

El ball caòtic dels planetes



Vicent Botella i Soler

Institute of Science and Technology (IST)
Viena, Àustria

A hores d'ara, tothom sap què és un planeta i tots tenim una idea, més o menys completa, de l'aspecte o estructura del sistema solar. De fet, gràcies als primers passos en l'exploració de l'espai, hem vist imatges meravelloses dels seus membres. La ciència ficció, per altra banda, ens ha dut de viatge a altres mons tant en la literatura com en el cinema. En un primer moment, però, els planetes foren només uns punts de llum en el cel. Un punts que no es movien igual que la resta, les estrelles.

Els grecs identificaren cinc planetes¹ i els donaren noms propis: Mercuri, Venus, Mart, Júpiter i Saturn. Ni tan sols imaginaven que la Terra, la nostra casa, formava part d'aquest conjunt. Ens va costar molts segles, molt d'esforç i molts sacrificis aprendre, des de la nostra humil i limitada perspectiva, que aquests planetes, la Terra inclosa, són cossos massius (grandíssimes pilotes de matèria) que es mouen al voltant del Sol, la nostra estrella.

El camí o trajectòria que segueixen els planetes al voltant de la seva estrella l'anomenem **òrbita** del planeta. Des de la Grècia antiga es vénen proposant

models, idees, sobre la forma d'aquestes òrbites. Assumint d'antuvi el sistema copernicà amb el Sol en el centre i els planetes girant al seu voltant, el primer gran èxit conreat en aquest camp és el model de l'astrònom alemany Johannes Kepler (1571-1630). Com bé saben els estudiants de batxillerat, aquest model es resumeix en tres lleis i concorda magníficament amb les observacions disponibles a l'època.

La primera de les lleis de Kepler ens diu que els planetes segueixen òrbites el·líptiques al voltant del Sol i que aquest se situa en un dels focus de l'el·lipse. Les altres dues ens diuen com es mou el planeta en aquesta el·lipse: quan de temps li costa fer una volta completa i quina és la velocitat en els diferents punts de l'òrbita.

La idea de sistema solar que ens deixa el model de Kepler és la de 6 planetes (inclosa la Terra, ara sí) seguint camins el·líptics al voltant d'un Sol fix (Figura 1). Cal parar esment que aquest model no proposa, però, cap mecanisme que explique aquest tipus d'òrbita. Què volem dir amb açò? Bé, estareu d'acord que una cosa és dir, per exemple, que les tomaques són roges i una altra dir què provoca el color roig de les tomaques. El model de Kepler és un exemple del primer tipus d'afirmació (i amb açò no li volem treure cap mèrit!).

El mecanisme o causa d'aquestes òrbites havia d'esperar l'aparició en escena del físic anglés Isaac Newton (1643-1727). Entre moltíssimes altres coses, Newton va proposar les seues famoses tres lleis del moviment i la llei de la gravitació universal. Aquesta última descriu la força atractiva que s'estableix entre dos cossos pel sol fet de tindre massa. La força de la gravetat és tant més gran com més massa tinguen els cossos i més a prop estiguen².

Amb la formulació matemàtica de les seues lleis, Newton va poder deduir les 3 lleis de Kepler des de principis fonamentals en estudiar la interacció gravitatòria entre el Sol i un planeta (amb açò ja sabem per què són roges les tomaques). Aquest és un problema relativament senzill que s'estudia actualment en el primer curs d'universitat i que duu el títol, per raons òbvies, *Problema dels dos cossos*. Les òrbites el·líptiques i també altres tipus d'òrbites, com ara les parabòliques d'alguns cometes, apareixen com a solucions d'aquest problema. És a dir, quan dos cossos (dos i només dos) interaccionen gravitatòriament, les òrbites el·líptiques són una de les opcions disponibles per

al moviment dels cossos³.

