

POINCARÉ E OS LIMITES DA LEI DE NEWTON: O DESAFIO EMPÍRICO DAS ANOMALIAS OBSERVACIONAIS

María de Paz

Universidad de Sevilla
maria.depaz@hotmail.com

Resumo: Este artigo considera o problema da gravitação na transição do século XIX para o XX, analisando o curso de Poincaré “Les limites de la loi de Newton”. Neste artigo expõem-se apenas as principais anomalias observacionais que questionaram a lei do inverso do quadrado e as soluções mais populares tal como apresentadas pelo próprio Poincaré. Esta apresentação dos limites da lei de Newton mostra que a obra de Poincaré não só constitui um contributo para a análise do problema mas é também uma ferramenta de indubitável valor histórico porquanto dá a conhecer as dificuldades relativas à lei, bem como as soluções de vários autores. Além disso, o conhecimento dos problemas observacionais é indispensável para compreender o desenvolvimento posterior deste importante tema da gravitação e contestar histórias mais comuns da ciência que apresentam de um modo radical a transição entre a física newtoniana e a teoria da relatividade geral.

Abstract: This paper considers the problem of gravitation in the transition from 19th to 20th century, through the analysis of Poincaré’s course “Les limites de la loi de Newton”. Here I will only describe the main observational anomalies that put into question the inverse square law. This characterization of the limits of Newton’s law illustrates that Poincaré’s work is not only a contribution to study the problem, but also an undoubtedly useful historical tool given the scrutiny of difficulties and solutions provided by several authors that he offered in that course. Besides, the awareness of the observational problems is essential to understand the later development of such an important topic as gravitation and also to challenge common histories of science that present the transition from Newtonian to relativistic physics as a radical change.

1 Introdução

Dado o seu caráter de *força de atração à distância*, poucos conceitos foram tão problemáticos e polémicos como o de gravitação, e logo aquando da publicação dos *Principia* de Newton em 1687. O século XVIII esteve marcado pelos debates entre cartesianos e newtonianos no que diz respeito ao estatuto da

força de gravitação por um lado e, das condições de universalização da lei de Newton, pelo outro lado, de modo que pudesse garantir-se a sua aplicabilidade ao mundo estelar e não só planetário. Assim, se por um lado, se pensavam as dificuldades mecânicas de uma possível generalização da gravitação para os corpos que se encontram fora do sistema solar, por outro, os partidários e detratores de Newton e Descartes discutiam o estatuto ontológico e epistemológico de um conceito físico que, embora fosse de indubitável utilidade para dar razão dinâmica às leis de Kepler, desafiava abertamente os mais básicos pressupostos de uma descrição ortodoxamente mecânica do mundo.

Um dos principais triunfos da mecânica foi, sem dúvida, mediante a aplicação da lei de gravitação newtoniana, a explicação e predição dos fenómenos astronómicos na disciplina denominada mecânica celeste. A teoria de Newton explicava o funcionamento da gravitação sem descrever exatamente a causa da atração dos corpos, mas durante o século XIX e com o sucesso das obras de Laplace e Lagrange, a polémica que tinha existido entre newtonianos e cartesianos sobre o estatuto desta força apagou-se. Contudo, este estatuto não ficou clarificado, de forma que, após a introdução da teoria eletromagnética na qual as ações são explicadas por contiguidade, houve quem propusesse uma analogia para o tratamento de fenómenos gravitacionais. Consequentemente, no último terço do século XIX produziu-se uma proliferação de teorias gravitacionais que voltaram a questionar o estatuto desta força.

Assim, na época de Poincaré, a gravitação é um conceito polémico por várias razões. Primeiro, o caráter de ‘força de atração à distância’ é sempre problemático e desde 1850 propõem-se teorias mecânicas da gravitação que implicam a ação de um meio (ação contínua) ou a existência de partículas que transmitem a força por contato (ação descontínua). Segundo, na teoria eletromagnética de Lorentz, a de maior sucesso naquele momento, o princípio de relatividade funciona para forças de origem eletromagnética. Mas se a gravitação não for uma de elas, pode existir uma diferença entre a força eletromagnética e a gravítica, assim como nos seus respetivos campos e isto poderia pôr em perigo esse princípio. Para que a gravitação possa entrar neste esquema será preciso elaborar uma teoria de campo que modifique o seu estatuto enquanto ação à distância e que possa ser afetada pelas mesmas transformações que permitem deixar invariantes as equações de Maxwell para o campo eletromagnético (as transformações de Lorentz)¹. Ora, isto não pode ser feito sem modificar a lei de Newton. Por último, existe uma razão observacional que põe em perigo o estatuto desta lei: trata-se da existência de várias anomalias astronómicas, en-

¹Cf. Lorentz (1900), pp. 559–574.

tre as quais a mais grave é o avanço secular do periélio de Mercúrio². Naquela época foram propostas numerosas teorias para dar conta desta perturbação, das quais discutiremos as principais.

