

## La candela

Volendo parlare di argomenti di attualità, che cosa c'è di più attuale, nel momento in cui scrivo, di Rosetta e Philæ? È anche l'occasione per ragionare un po' sulle comete; mi accorgo che stranamente, da quando scrivo "La candela," non ne ho mai parlato. Ho fatto qualche fuggevole accenno, ma niente di più.

Eppure nella storia dell'astronomia e più in generale della fisica le comete hanno un posto importante (per non parlare della storia della cultura). Fin da tempi remoti hanno suscitato interesse, paura, in quanto fenomeni celesti "nuovi," imprevisi ed effimeri: si rendevano visibili in modo improvviso e in breve tempo, al più mesi, scomparivano. Avevano inoltre un aspetto particolare: la chioma, la coda. . .

Sappiamo che Galileo scrisse *Il Saggiatore* in polemica con Orazio Grassi gesuita, proprio sull'origine delle comete. In quell'opera G. sostiene una tesi sbagliata, ossia la localizzazione atmosferica delle comete; ma lo fa con argomenti scientifici, anche se inadeguati. Non è l'unico caso in cui G. si ostina in una spiegazione sbagliata, facendosi forte della sua abilità polemica: famosa è la cantonata sulle maree, cui dedica la quarta giornata del *Dialogo*. Lì il suo bersaglio è Keplero, che sosteneva un'azione a distanza della Luna come causa delle maree, anticipando, sia pure nel suo caratteristico modo confuso, l'idea della gravità.

G. definisce l'idea di K. "fanciullezza"; aveva probabilmente in antipatia il modo di pensare del suo contemporaneo, che mescolava sane idee scientifiche con un dubbio misticismo (v. la "musica delle sfere," o il tentativo di spiegare le distanze dei pianeti dal Sole tirando in ballo i "solidi platonici," ossia i 5 poliedri regolari). Questa antipatia, anche se in parte giustificata, gli impedì di vedere quanto c'era di valido nell'opera di K.: le orbite ellittiche e le famose leggi; nonché, in altro campo, la teoria del cannocchiale.

Tornando per un attimo al *Saggiatore*, se questo è ancor oggi considerato un'opera tra le principali di G., non è certo per quello che dice sulle comete. Lo è invece per la lezione di metodo scientifico, per il famoso discorso sull'universo "scritto in lingua matematica," per l'insistenza a guardare le cose (il "libro della natura") prima di filosofare.

\* \* \*

Chiedo scusa per la divagazione, e torniamo alle comete. Il vero passo avanti nella comprensione di questi fenomeni celesti lo fa Newton, che nei *Principia* analizza diverse osservazioni basandosi su una tesi esplicita (proposizione XL del libro terzo):

*Le comete si muovono lungo sezioni coniche che hanno il loro fuoco nel centro del Sole, e condotti i raggi verso il Sole, descrivono aree proporzionali ai tempi.*

In realtà, dato che la maggior parte delle comete ha orbite fortemente eccentriche, N. sceglie di approssimarle con parabole, che sono più semplici da trattare. La proposizione XLI dice infatti:

*A partire da tre osservazioni date, determinare la traiettoria di una cometa che si muove lungo una parabola.*

Lo definisce subito “problema difficilissimo,” e non proverò neppure a esporre la sua soluzione (anche perché, lo confesso, non ho avuto la pazienza di studiarla). Nella pagine che seguono si trova un dettagliato esempio: la cometa del 1680. Dopo un riassunto delle osservazioni fatte da diversi astronomi, N. riporta i risultati dei suoi calcoli, confrontati con le osservazioni. Le discrepanze ammontano ad alcuni primi, indicando che qualcosa non va nel calcolo: o qualcuna delle osservazioni è errata, o il metodo (approssimato) di N. non è abbastanza buono, o l’ipotesi di orbita parabolica non è corretta.