Podríem pensar que amb açò queda tot resolt: ja sabem les òrbites que segueixen els planetes (el·lipses al voltant del Sol) i, a més, sabem el perquè de la seua forma a través de les lleis de Newton. Però tornem a considerar de nou, per un moment, la força de la gravetat: aquesta actua entre qualssevol dos cossos i en el sistema solar hi ha clarament més de dos cossos! És a dir, els planetes no interaccionen només amb el Sol, també s'atrauen mútuament. I, si ens volem complicar la vida encara més, podem recordar que els planetes tenen satèl·lits que també interaccionen gravitatòriament amb tota la resta.

Aleshores, és bona l'explicació de Newton? Podem menysprear la resta d'interaccions i considerar sols un planeta i el Sol cada vegada que calculem una òrbita? A l'època de Newton semblava que sí, donat que ajustava bastant bé les observacions. Però, i si la interacció entre planetes sí que té un efecte, encara que siga molt petit? Pot aquesta interacció alterar, per exemple, l'òrbita de la Terra?

Aquesta idea, que potser no és preocupació ni usual ni quotidiana, sembla que feia patir al rei Òscar II de Suècia. Amb motiu del seu 60 aniversari, l'any 1887 va convocar un concurs matemàtic en el qual es proposaven diversos problemes no resolts. Un d'ells era l'anomenat problema dels N cossos. És a dir, com es mouen un nombre gran i indeterminat de cossos en interacció gravitatòria (i no sols dos, com ja havia resolt Newton)? El matemàtic francès Henri Poincaré (1854-1912) va guanyar el concurs amb un treball sobre la dinàmica de 3 cossos en interacció gravitatòria. Aquest no era un problema nou, sinó que venia estudiant-se des del s. XVIII. Hom coneixia algunes solucions particulars per a configuracions senzilles dels 3 cossos, però no estava clar si existia una solució general.

Poincaré va estudiar la varietat de trajectòries que aquest sistema podia presentar i va concloure que segons els valors dels paràmetres del sistema (masses, distàncies, etc.) els planetes podien seguir trajectòries impossibles de predir: s'havia descobert el primer sistema caòtic (Figura 2).

Cal fer una pausa en aquest punt per evitar una confusió habitual: les òrbites que anomenem caòtiques, malgrat ser impossibles de predir, no són atzaroses (com la loteria). De la mateixa manera que les òrbites regulars (les el·líptiques, per exemple), les òrbites caòtiques estan regides



Figura 1. Segell de la República Txeca (2009) per commemorar el 400 aniversari de la publicació de l'obra *Astronomia Nova* de Johannes Kepler. Sota la figura del científic es pot veure una representació esquemàtica de l'òrbita el·líptica d'un planeta al voltant del Sol. (<http://www.ntm.cz/en/conference-kepler-prague-2009/the-new-stamp-with-kepler>)

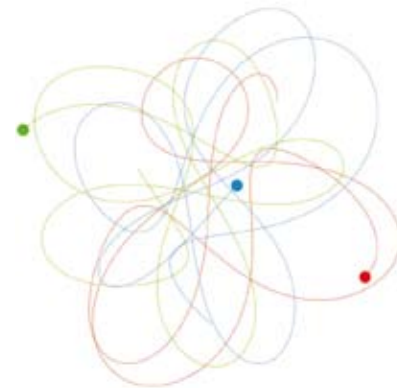


Figura 2. Exemple de trajectòries en el problema de 3. Hi podem apreciar la complexitat del moviment (<http://demonstrations.wolfram.com/PlanarThreeBodyProblem/>).