Assim, a análise dos limites da lei de Newton situa-se no ponto de intersecção de duas disciplinas: a matemática e a física. Em primeiro lugar, durante todo o século XIX, a mecânica celeste, enquanto ciência que se ocupa do cálculo das posições e movimentos dos astros, é uma disciplina puramente matemática, desenvolvida a partir do cálculo racional lagrangiano. Em segundo lugar, esta deve conjugar-se com a astronomia de posição ou observacional, disciplina mais empírica, levada a cabo nos observatórios astronómicos, e consistente na recolha de dados a partir da observação do céu e na elaboração de mapas sobre a localização dos astros. Em último lugar, qual a natureza da força de atração que governa os movimentos dos planetas é uma questão completamente física, ou seja, a compreensão da gravitação em termos de força de ação à distância ou ação por contato, assim como no que diz respeito ao seu mecanismo de transmissão (se existir), é da mesma índole daquela associada à força eletromagnética e, neste sentido, foram principalmente os físicos que trataram esta questão.

Para não alargar o presente artigo, focaremos a nossa atenção exclusivamente numa das questões assinaladas, a saber, os problemas observacionais e as possíveis soluções aos mesmos.

No seu curso *Os limites da lei de Newton*, Poincaré começa por perguntar pelo objetivo da mecânica celeste, sendo este a curto prazo «prever as posições dos astros para os astrónomos e navegadores»³. Além disso, o seu objetivo final «é resolver esta grande questão e saber se a lei de Newton explica, por si própria, todos os fenómenos astronómicos»⁴. Trata-se, definitivamente, de determinar a sua validade e campo de aplicação, para o qual é preciso examinar, em primeiro lugar, as principais divergências entre esta lei e a observação. Neste sentido, Poincaré decide não considerar algumas anomalias que afetam os pequenos planetas (planetóides) e centrar-se nos grandes planetas, em particular, aqueles que estão mais próximos do Sol. Assim, assinala o avanço do periélio de Mercúrio, do periélio de Marte e dos nodos de Vénus. Acrescenta a estas discrepâncias a aceleração secular do movimento médio da Lua e a ace-

²As perturbações seculares são aquelas alterações nas órbitas planetárias que se somam indefinidamente não dando lugar a compensações. Em contraposição a estas existem as perturbações periódicas que são aquelas que não constituem uma variação fundamental dado que são compensadas após um certo período de tempo.

³Poincaré (1953), p. 122.

⁴Poincaré (1953), p. 122.

lação do cometa de Encke⁵. Poincaré considera que os problemas mais urgentes que a teoria newtoniana não consegue explicar são o movimento do periélio de Mercúrio, a aceleração secular da Lua e a aceleração irregular do cometa de Encke. Cada um destes problemas ocupará uma secção do artigo, sendo a última a conclusão.

2 O avanço do periélio de Mercúrio

Por volta de 1850 o estado de perfeição e capacidade de previsão da mecânica celeste era tal que não se sonhava em corrigi-la. A teoria newtoniana da gravitação exigia que as órbitas dos planetas não fossem estacionárias, pois eram perturbadas por corpos vizinhos. Graças ao cálculo e ao aumento da precisão das técnicas de observação, cada desvio orbital podia ser medido com grande exatidão ou ser deduzido da teoria⁶. É deste modo que a mecânica celeste e a astronomia de posição se conjugam pois, por vezes, eram os matemáticos que proporcionavam aos astrónomos os cálculos necessários de forma que pudessem orientar os seus instrumentos na direção indicada pelas coordenadas deduzidas, como no caso da descoberta de Neptuno em 1846. Outras vezes eram as observações que guiavam os matemáticos de forma a que pudessem corrigir os seus cálculos.

Porém, este estado de perfeição viu-se ameaçado a partir de 1859 quando o diretor do Observatório de Paris, Urbain Le Verrier, publicou a descoberta do avanço anómalo do periélio de Mercúrio⁷. Efetivamente, no seu ponto mais próximo do Sol a órbita deste planeta move-se na mesma direção que este, em princípio, por causa da interação de Mercúrio com o resto dos corpos do sistema solar. Contudo, o avanço da órbita é considerado anómalo porque, mesmo tomando em conta a influência gravítica dos astros próximos, especialmente de Vénus, existe uma discrepância entre os cálculos e a observação de 38'' de arco por século. Em 1882 os cálculos de Le Verrier foram corrigidos pelo astrónomo americano Simon Newcomb aumentando o excesso de precessão do periélio de Mercúrio a quase 43'' de arco por século⁸.

