354 giorni, invece dei 365 all'anno delle stagioni. Di conseguenza, ogni due o tre anni si doveva aggiungere un tredicesimo mese per tenersi alla pari con le stagioni, come del resto si fa ancora oggi laddove si usa il calendario lunare. I nomi dei nostri mesi riproducono quelli del calendario latino, il quale in origine aveva un anno di 304 giorni, raggruppati in dieci mesi, che naturalmente non coprivano tutto l'anno solare e nemmeno quello lunare. Forse si trattava di un anno agricolo, dal tempo della semina al raccolto, escluse le vacanze rurali. Il primo mese dell'anno era Marzo, da *Mars* il dio della guerra; Aprile derivava da *aperire* (l'aprirsi dei germogli) o da Afrodite; Maggio e Giugno da *Maia* e *Juno*; l'una l'annunciatrice della Primavera e la seconda la madre degli dei. Gli altri si chiamavano seguendo il loro ordine: *Quintilis*, *Sextilis*, *September*, *October*, *November*, *December*. I giorni erano distribuiti così: si avevano quattro mesi di 31 giorni (marzo, maggio, quintilis e ottobre) mentre gli altri sei ne avevano 30.

È chiaro che con dieci mesi soltanto era impossibile armonizzarsi con le stagioni. Perciò Numa Pompilio (o forse Tarquinio) aggiunsero altri due mesi: *Januarius*, che deriva da *Janus*, il dio dai due volti; e *Februarius* da *Februo*, dio dei morti, o da *Februa*, epiteto di Giunone quale dea della purificazione. Inoltre, sei mesi rimasero di 30 giorni, mentre gli altri sei furono fissati di 29 giorni; si avevano così i 354 giorni necessari per coprire l'anno lunare. Infine, per tenersi in pari con le stagioni, si introdusse ogni secondo anno un mese intercalare detto *Mercedonius* (perché era dedicato ai pagamenti), alternativamente di 22 e 23 giorni. Così gli anni erano in media di 365 giorni e $\frac{1}{4}$, e dopo quattro anni (*una tetraeteride*) l'inizio dell'anno era ricondotto allo stesso giorno. Si trattava di un anno *lunisolare* che avrebbe funzionato molto bene, se non fosse stato guastato dai decemviri e pontefici del periodo repubblicano. Infatti, invece di mantenere l'aggiunta di 50 giorni al calendario primitivo, passando da 304 giorni a 354, che è il periodo dell'anno lunare (e poi col mese intercalare all'anno di 365 giorni e $\frac{1}{4}$), portarono l'aggiunta a 51 giorni perché il numero dispari piaceva agli dei.

I dodici mesi vennero rimaneggiati nella seguente maniera: Martius, Maius, Quintilis, October conservarono 31 giorni; Januarius, Aprilis, Junius, Sextilis, September, November ne ebbero 29. a febbraio toccarono 28 giorni, e quindi diventò doppiamente malefico: perché era il più corto e perché contava un numero pari di giorni. Così l'anno salì a 366 giorni e $\frac{1}{4}$, con l'errore notevole di un giorno all'anno. Per questo errore, per la superstizione, e soprattutto per gli imbrogli dei pontefici, i quali accorciando o allungando certi periodi avevano fatto del calendario un mezzo di corruzione politica, si finì per non andare più d'accordo né col Sole né con la Luna. Nel 190 a.C. il

calendario romano era in anticipo di 117 giorni. Questa differenza scese a 72 giorni nel 168 a.C.; cosicché, nei 22 anni intermedi, deve essersi evidentemente intercalato dodici volte. Si deve supporre che in tal modo il calendario al tempo dei Gracchi fosse pressappoco in corrispondenza con le stagioni, come mostrano le date tramandate per le campagne militari per il periodo che va dal 140 al 70 a.C. circa. Al tempo di Cesare, invece, si trascurò di nuovo l'intercalazione, cosicché nel 46 a.C. esisteva una differenza di 90 giorni in meno; si era arrivati a celebrare in primavera le feste di autunno.