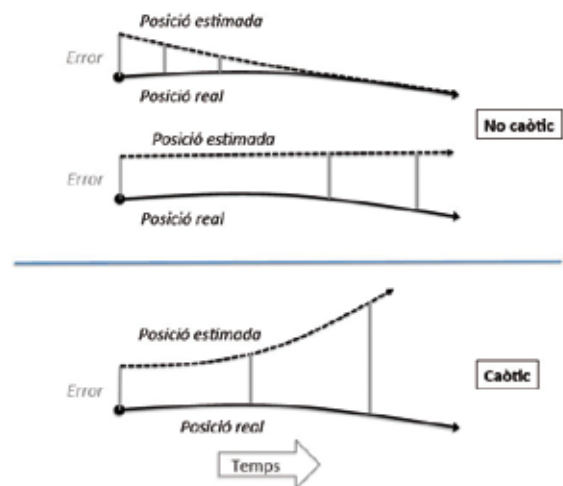


Figura 3. Diferència entre una òrbita regular o no caòtica i una de caòtica. La línia contínua representa la trajectòria real del planeta. La línia discontinua indica la predicció que fem de la trajectòria futura del planeta a partir d'una estimació de la seua posició (i velocitat) actual. Les barres grises ens indiquen l'error que cometem en estimar la posició del planeta i posteriorment l'error en la predicció de l'evolució. En el cas no caòtic, l'error pot disminuir, créixer linealment o mantenir-se constant (ací n'hem representat els dos primers casos). En qualsevol d'aquests tres casos podem fer una predicció raonable de l'evolució del planeta (corregint les estimacions, si cal, amb noves observacions). En el cas caòtic, però, l'error, per petit que siga inicialment, creix exponencialment amb el temps i esdevé complicadíssim predir la trajectòria real.

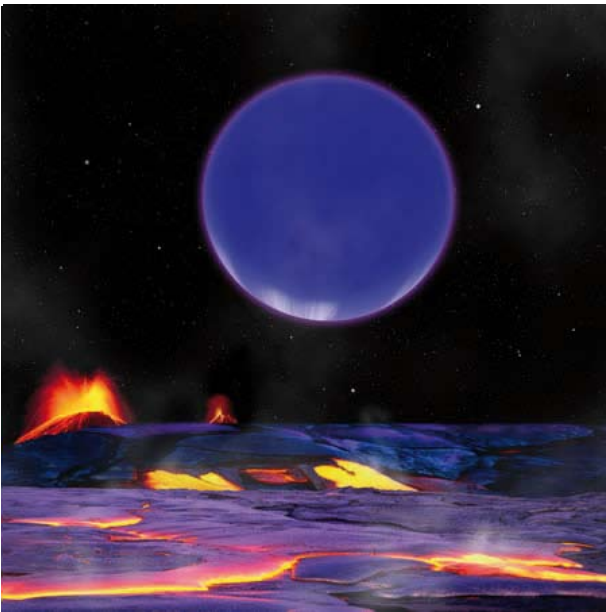


Figura 4. L'observatori espacial Kepler de la NASA. (<http://kepler.nasa.gov>)

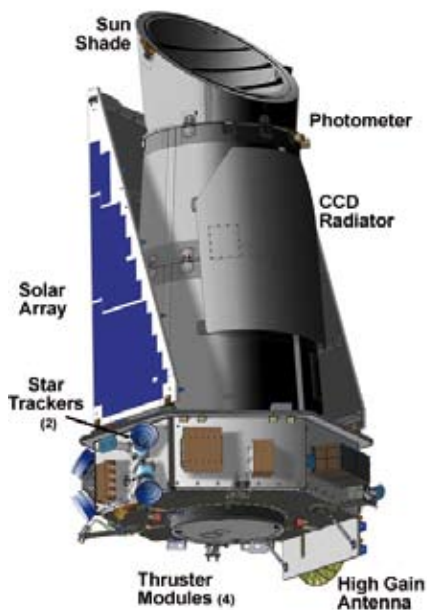


Figura 5. Concepció artística (titulada *Planetrise*) que mostra el planeta Kepler-36c tal i com es veuria des del seu veí Kepler-36b. (Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics/David Aguilar)

per equacions matemàtiques que determinen unívocament la seua forma. Però per tal que aquestes equacions, en aquest cas les lleis de Newton, ens informen de com va a moure's un planeta, hem de determinar primer on està el planeta, quina velocitat duu, quina és la seua massa, etc. I ací resideix l'os del problema. Si cometem un petit error determinant aquestes quantitats, en el cas de l'òrbita caòtica aquest error s'amplificarà

ràpidament convertint-se en un error enorme en la predicció de l'evolució futura del planeta. En una situació regular o estable, per contra, la predicció del moviment del planeta és insensible a petits errors en les condicions inicials (Figura 3).