Subito dopo, N. riporta il lavoro di Halley su quella stessa cometa. In primo luogo H. migliorò il procedimento di calcolo; poi fece uso di più osservazioni, e già questo ridusse notevolmente la discordanza tra calcoli e dati osservati. Ma introdusse poi un’ipotesi nuova: si convinse che la cometa del 1680 fosse la stessa già osservata in epoche antiche, nel 44 a.C., nel 531 e nel 1106 d.C. Questo escludeva un’orbita parabolica e imponeva un’orbita ellittica, con periodo di 575 anni e quindi semiasse maggiore di 69 UA (terza legge di Keplero); l’eccentricità era vicinissima a 1:  $e = 0.99991$ . L’orbita di H. dava quindi una distanza della cometa del Sole al perielio di 0.0124 UA e all’afelio di 276 UA. Su queste basi gli errori solo in pochi casi superano i 2’.

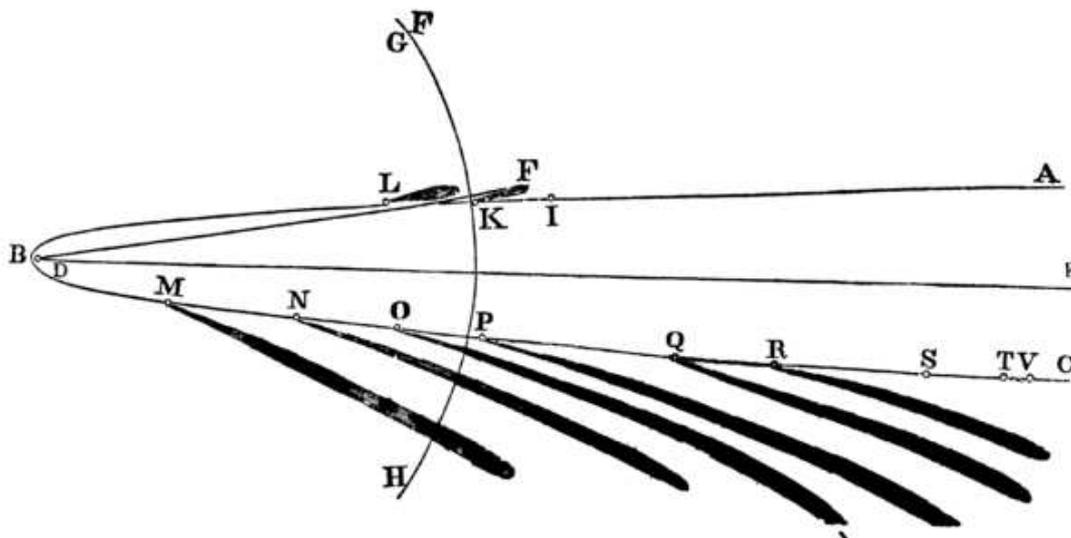
Va detto però che gli studi moderni non sembrano confermare l’identificazione fatta da H. della cometa del 1680 con quelle più antiche. Oggi è incerto se la cometa del 1680 fosse periodica, ma se lo è dovrebbe avere un periodo di migliaia di anni.

\* \* \*

Ma continuiamo a sfogliare il terzo libro dei *Principia*. N. comincia a studiare le code delle comete, la loro costituzione e formazione. Non ci si può aspettare grandi risultati, in un tempo in cui troppe cose necessarie per sviscerare quei problemi non erano ancora state capite; in pratica solo due fatti N. riesce ad accertare, che mantengono ancor oggi la loro validità.

Il primo è geometrico: la coda delle comete è sempre *opposta* al Sole. Il secondo riguarda da vicino la natura delle code: queste sono molto più appariscenti *dopo* che la cometa ha passato il perielio, che non prima. N. ne arguisce correttamente che la coda venga formata dal riscaldamento del corpo della cometa, dovuto alla vicinanza al Sole. Descrive i corpi delle comete come “solidi, compatti, fissi e durevoli a somiglianza del corpo dei pianeti,” come si capisce dal

fatto che l'immenso calore ricevuto dal Sole al perielio non riesce a disperderli e a distruggerli. La figura qui sotto è ripresa appunto dai *Principia*, e rappresenta l'orbita della cometa del 1680, con la coda in varie posizioni della cometa.