Finalmente l'errore fu corretto da Giulio Cesare (*calendario giuliano*) che aveva appreso in Egitto da Sosigene la lunghezza dell'anno tropico, uguale, secondo gli egiziani, a 365 giorni e $\frac{1}{4}$: valore determinato con l'osservazione assidua e plurisecolare del levare eliacco di Sirio. Cesare non tenne alcun conto della Luna, e stabilì che l'*anno comune* contasse 365 giorni e il *bisestile* (*quarto quoque anno*) 366; l'anno cominciava con gennaio invece che con marzo; ai mesi venne attribuito il numero ineguale di giorni che hanno adesso; e all'anno 46 a.C., in cui ebbe luogo la riforma, e che fu detto *annus confusionis*, si aggiunsero 90 giorni per riportare il giorno dell'equinozio di primavera al 25 marzo.

Pur riformando il calendario, Cesare non osò sfidare le abitudini e le superstizioni dei suoi concittadini. Così i nomi dei mesi da Quintilis a December (ma dopo di lui Quintilis divenne *Julius* e *Sextilis*, *Augustus*, rispettivamente in onore suo e di Augusto) non corrisposero più al loro significato quando gennaio venne posto in cima alla lista.

Nei nuovi mesi di 31 giorni non si cambiò nemmeno la data delle idi e delle none, col risultato che in due mesi della stesa lunghezza, come gennaio ed ottobre, i Latini situavano le idi il 13 in gennaio e il 15 in ottobre. Un'altra concessione alle usanze si nota nell'anno di 366 giorni ogni 4 anni: noi aggiungiamo un giorno alla fine di febbraio, invece essi conservarono al corto e sfavorevole mese i 28 giorni che gli convenivano. Poi, come facevano con l'antico mercedonius, intercalarono il giorno addizionale dopo il 24 febbraio, il quale si chiamava *sextus ante calendas martias*. Ma per non nominarlo e per non modificare i nomi degli altri giorni, lo chiamarono *bis sextus ante calendas martias*. Donde la parola bisestile.

Varie specie di anno

Quello giuliano era un calendario solare, basato sulla durata dell'anno tropico. Vediamo cosa significa. Come la rotazione della Terra su sé stessa dà luogo a differenti specie di giorni a seconda se ci riferiamo al Sole o alle stelle, così anche la rivoluzione della Terra attorno al Sole dà luogo a diverse specie di anno: siderale, tropico, anomalistico. Per *anno siderale* s'intende il tempo che passa fra due ritorni successivi del Sole nella stessa posizione tra le stelle. Esso ha una durata di 365.25636 giorni solari, ossia di $365^{\text{d}}9^{\text{h}}9^{\text{m}}9^{\text{s}}$. L'*anno tropico* è il tempo che trascorre fra due passaggi del Sole al punto d'Ariete, e la sua durata è di 365.24220 giorni e cioè $365^{\text{d}}5^{\text{h}}48^{\text{m}}46^{\text{s}}$; è quindi più corto dell'anno siderale. Questo perché, a causa del moto di precessione degli equinozi, il punto d'Ariete si sposta in senso inverso al movimento del Sole di 50" d'arco all'anno. L'*anno anomalistico* è l'intervallo fra due successivi ritorni della Terra al perielio. Poiché il perielio si sposta di 11" d'arco all'anno nello stesso senso in cui si muove la Terra, l'anno anomalistico è più lungo del siderale e pari a 365.25954 giorni.

La riforma gregoriana

Siccome le stagioni cominciano sempre alle stesse epoche dell'anno tropico, è su di esso che si basa il calendario. Ma, a poco a poco, ci si accorge che il valore scelto da Sosigene per l'anno tropico, e adottato dal calendario giuliano, non era esatto. Per esempio, il Concilio di Nicea del 325 d.C. aveva adottato una regola fissa per la determinazione delle feste pasquali: regola basata sulla credenza che l'equinozio di primavera cadesse tutti gli anni il 21 marzo, come era avvenuto appunto l'anno del Concilio. Invece, si vede che dopo un certo numero di anni l'equinozio continuava ad anticipare: 20 marzo, 19 marzo e così via (a questo proposito si ricorderà che Cesare l'aveva fissato al 25 marzo) alla media di $\frac{3}{4}$ d'ora ogni 4 anni. Nel 1582, che fu l'anno della riforma gregoriana, ,