Més enllà d'aquesta discussió estrictament teòrica, què li passa a la Terra? O, més en general, què li passa al sistema solar? A hores d'ara sabem que les òrbites dels planetes del sistema solar són caòtiques. Però tots tranquils, no sembla greu. Les òrbites caòtiques presenten diferents nivells d'impredictibilitat. Açò es pot mesurar amb l'anomenat *temps de Lyapunov* que ens diu el temps a partir del qual la diferència entre l'òrbita real i la predicció és ja inacceptable (segons un determinat criteri matemàtic). Com més gran siga el temps de Lyapunov, millor serà la nostra capacitat predictiva. El temps de Lyapunov, en el cas de la Terra, és d'uns 5 milions d'anys. És a dir, podem predir la seua trajectòria amb gran antelació.

Tanmateix, sense sortir del sistema solar, podem trobar cossos amb un temps de Lyapunov molt més curt. Concretament, dos petits satèl·lits de Saturn en moviment a l'interior dels anells del planeta, Pandora i Prometeu, presenten òrbites fortament caòtiques que sorprengheren els científics de la NASA encarregats del seu seguiment^[1].

I fora del sistema solar? Malgrat tota la ciència-ficció que ha situat l'acció en altres planetes al voltant d'estrelles llunyanes (posats a recomanar, recomanem la trilogia *Fundació* d'Isaac Asimov), no fou fins l'any 1992 que es va confirmar la detecció d'un planeta fora de les fronteres del nostre sistema solar. Es tractava en aquest cas de dos planetes orbitant al voltant d'un púlsar (una estrella de neutrons). L'any 1995, els astrònoms Michel Mayor i Didier Queloz anunciaren el descobriment dels primers planetes orbitant una estrella de l'anomenada seqüència principal com el nostre Sol. Quan escric aquestes línies el cens de planetes extrasolars o exoplanetes registra ja 797 planetes orbitant al voltant de 629 estrelles diferents^[2]. Com seran les òrbites d'aquests planetes? Quina és la configuració de sistema planetari més habitual? Aquest és un exemple de les preguntes que els investigadors intenten contestar actualment. Podeu imaginar que determinar l'òrbita de planetes que orbiten al voltant d'estrelles llunyanes i que sols podem detectar de manera indirecta és poc menys que heroic.

L'observatori espacial Kepler de la NASA, en òrbita des de 2009, està especialment dedicat a

la detecció d'exoplanetes i monitoritza regularment 156 000 estrelles (Figura 4). Gràcies a aquestes observacions s'ha descobert recentment que dos exoplanetes de l'anomenat sistema Kepler-36 segueixen òrbites caòtiques amb un temps de Lyapunov menor de 10 anys^[4]. Aquests dos planetes tenen 4 i 8 vegades la massa de la Terra respectivament i les seves òrbites estan tan pròximes que el planeta més massiu vist des del més lleuger es veu 2,5 vegades més gran que la lluna plena vista des de la Terra^[3] (Figura 5). Atesa la seva proximitat, és bastant evident que la interacció gravitatòria entre els planetes no és menyspreable i els investigadors apunten a aquesta com a la causa més probable de la caoticitat de les òrbites.

Així que, efectivament, com ja apuntava el treball de Poincaré, quan més de dos cossos ballen al ritme de la gravetat, les seves trajectòries es poden complicar moltíssim. Una confirmació observacional heroica per a una intuïció matemàtica genial de fa més d'un segle^[4]!