Com a precisão técnica da altura, tal diferença entre o cálculo e a observação dificilmente poderia dever-se a erros observacionais⁹, pelo que eram re-

⁵Poincaré (1953), p. 124.

⁶Cf. Roseveare (1982), p. 16.

⁷Cf. Le Verrier (1859), pp. 1–195.

⁸Newcomb (1882), p. 473.

⁹Segundo Roseveare (1982), p. 21, os erros observacionais admissíveis nos meados do século XIX eram cerca de um segundo de arco na medição da posição de um planeta.

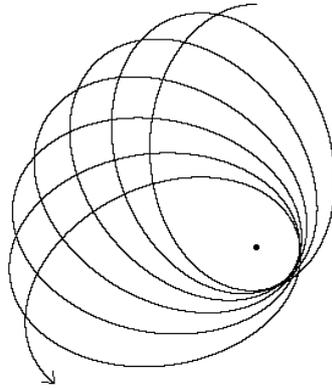


Figura 1: Desenho de órbita elíptica com precessão.

queridas explicações alternativas. Estas poderiam ser de dois tipos: ou bem tentava-se encaixar esta discrepância dentro do esquema conceptual newtoniano, ou bem era proposta uma alternativa a este esquema, ou seja, uma modificação da lei de Newton. Este é o modo em que Poincaré divide estas duas classes de explicação: newtonianas e extra-newtonianas¹⁰. No presente artigo limitar-nos-emos apenas às hipóteses que não pretendem desviar-se da mecânica newtoniana. Estamos assim perante um processo de incorporação de novos factos experimentais a uma teoria já constituída, e este é precisamente o procedimento escolhido por Le Verrier. Tomando em conta este objetivo, é preciso utilizar o esquema conceptual de que dispomos. Em primeiro lugar, contamos com a linguagem matemática adequada, ou seja, o cálculo lagrangiano que permite comparar as coordenadas calculadas com as observadas. Em segundo lugar, contamos com um princípio que se considera bem estabelecido: a lei do inverso do quadrado. Assim, Le Verrier propõe:

«Se as Tábuas [astronómicas] assim constituídas não concordam rigorosamente com o conjunto das observações, de modo nenhum estaremos tentados a acusar a insuficiência da lei de gravitação universal. Nos nossos dias, este princípio tem adquirido um grau tal de certeza que já não é permitido alterá-lo; e, se encontrarmos um fenómeno que este não explique completamente, não se pode

¹⁰Cf. Poincaré (1953), p. 124.

culpar o próprio princípio, senão alguma inexatidão na sua aplicação ou alguma causa material cuja existência nos tem escapado»¹¹.

Efetivamente, Le Verrier pensou que modificar a lei de Newton não era uma opção teórica aceitável, pelo que preferiu considerar hipóteses alternativas, tais como a possível inexatidão em alguns cálculos ou ‘uma causa material’. Tomando em conta a primeira destas duas ideias, examina a possibilidade de ampliar a massa de Vénus. Este planeta, por ser o mais próximo de Mercúrio, é o causador de grande parte das perturbações da sua órbita, pelo que um erro no cálculo da sua massa poderia ser o responsável pelas discrepâncias no avanço do periélio daquele. No entanto, para que esta alteração funcionasse, seria preciso que não produzisse perturbações adicionais noutros planetas, tais como na órbita da Terra, o que não acontece, pelo que Le Verrier abandona esta primeira opção e, de modo análogo ao que tinha sucedido nas perturbações anómalas de Urano que levaram à descoberta de Neptuno, este astrónomo considerou a hipótese de um planeta intramercurial.

A possibilidade de existir um planeta entre a órbita de Mercúrio e a do Sol tinha já sido proposta anteriormente por razões diferentes. A primeira proposta é a partir da observação de algumas protuberâncias no disco solar durante um eclipse em 1842. O astrónomo francês Jacques Babinet interpretou estas protuberâncias, as quais denominou ‘nuvens ígneas’, como massas planetárias¹², e considerou a maior delas como um planeta e as outras como planetoides. Foi Babinet quem pela primeira vez chamou Vulcano ao suposto planeta intramercurial.