l'equinozio ricorreva l'11 marzo invece del 21. È per questo che papa Gregorio XIII decise di sopprimere l'anticipo di 10 giorni, senza alterare l'ordine dei giorni della settimana, stabilendo che all'indomani di giovedì 4 ottobre 1582 fosse venerdì 15 ottobre. Occorreva però che l'inconveniente non si ripetesse. Si decise quindi che invece di 100 bisestili su 400 anni, come si avevano nel calendario giuliano, ce ne fossero solo 97; e che tutti gli anni secolari fossero comuni, cioè di 365 giorni, ad eccezione di quelli che sono multiplo di 400. così il 1700, il 1800 e il 1900 sono stati anni comuni, mentre il 2000 è stato bisestile (*calendario gregoriano*).

Nemmeno l'anno gregoriano è perfetto, perché è ancora troppo lungo di 0.0003 giorni rispetto all'anno tropico. Questo significa che in circa 3000 anni il calendario gregoriano avrà accumulato l'errore di un giorno. Ma forse è inutile ricercare un'esattezza assoluta; anzi è impossibile, essendovi almeno altri due fattori di incertezza, dipendenti dai moti della Terra. Prima di tutto, infatti, la rivoluzione della Terra, e quindi l'anno tropico, non è costante, e se anche va diminuendo di pochissimo ogni anno, l'accumularsi di questi raccorciamenti raggiunge i tre giorni in 10000 anni. In secondo luogo, neppure la rotazione della Terra è costante, ma rallenta a causa del continuo attrito delle maree sulla superficie solida del pianeta; un effetto che in 10000 anni assomma a due giorni. In conclusione, l'imperfezione del calendario gregoriano e i moti particolari della Terra contribuiscono ad anticipare la data dell'equinozio di primavera di circa 8 giorni in 10000 anni.

Altri calendari

Cesare scelse il Sole, Maometto scelse la Luna, e per questo motivo i Maomettani hanno un calendario lunare. I loro mesi seguono il corso della Luna, e sono di 29 o 30 giorni; gli anni si compongono costantemente di 12 mesi e comprendono 354 o 355 giorni. Ciò fa incominciare l'anno musulmano 10, 11 o 12 giorni prima di quello solare, e ne consegue che i mesi, le festività ecc. fanno a ritroso in trenta anni il giro di tutte le stagioni.

L'era maomettana, o Egira, incomincia il 15 luglio dell'anno 622 d.C. Così, ad esempio, il sabato sera del 30 marzo dell'anno gregoriano 1968 è incominciato l'anno 1388 del calendario musulmano, che è terminato la sera di sabato 19 marzo 1969.

Anche gli Ebrei usano il mese lunare (alternativamente di 29 e 30 giorni), ma non permettono che il loro calendario rimanga troppo indietro al Sole; trattasi perciò di un calendario lunisolare. Gli Ebrei contano gli anni in gruppi di 19, perché 19 anni solari sono quasi esattamente 235 mesi lunari (mancano appena due ore), cosicché, in tale intervallo di tempo, Sole e Luna si ritrovano quasi insieme; e per ogni gruppo di 19 si aggiunge un altro mese intercalare nel 3°, 6°, 8°, 11°, 14°, 17° e 19° anno. In altre parole, ogni 19 anni, 12 sono formati da 12 mesi lunari e 7 da 13 mesi lunari. In questi 19 anni, il numero totale dei giorni è di 6936, ma con certi arrangiamenti il calendario ebraico arriva al numero medio di 6939.7 giorni, invece dei 6939.6 dell'anno solare. Cosicché, la differenza ammonta ad appena 1 giorno in 200 anni.

Questo modo di mantenere l'anno lunare in accordo con l'anno solare fu inventato dai Babilonesi verso il 500 a.C. e adottato dagli Ebrei nel 538 d.C.