Sul perché le code siano sempre opposte al Sole, N. non riesce a proporre una spiegazione solida. Riporta il parere di Keplero, secondo il quale ciò è dovuto (cito N.) “all’azione dei raggi di luce, che trascinano con sé la materia delle code”: un’altra intuizione anticipatrice di Keplero, visto che oggi sappiamo che la direzione delle code è effettivamente dovuta alla pressione della radiazione solare. N. non ritiene “contraria alla ragione” l’ipotesi di Keplero, ma poi si diffonde in una sua spiegazione che è inutile riportare perché basata su idee del tutto errate circa lo stato della materia intorno al Sole, che lui assimila all’atmosfera terrestre.

\* \* \*

Conviene saltare alcune pagine, per arrivare al punto dove N. riferisce lo studio, fatto da Halley, della cometa del 1682. Nella sua *Synopsis of the Astronomy of Comets* (1705) H. aveva studiato questa cometa, tenendo anche conto delle perturbazioni di Giove e Saturno, e aveva concluso che fosse la stessa già apparsa nel 1531 e nel 1607. Ne aveva ricavato un periodo di 76 anni, e quindi il ritorno della cometa nel 1758.

La cosa strana è che nella terza edizione dei *Principia*, che è del 1726, N. riferisce dei calcoli di H., tra cui per es. la distanza dal Sole al perielio, data in 0.583 UA (il valore moderno è 0.586 UA, ma su questo torno fra poco). Invece non fa alcun cenno alla previsione di un ritorno della cometa: eppure si tratta della prima previsione, nella storia dell’Astronomia, di un evento non legato al moto del Sole, della Luna e dei pianeti (come sono per es. le eclissi).

Credo sia noto a tutti che la previsione si dimostrò esatta, anche se con un certo errore nella data del ritorno. Né H. né N. poterono assistere all'evento, essendo entrambi morti, il primo nel 1742, il secondo nel 1727. Si trattò di un fatto di estrema importanza, perché confermava il *potere predittivo* della teoria di N.

Commentiamo velocemente: un conto è dare spiegazione di fatti già noti (come la precessione degli equinozi o le maree); un altro riuscire a prevedere qualcosa che tutti potranno osservare e che non ci si sarebbe potuti aspettare in altro modo. Entrambi gli aspetti sono essenziali per la validità di una teoria scientifica: il suo *potere esplicativo*, e il già detto potere predittivo. La teoria di N. li possedeva entrambi, e in tempi successivi ne sarebbero arrivate altre prove.

Tutti sanno che la cometa di H. ha puntualmente rispettato le previsioni del suo ritorno periodico: l'ultimo è stato nel 1986, il prossimo sarà nel 2061, per cui solo i più giovani tra i miei lettori potranno assistervi.

\* \* \*

Ho fatto diversi accenni, parlando del moto delle comete, a previsioni solo approssimate, a perturbazioni . . . quasi che le comete fossero oggetti piuttosto inafferrabili, in questo diversi dai pianeti e dalla loro rigida regolarità. Vediamo dunque di chiarire.

C'è del vero nell'idea di una differenza qualitativa tra pianeti e comete: le ragioni sono due. La prima è che i pianeti hanno tutti orbite poco eccentriche, il che fa sì che restino sempre a distanze poco variabili dal Sole, mentre le comete hanno quasi sempre forti eccentricità, per cui le distanze al perielio e all'afelio sono molto diverse. Per es. ho già dato la distanza al perielio della cometa di H.; quella all'afelio è circa 35 UA, ossia 60 volte maggiore.

D'altra parte le osservazioni delle comete, a differenza di quelle dei pianeti, possono essere fatte solo quando sono abbastanza vicine a noi e al Sole, perché quando sono molto distanti, essendo corpi molto più piccoli dei pianeti, hanno una luminosità apparente debolissima. Sono difficili da osservare oggi, ed erano invisibili ai telescopi del '700. C'è anche da considerare che il tratto di orbita osservabile è percorso in un tempo molto breve (seconda legge di Keplero) e anche questo rende più difficili le osservazioni.