Perante a possível existência de um novo corpo celeste, Le Verrier propõe-se a tarefa de calcular a sua massa de modo que possa ser responsável pela perturbação secular na órbita de Mercúrio. No entanto, o valor obtido era demasiado grande para um corpo que não tivesse sido já avistado e, dada a controvérsia no que diz respeito aos dados obtidos por Babinet que eram, em princípio, os únicos, Le Verrier afirma:

«Tais são as objeções que podemos fazer à hipótese da existência de um planeta único, comparável a Mercúrio pelas suas dimensões e circulando dentro da órbita deste último planeta. Aqueles a quem estas objeções parecerem demasiado graves, serão conduzidos a substituir este planeta único por uma série de asteroides cujas ações produzirão, em suma, o efeito total do periélio de Mercúrio»¹³.

¹¹Le Verrier (1849), p. 2.

¹²Cf. Babinet (1846), p. 282.

¹³Le Verrier (1859), p. 105.

Contudo, a história de Vulcano não termina aqui pois, posteriormente, Le Verrier teve notícia de que um astrónomo amador, Edmond Lescarbault, tinha observado tal planeta¹⁴. O diretor do observatório de Paris comprovou a fiabilidade destas observações. Após ficar satisfeito, dedicou-se à investigação da órbita de Vulcano e em 1876 publicou um estudo detalhado da mesma que predizia os futuros trânsitos¹⁵. No entanto, Vulcano não voltou a ser avistado. Embora a procura deste planeta continuasse ainda durante algum tempo, as objeções à sua existência eram numerosas, principalmente acerca do seu tamanho e falta de observação. Assim, em 1882, Félix Tisserand, sucessor de Le Verrier na direção do observatório de Paris, escreve:

«Convém assim voltar à ideia dada primeiro por Le Verrier, a saber: que existe um anel de asteroides entre Mercúrio e o Sol; as razões teóricas que militam em favor da existência deste anel não perderam nada da sua força»¹⁶.

Tanto Le Verrier como Tisserand consideraram esta hipótese como a alternativa possível a Vulcano. Contudo, manifesta algumas objeções teóricas que são apresentadas por Poincaré:

«Se o anel estivesse no plano da eclíptica, deveria alterar o movimento do nodo [de Mercúrio]; portanto, haverá que admitir que o plano do anel é o da órbita de Mercúrio aproximadamente: explicaria assim o movimento do nodo de Vénus.

Mas Newcomb considera que um anel que tenha uma tal inclinação não poderá subsistir; os elementos osciladores deste anel sofrerão perturbações que tenderão a afastá-lo do plano da órbita de Mercúrio»¹⁷.

O plano da eclíptica é o plano da órbita da Terra em torno do Sol, sendo a eclíptica a curva que descreve a trajetória solar, supondo assim que o movimento aparente do Sol é coplanar com o da órbita da terra. Portanto, se a órbita do anel estivesse situada nesse plano, significaria que seria coplanar à do nosso planeta. Mas Mercúrio não está situado nesse plano, pelo que uma cintura ou anel de matéria com a massa necessária para produzir a perturbação do perélio e localizado nessas coordenadas deveria alterar também o movimento

¹⁴Cf. Lescarbault (1860), pp. 40–45.

¹⁵Cf. Le Verrier (1876).

¹⁶Tisserand (1882), p. 771.

¹⁷Poincaré (1953), p. 147.

dos nodos de Mercúrio. No entanto, de acordo com a teoria newtoniana estes carecem de avanço anómalo. Em consequência, o anel de asteroides deve ser coplanar à órbita de Mercúrio para não produzir uma nova perturbação da qual a teoria não consiga dar conta. Contudo, Simon Newcomb encontrou uma objeção fundamental a este anel de asteroides:

«Se o plano médio do grupo [de asteroides] fosse coincidente em alguma época com o de Mercúrio, não poderia permanecer assim permanentemente, senão que os planetas de diferentes órbitas agrupar-se-iam com o tempo perto do plano invariável do sistema planetário. De novo, se a coincidência tivesse lugar com a órbita de Mercúrio, não teria lugar em relação ao plano de Vénus, e o plano do movimento desse planeta estaria sujeito à variação secular»¹⁸.

Definitivamente, o anel tenderia a situar-se no plano da eclíptica devido à influência do resto de planetas. Nesta posição perturbaria os nodos de Mercúrio, o que já sabemos que não acontece.

Após rejeitar esta opção para explicar o avanço do periélio de Mercúrio, Newcomb propõe a possibilidade de que o Sol não seja uma esfera perfeita, senão um elipsoide cujos pólos estejam ligeiramente achatados¹⁹. Esta hipótese tem duas explicações possíveis: ou bem é a própria matéria interior do Sol a responsável desta elipticidade, ou bem é devida à massa da coroa solar. Contudo, tanto Newcomb como Poincaré mostram o fracasso de ambas as conjecturas, dado que na época podia ser medida com precisão a diferença entre os raios polar e equatorial do Sol, sendo o resultado desta medida um achatamento demasiado ligeiro para dar conta dos 43 segundos de arco requeridos²⁰.