Nell'insieme, il calendario ebraico si mantiene abbastanza d'accordo col Sole (e perciò con le stagioni) e non ha mai ritardato sul Sole per più di 22 giorni o preceduto più di 8. La maggiore difficoltà è che è piuttosto complicato. L'era ebraica comincia nel 3760 a.C., considerato dalla tradizione l'anno della creazione del mondo; perciò, ad esempio, l'anno gregoriano 1968 è stato per gli Ebrei il 5728 ($3760 + 1968 = 5728$), è cominciato al tramonto del Sole mercoledì 4 ottobre 1967 ed è finito la sera di domenica 22 settembre 1968.

Il calendario perpetuo

Oltre a non essere perfetto, il calendario gregoriano non è nemmeno troppo logico. La suddivisione dell'anno in mesi di durata ineguale, che non danno neppure dei trimestri eguali; il suo cominciare col 1° di gennaio, che non corrisponde a nessun cambiamento di stagione; il mantenimento della settimana (la quarta parte del mese lunare) nonostante che il nostro mese non abbia più alcun riferimento al mese lunare; il continuo cambiamento del nome del giorno della settimana che cade

ad una certa data; il numero variabile delle domeniche e dei giorni di lavoro, hanno fatto pensare all'utilità di un calendario perpetuo o universale. La prima riforma in tal senso si deve forse all'abate italiano Marco Mastrofino, il quale nel 1834 propose che l'ultimo dell'anno fosse un *giorno bianco*, affinché i 364 giorni rimanenti si potessero raggruppare esattamente in 52 settimane. Considerando poi, ogni 4 anni, anche il giorno bisestile fuori della settimana, a ogni data corrisponderebbe sempre lo stesso giorno.

Orologio solare

Il Sole è stato uno dei primi orologi usati dall'uomo. Ogni giorno il Sole segna l'ora del mezzogiorno quando incrocia il meridiano dell'osservatore (una linea immaginaria che va dal polo nord al polo sud celesti passando attraverso lo zenit). Dato che il Sole percorre completamente la volta celeste (che possiamo considerare un cerchio diviso in 360°) una volta ogni 24 ore, segneremo 15° per ogni ora di tempo ($1/24$ di 360°). Per usare il moto del Sole come un indicatore del tempo, si inventò l'orologio solare; ve ne sono molti tipi ma tutti con una cosa comune: lo stilo o *gnomone*, che permette di conoscere l'ora osservando l'ombra da esso proiettata. Come il Sole si muove, si muove anche l'ombra dello gnomone su un quadrante dove sono segnate le ore.

Le stagioni e l'obliquità dell'eclittica

È stato misurando la lunghezza dello gnomone ai solstizi che gli antichi hanno scoperto l'obliquità dell'eclittica. Infatti nel nostro emisfero l'ombra del mezzogiorno si raccorcia sempre di più dal 22 dicembre, inizio dell'inverno, fino al 21 giugno, allorché sembra fermarsi; prende quindi ad allungarsi per tutta l'estate e l'autunno, fino al 22 dicembre, quando raggiunge di nuovo la sua massima lunghezza.

Durante tutto il mese di giugno o di dicembre il cambiamento di lunghezza dell'ombra è piccolissimo, e occorrono osservazioni molto accurate per dire in che giorno l'ombra è davvero più corta perché il Sole a mezzogiorno raggiunge il suo punto più alto sull'orizzonte, o più lunga perché culmina nel punto più basso di tutto l'anno. I giorni nei quali il Sole sembra che si fermi sono chiamati *solstizi*, dal latino *solstitium* che significa "fermata del Sole". È l'obliquità dell'eclittica o, in altre parole, l'inclinazione dell'equatore sul piano dell'eclittica che provoca le stagioni e il fatto che giorno e notte non sono uguali per tutto l'anno (tranne agli *equinozi*, dal latino *aequinoctium* "notti eguali") e per tutti i luoghi (tranne all'equatore).

Le quattro stagioni non sono una prerogativa della Terra, ma di tutti i pianeti il cui asse di rotazione non è normale al piano dell'orbita. In questo caso, in realtà, il Sole illumina inegualmente i due emisferi, e ciascuno di essi presenta necessariamente la successione delle quattro stagioni che noi conosciamo, limitate dagli equinozi e dai solstizi.