Ne segue che la parte esterna dell'orbita può essere determinata solo con molta incertezza, il che in termini più precisi significa che dati come semiasse maggiore ed eccentricità restano molto incerti, mentre è più attendibile la determinazione della distanza al perielio. Un esempio è appunto la cometa di Halley, la cui distanza dal Sole al perielio, come ho già detto, venne data da H. in 0.583 UA mentre oggi è data 0.586 UA. Nel caso di questa cometa H. poté trovare anche un valore attendibile per il semiasse, ma ricavandolo dal periodo, meglio che dalle osservazioni dirette.

La forte eccentricità delle comete ha poi un'altra conseguenza spiacevole per chi vuole studiarne il moto: sono soggette a forti perturbazioni da parte dei pianeti, che possono alterare anche seriamente forme e dimensioni dell'orbita, nonché il periodo. A rigore neppure i pianeti obbediscono esattamente alle leggi di Keplero, a causa delle perturbazioni causate dalle attrazioni reciproche. (Di queste perturbazioni mi è capitato di parlare più volte, l'ultima [1] a proposito della precessione del perielio di Mercurio.) Ma per un pianeta, che si muove su un'orbita quasi circolare e resta quindi sempre a distanza "di sicurezza" dagli altri, le perturbazioni hanno effetti in genere piccoli, e comunque regolari. Esempio tipico è la grande perturbazione del moto di Saturno dovuta a Giove, che ammonta a  $0.8^\circ$  con un periodo di quasi 900 anni.

Invece una cometa può trovarsi a passare più o meno vicino a un grande pianeta e in tal caso la sua orbita può venire alterata fortemente, cambiando anche di molto il semiasse maggiore, l'eccentricità e il periodo. Di conseguenza i calcoli sono più complicati, e i risultati mostrano sempre una certa irregolarità del moto. A titolo di esempio, gli intervalli di tempo fra gli ultimi 6 passaggi al perielio della cometa di H. sono stati di 74.94, 76.41, 76.68, 74.42, 75.81 anni.

\* \* \*

Lasciamo Newton, e parliamo un po' della natura fisica delle comete. Le dimensioni tipiche di una cometa sono facili da stimare, già solo in base alla sua luminosità apparente. Non vorrei dilungarmi, ma è evidente che assumendo per la superficie della cometa una riflessione (*albedo*) non troppo diversa da quella dei pianeti, la misura della magnitudine a distanza nota fornisce subito una stima della superficie visibile. Ne risultano dimensioni di qualche km, come i più piccoli degli asteroidi.

Dati assai più precisi si sono ottenuti con le missioni spaziali: le missioni *Vega* e soprattutto *Giotto* raggiunsero nel 1986 la cometa di Halley. *Giotto* si avvicinò a 600 km e determinò forma, dimensioni, massa (e quindi densità) e albedo. Quest'ultima risultò assai bassa (0.04: la cometa è più scura della Luna).

La composizione chimica delle comete è nota da lungo tempo, almeno a grandi linee: a questo basta l'osservazione spettroscopica della luce riflessa dal nucleo e di quella diffusa dalla chioma e dalla coda. Le missioni spaziali hanno dato informazioni più precise, ma hanno confermato il quadro generale: roccia, polvere, ghiaccio, composti organici vari, diversi gas condensati a solidi causa la bassa temperatura alla quale le comete si trovano per la maggior parte del tempo. Credo quasi superfluo sottolineare l'interesse per i composti organici: una conferma e un'analisi più dettagliata di tali composti potrebbero dirci molto sul grande problema dell'origine e della diffusione della vita sulla Terra e nel sistema solare.

La missione *Rosetta* ha raggiunto da pochi mesi la cometa Churyumov-Gerasimenko, ed è notizia di questi giorni (nel momento in cui scrivo) il successo

parziale di *Philæ*, il robot che si è posato sulla cometa il 12 di questo mese (novembre 2014). Parlo di successo parziale perché l'aggancio alla superficie non è riuscito, il robot ha rimbalzato più volte e si è infine posato in una posizione dove riceve poca luce dal Sole. Di conseguenza ha dovuto affidare il funzionamento di tutti gli strumenti alle batterie di bordo, che però si sono velocemente scaricate. Perciò il funzionamento di *Philæ* è stato sospeso, in attesa che l'avvicinamento della cometa al Sole nei prossimi mesi fornisca abbastanza energia per rimetterlo in funzione.