Newcomb considera ainda uma última possibilidade como causa material desta anomalia. Trata-se de uma cintura de matéria situada entre Mercúrio e Vénus. Um anel nesta posição poderia também dar conta das anomalias dos nodos de Vénus, sempre que tivesse a inclinação precisa para explicar estas e não produzisse novas perturbações nos nodos de Mercúrio. No entanto, um grupo de corpos do tamanho requerido e com a inclinação necessária, em lugar de explicar o avanço dos nodos de Vénus, produziria um movimento retrógrado dos mesmos, o que invalida esta possibilidade²¹.

Outra solução analisada por Poincaré é a hipótese da luz zodiacal. Trata-se de um fenómeno observável: consiste numa luz leve e difusa, perceptível no céu

¹⁸Newcomb (1882), p. 475.

¹⁹Cf. Newcomb (1882), p. 476.

²⁰Cf. Poincaré (1953), p. 144.

²¹Newcomb (1895), p. 117.

noturno, que parece estender-se desde o Sol até à órbita da Terra. Considerava-se que esta luz resultava de uma certa quantidade de matéria em torno do Sol. No entanto, Poincaré descartou esta hipótese:

«O efeito da luz zodiacal, que se estende para além da órbita de Mercúrio, seria assimilável ao efeito de um conjunto de anéis: a parte situada entre o afélio e o periélio de Mercúrio seria prejudicial, dado que produziria um movimento retrógrado; a outra parte seria útil. Mas encontramos as mesmas objeções que para o anel intramercurial»²².

Ou seja, considerou que a matéria responsável pela luz zodiacal ou bem se encontrava no plano da eclíptica, em cujo caso perturbaria os nodos de Mercúrio, ou bem se situava no plano da órbita deste planeta, cuja posição seria instável por causa das perturbações dos outros planetas. Contudo, em dezembro de 1906 o astrónomo diretor do observatório de Munique, Hugo von Seeliger, publicou um artigo no qual retomava a ideia da luz zodiacal como responsável tanto do avanço do periélio de Mercúrio como do dos nodos de Vénus e além disso dava conta da conhecida ‘objeção cosmológica’²³. Esta objeção relaciona-se com a aplicabilidade da lei de Newton ao conjunto do universo para além do sistema solar. E, embora não referida por Poincaré, é relevante por duas razões. A primeira é que foi uma objeção importante discutida na época, pertinente para o estado da questão astronómica que estamos a expor. A segunda tem que ver com a questão proposta por Poincaré no início do seu curso de astronomia: quais é que são os limites da lei de Newton, isto é, se é ou não aplicável ao conjunto do universo.

De acordo com a teoria newtoniana, a matéria encontra-se uniformemente distribuída no universo. Ora, se este é infinito, como se pensava na altura, então, em função da lei de gravitação universal, os corpos estariam submetidos a infinitas atrações, o que causaria, em último termo, um colapso gravitacional²⁴. Esta é a ‘objeção cosmológica’. Este problema foi assinalado por Seeliger em 1895 e levou-o a propor uma alteração à lei de Newton²⁵. Porém, em 1906 considerou que a hipótese da luz zodiacal, combinada com algumas suposições adicionais, poderia explicá-lo sem modificar a lei. Analisou a possibilidade de existirem vários anéis de matéria em diferentes pontos do sistema solar. Ao calcular as inclinações adequadas para não produzir novas anomalias, propôs em última instância a existência de dois elipsoides de pequenas

²²Poincaré (1953), p. 147.

²³Cf. Seeliger (1906), pp. 595–622.

²⁴Cf. Norton (1999), p. 307.

²⁵Cf. Seeliger (1895), pp. 129–136.

partículas matéricas, um deles no interior da órbita de Mercúrio e outro exterior a este planeta, o qual se estendia até à Terra. As provas observacionais (a existência da luz zodiacal) encaixavam com esta dupla solução.

O maior problema desta hipótese era saber se a luz zodiacal, sendo de baixa luminosidade, poderia ser causada pela quantidade de matéria requerida para dar conta das anomalias nas posições de Vénus e Mercúrio²⁶. No entanto a controvérsia desta questão não impediu o sucesso da hipótese, aliás considerada como a mais plausível nos anos anteriores ao aparecimento da teoria einsteiniana da relatividade geral²⁷.