Agraïments

Cal agrair una lectura crítica i les suggerències del professor Josep Ros, que han ajudat a millorar i aclarir alguns aspectes d'aquest article.

Referències

[1] Goldreich, P., Rappaport, N. (2003). Chaotic motions of Prometheus and Pandora. *Icarus*, 162, 391-399.

[2] NASA Exoplanet Archive: <http://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu>.

[3] Deck, K.M. et al. (2012). Rapid Dynamical Chaos in an Exoplanetary System. *Astrophys*, 755, L21 (2012)

[4] Carter, J.A. et al. (2012). Kepler-36: A Pair of Planets with Neighboring Orbits and Dissimilar Densities. *Science*, 337, 556.

NOTES

¹ En realitat la llista de planetes clàssics inclou també el Sol i la Lluna però avui sabem que un és una estrella i l'altra el satèl·lit del nostre planeta. La resta de planetes, Urà i Neptú, no es veuen a ull nu i foren descoberts segles després: Urà el 1781 per W. Herschel i Neptú l'any 1846 per U. Le Verrier i J. G. Galle. El planeta nan Plutó, descobert l'any 1930, fou considerat el novè planeta fins l'any 2006.

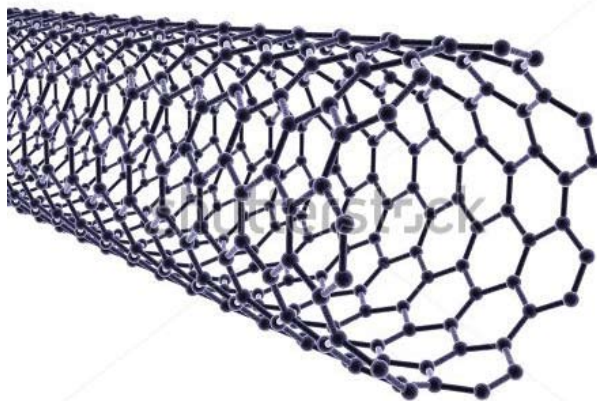
² Per ser més precís: la força de la gravetat és proporcional al producte de les masses dels cossos i inversament proporcional al quadrat de la distància entre aquests.

³ El lector més atent s'haurà adonat que açò no resol del tot el problema del mecanisme: si la gravetat és l'origen de les òrbites el·líptiques, quin és l'origen de la gravetat? Encara no tenim resposta per aquesta pregunta!

La FDA regula els productes nanotecnològics

CORAL CANTOS

2n BAT - IES Antoni Llidó



Imatge tridimensional d'un nanotub de carboni.
Imatge: www.shutterstock.com

La nanotecnologia tracta de la manipulació i aplicació de materials, aparells i sistemes funcionals a una escala d'entre 1 i 100 nm (1 nm és la centmil·lionèsima part d'1 mm) per tal d'obtenir partícules i estructures amb unes propietats i comportaments únics que permeten noves aplicacions. Es tracta d'una tecnologia que proporciona avanços prometedors en molts àmbits. Tanmateix, aquestes noves partícules presenten un risc: desconeixem la seua toxicitat.

L'alimentació és un dels camps on, fins ara, més aplicacions té la nanotecnologia. S'utilitza per intensificar el sabor de cremes i gelats, reduir el contingut de greixos, produir envasos, etc. També, hom fa servir molt en la cosmètica: obtenció de filtres solars, cremes antiarrugues, etc. El fet que ingerim o ens posem en contacte, amb aquests productes nous, d'efectes desconeguts ha portat la FDA (Agència de l'Alimentació i el Medicament dels Estats Units) a elaborar directrius sobre la seguretat dels productes que utilitzen la nanotecnologia. En concret, la FDA ha intensificat els instruments i mètodes per a avaluar aquests productes i aconsella a les empreses que demostren la seua seguretat i que la consulten abans de treure'ls al mercat. De tota manera, la FDA deixa una gran part de la responsabilitat en les mans de les companyies implicades.