Non è male fermarsi a riflettere sui “rimbalzi”: per quanto si tratti di meccanica elementare, non si può dire che i mezzi di comunicazione abbiano dato notizie chiare e corrette sulla questione. La cosa che più confondeva i giornalisti era la distinzione fra massa e peso: mi è capitato di sentire frasi come questa “un peso di 100 kg equivale sulla cometa a 0.1 grammi.” Qualcuno dovrà scusarmi, ma non reputo superfluo, con la mia solita e incorreggibile pedanteria, rivedere la questione dagli inizi.

Abbiamo una cometa di forma assai irregolare, che per semplicità supporremo sferica, di raggio 5 km. La massa è nota:  $10^{13}$  kg. Con questi dati possiamo calcolare il campo gravitazionale alla superficie, usando la formula  $g = GM/r^2$ . Risulta  $g \simeq 3 \cdot 10^{-5}$  N/kg. Se vi aspettavate che esprimessi  $g$  in  $m/s^2$ , faccio osservare quanto segue:

- il modo più corretto di dare l'unità per un campo gravitazionale è quella che ho scritto: forza/massa
- è anche vero che in quel campo un corpo cadrà con un'accelerazione numericamente uguale al campo, e che si misurerà in  $m/s^2$ ; anzi le due unità sono identiche
- la differenza (una pignoleria, se volete) è che un campo c'è sempre, mentre un'accelerazione c'è solo se c'è qualcosa che cade.

Supponiamo ora che il corpo (*Philæ*) rimbalzi con una velocità la cui componente verticale vale 10 cm/s: quanto sarà alto il rimbalzo? quanto durerà? Le formulette del moto uniformemente accelerato dovrebbero essere note a tutti, e comunque vi faccio grazia del calcolo. I risultati sono: altezza del rimbalzo 187 metri, durata 2 ore abbondanti.

Ma la questione del “peso che equivale”? Semplice: avrebbero dovuto dire che un corpo che pesato sulla Terra fa segnare 100 kg (forza) alla bilancia, sulla cometa pesa meno di 3 grammi. Ma che pesi così poco non significa che la *massa* sia scomparsa... Se un ipotetico astronauta, anche lui posato sulla cometa, tentasse di sollevare *Philæ*, avrebbe una sorpresa: il robot non si farebbe spostare agevolmente. Il nostro eroe sarebbe spinto a contrarre i bicipiti, applicando a *Philæ* una forza (poniamo) di 10 N per un secondo, e otterrebbe di dargli una velocità verso l'alto di 10 cm/s. Dopo di che se lo vedrebbe scappare in su e cercherebbe di fermarlo... col solo risultato di venire trascinato in alto anche lui, a una velocità un po' ridotta: 6 cm/s se la sua massa è 70 kg. (Perché ridotta?

conservazione della quantità di moto ...). Ma niente paura, dopo essere salito di 67 metri ricadrebbe lentamente, toccando di nuovo ... terra dopo un po' più di un'ora.

\* \* \*

Piuttosto, c'è una cosa più seria su cui soffermarsi, anche se non si tratta di un argomento nuovo: ne abbiamo parlato solo due anni fa [2]. Piccoli asteroidi e satelliti, e anche le comete, non sono tenuti insieme dalla forza di gravità, ma dalla normale coesione della materia allo stato condensato. Non c'è quindi alcuna ragione che abbiano forma sferica o quasi (che è quella che rende minima l'energia potenziale gravitazionale): la loro forma dipende dal modo casuale in cui si sono formati, a seguito di urti o per graduale aggiunta di materia a un nucleo primitivo.

In effetti Deimos, il satellite più piccolo di Marte, è poco più grande della cometa di Halley, e ha una forma che ricorda una patata butterata da crateri. La cometa Churyumov-Gerasimenko, che nella dimensione più lunga misura circa 7 km, ha forma ancora più irregolare (v. figura).



- [1] **NATURALMENTE 24** (2011), n. 1 e  
<http://www.sagredo.eu/candela/candel170.pdf>
- [2] **NATURALMENTE 25** (2012), n. 4 e  
<http://www.sagredo.eu/candela/candel177.pdf>