Seeliger tentou dar resposta à objeção cosmológica em 1909, num artigo no qual analisava a aplicabilidade da teoria newtoniana a todo o universo. Para evitar o colapso gravitacional, propôs um coeficiente de absorção para a gravitação, do qual seriam responsáveis corpos mais massivos do que a Terra²⁸. Deste modo, evitava o facto de que os corpos tivessem que estar submetidos a infinitas atrações, mas ao mesmo tempo a introdução de um coeficiente de absorção implicava uma certa modificação da teoria newtoniana, embora não da própria lei do inverso do quadrado, pelo que Seeliger considerou que a sua proposta continuava dentro do esquema newtoniano.

Apesar da aceitação geral desta hipótese pelos astrónomos, Poincaré rejeitou a possibilidade de que a luz zodiacal explicasse o avanço do periélio de Mercúrio por causa da difícil inclinação do anel na posição requerida²⁹.

A última hipótese para a anomalia mercurial discutida por Poincaré é a da luz zodiacal, mas, antes de expormos os problemas relativos ao movimento da Lua, destaquemos a solução de Poincaré para o problema de Mercúrio:

«Nenhuma destas hipóteses dá conta dos fenómenos observados de uma maneira satisfatória. É preciso, portanto, retomar a hipótese de um anel que circula entre Mercúrio e Vénus e admitir que Marte é perturbado por outro anel ou pelos pequenos planetas»³⁰.

Em consequência, a hipótese que tinha sido descartada por Newcomb é a escolhida por Poincaré como a melhor explicação. A razão desta escolha é que Poincaré postulou uma opção diferente a respeito da posição da órbita deste grupo de asteroides. Em vez de se encontrar no exterior da órbita de Mercúrio, a cintura material estaria situada no mesmo plano, entrelaçada com ela e o seu

²⁶Cf. Roseveare (1982), p. 71.

²⁷Cf. Eisenstaedt (2003), p. 155.

²⁸Cf. Seeliger (1909), pp. 260–280.

²⁹Provavelmente Poincaré não conhecia a obra de Seeliger, dado que o seu curso é de 1906–1907 e o artigo de Seeliger foi publicado em dezembro de 1906.

³⁰Poincaré (1953), p. 149.

raio seria o semieixo maior da mesma e teria pouca excentricidade em relação a ela³¹. Nesta posição poderia dar conta do avanço do periélio de Mercúrio sem provocar a retrogradação dos nodos de Vénus.

3 A aceleração secular da Lua

O movimento da Lua preocupou astrónomos de todos os tempos. Em primeiro lugar, porque se trata do nosso satélite, especialmente relevante para o cálculo dos movimentos do nosso planeta. Em segundo lugar, sendo um corpo pequeno, seria difícil computar a sua órbita com exatidão, dado que não só é afetada pela influência gravítica do nosso planeta, mas também pela dos outros corpos, principalmente pelo Sol. Desde os tempos de Halley conhecia-se a existência de uma certa aceleração no movimento deste satélite, aproximadamente de doze segundos. Laplace pensou que a perturbação se devia a duas desigualdades periódicas: uma causada pelo Sol, a outra pela assimetria da Terra no equador³². No entanto, entre 1853 e 1859 o astrónomo britânico John Couch Adams manifestou um erro nos cálculos de Laplace, concluindo que as perturbações só podiam explicar a metade da aceleração lunar, faltando assim seis segundos por explicar³³. É da discussão destes seis segundos que se ocupa Poincaré.

Entre as soluções propostas, Poincaré estuda primeiro a teoria das marés de Cowell. Dado que a Lua tinha um efeito nas marés, Cowell pensou que este efeito seria significativo como causa de uma desaceleração do movimento da Terra, o qual provocaria pela sua vez um efeito sobre a Lua, sendo o seu movimento médio mais lento³⁴. Consequentemente, a anomalia é justificada a partir de uma ‘aceleração aparente’ da Lua; isto significa que o valor medido se deve à posição do observador na Terra, e dado que esta sofre uma desaceleração do seu movimento por efeito da Lua sobre as marés, então pareceria que o nosso satélite tem um movimento médio mais rápido. No entanto, esta solução não é satisfatória, porque a diminuição do movimento terrestre para obter os seis segundos requeridos de aceleração lunar deveria ser o dobro do que Cowell calculou, pelo que além de considerar o efeito das marés oceânicas seria preciso tomar em conta as marés internas do globo terrestre. Esta é precisamente a solução do matemático e astrónomo inglês George Darwin.

³¹Cf. Poincaré (1953), p. 144.

³²Cf. Roseveare (1982), p. 18.

³³Cf. Poincaré (1953), p. 149.

³⁴Poincaré (1953), p. 155.

Nos dois primeiros volumes dos seus *Scientific Papers*³⁵, Darwin realiza um estudo pormenorizado da relação entre as marés e a influência gravítica da Lua e do Sol nelas. Na altura não era fácil medir com precisão os efeitos das marés, pelo que decide combinar dois métodos para o cálculo destes. O primeiro consiste no que denomina ‘teoria do equilíbrio’, baseado na suposição de que a água na Terra teria a mesma posição em cada instante se os centros da Terra e da Lua estivessem nesse instante nas suas posições reais mas em repouso relativo³⁶. O problema deste método é que a sua aplicação é difícil por causa do efeito produzido na hora e altitude das marés pela distribuição da terra e da água no nosso planeta³⁷. Para resolver este obstáculo, Darwin utiliza um segundo método a que denomina ‘teoria corrigida do equilíbrio’, segundo o qual se trata de ter em conta essa distribuição. Para isto estabelece os limites da terra a partir das altitudes e longitudes conhecidas nos distintos portos e determina uma série de constantes que são as mesmas para um mesmo porto em todo tempo, baseando-se nas observações das marés durante um ano ou mais nesse porto. Graças a estas constantes, pode determinar aproximadamente a posição da maré³⁸.

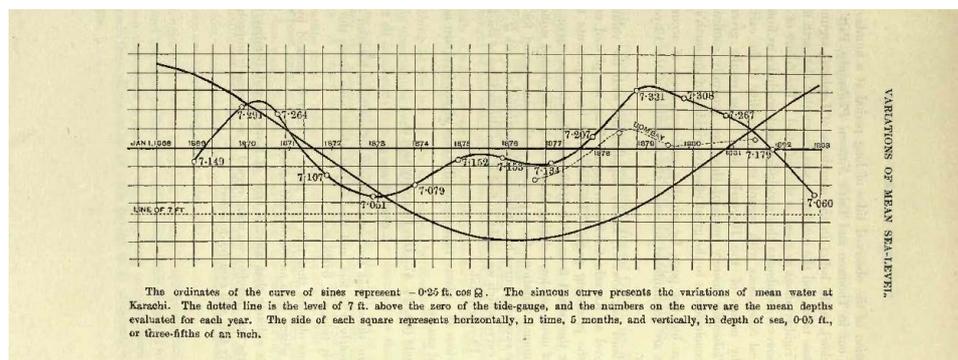


Figura 2: Variações médias do nível do mar. Cf. Darwin (1907), p. 117.

Com estes elementos determina as atrações das marés pela Lua e pelo Sol, que causam um aumento no período de rotação da Terra e também na traslação da Lua em torno da Terra. Por causa da insuficiência desta solução, postula ainda a teoria de que a Terra tem um núcleo viscoso e imperfeitamente elástico

³⁵Cf. Darwin (1907) e Darwin (1908). Estas obras são uma compilação de artigos publicados anteriormente por este autor. O primeiro é intitulado *Oceanic tides and lunar disturbance of gravity* e o segundo *Tidal friction and cosmogony*.

³⁶Cf. Darwin (1907), p. VI.

³⁷Cf. Brown (1909), p. 74.

³⁸Cf. Darwin (1908), p. VII.

com marés internas³⁹. Embora Darwin reconheça a impossibilidade de testar empiricamente esta hipótese, considera que o grau de correção dos resultados matemáticos justifica a sua plausibilidade⁴⁰.

Ainda que Poincaré julgue justificado o procedimento de Darwin, além de aceitar esta possibilidade, aponta outras duas:

«Poderíamos ainda considerar o facto de que a Terra é um íman e a Lua provavelmente também; sendo os dois corpos condutores. Quando os ímanes se movem na proximidade dos condutores, dão lugar a correntes de Foucault que jogam o papel de travões; também haveria assim uma diminuição da rotação da Terra.

Suponhamos os corpos celestes reduzidos a pontos e que não exista nenhum meio resistente; não haveria perda de energia: o princípio de Carnot não encontraria aplicação. Mas os corpos celestes não são pontos materiais, e as diferentes partes não podem agir umas sobre as outras sem perda de energia. Igualmente, se os fenómenos físicos fossem independentes da posição respetiva dos astros, também não haveria perda de energia»⁴¹.

Ou seja, Poincaré propõe uma tripla solução. Primeiro examina a ideia de Darwin de que sejam as marés (lunares e solares, externas e internas) as responsáveis pela anomalia, mas perante a impossibilidade da demonstração empírica da hipótese suplementar a respeito da viscosidade do núcleo do nosso planeta (para explicar as marés internas), estima que há outras opções. A segunda alternativa consiste em ponderar os efeitos do magnetismo terrestre e lunar na desaceleração do movimento terrestre, a qual poderia ser responsável pelo aumento aparente da velocidade da Lua. O efeito do campo magnético da Terra é difícil de computar e no momento em que Poincaré escreve não existiam ainda resultados definitivos sobre ele, pelo que a ideia de que a força magnética que interage entre a Lua e a Terra seja a responsável da anomalia no movimento médio era perfeitamente razoável⁴².

A última das opções refere a relação entre astronomia matemática e física. Na mecânica celeste, enquanto disciplina matemática, o tratamento dos corpos é em termos de pontos-massa. No entanto, isto é só uma ficção matemática e os astros são, de facto, corpos físicos, pelo que é preciso admitir que no

³⁹Cf. Poincaré (1953), p. 161.

⁴⁰Cf. Darwin (1908), p. VI

⁴¹Poincaré (1953), pp. 168–169.

⁴²Em 1910, o britânico Ernest Brown estudou este efeito em detalhe, demonstrando que era de facto insuficiente. Cf. Brown (1910), pp. 529–539.

seu movimento perdem uma certa quantidade de energia. É no cálculo desta energia que entra em jogo o princípio de Carnot ou princípio da degradação da energia, segundo o qual não é possível que um processo de intercâmbio de calor seja cíclico, isto é, manifesta a não reversibilidade dos fenómenos naturais⁴³. Considerar a teoria das marés no âmbito das perturbações lunares significa que as marés produzem uma certa fricção, que gera calor. No curso desta ação, como no de qualquer outro processo termodinâmico, ocorre uma perda de energia que supõe o aumento da entropia do universo. Esta perda poderia causar um certo arrefecimento da Terra, de forma que justificasse assim a desaceleração do seu movimento, provocando a aceleração aparente do movimento médio da Lua.

A maior parte das soluções propostas à anomalia lunar, encontrava-se dentro do esquema clássico da gravitação newtoniana. De facto, a resposta final a este problema também não se separa desta conceção: na década de 1920 foram corrigidos os dados que Darwin tinha calculado para a fricção das marés, mostrando-se assim que estas eram as responsáveis pela suposta aceleração da Lua⁴⁴. Em consequência, esta perturbação não exigia uma nova teoria da gravitação tal como era pensado pela maior parte dos especialistas.

4 O cometa de Encke

A órbita deste corpo celeste foi calculada em 1818 pelo astrónomo alemão Johann Franz Encke. Trata-se do cometa de período mais curto que se conhece: cerca de 3,3 anos. Além disso, a sua importância prende-se com o facto de a sua translação passar muito perto de Mercúrio, o que permite calcular a massa desse planeta, e também de apresentar uma aceleração secular aparentemente inexplicável, sendo assim um desafio adicional à lei do inverso do quadrado⁴⁵. O primeiro a postular uma causa para esta anomalia foi o próprio Encke, que supôs a existência de um meio de densidade variável (uma espécie de éter) que arrastava o cometa no seu movimento e produzia a inexplicável aceleração secular.

O astrónomo sueco Oskar Backlund concluiu que este meio não existia e propôs como causa do aumento da velocidade do cometa um anel de matéria com um movimento próprio situado nas proximidades do seu afélio e com um movimento tangente à sua órbita:

⁴³Cf. Poincaré (1905), p. 130.

⁴⁴Cf. Roseveare (1982), p. 4.

⁴⁵Cf. Poincaré (1953), p. 169.

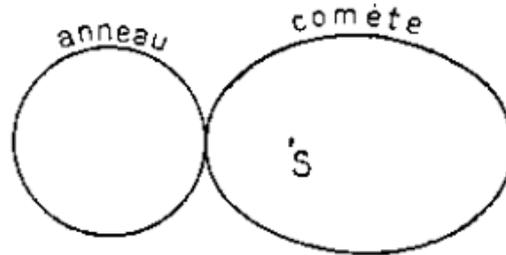


Figura 3: A solução de Backlund ao cometa de Encke, desenho de Poincaré. Cf. Poincaré (1953), p. 176, fig. 28.

Se a densidade do anel é variável, as diferenças nas acelerações do cometa poderiam ser explicadas. Para Poincaré esta solução é um tanto arbitrária por pressupor que a densidade de matéria varie com a exatidão necessária para produzir a aceleração requerida do cometa⁴⁶. Por esta razão foram apontadas outras possibilidades.

Friedrich Bessel pensou que o cometa emitia matéria em forma de projeções que provocavam a sua propulsão no sentido inverso às mesmas, sendo assim lançadas na direção contrária ao Sol, de forma que impulsionassem o cometa na sua direção⁴⁷. Uma vez mais, aos olhos de Poincaré é pouco provável que as emissões de matéria fossem responsáveis pela aceleração anómala, nessa quantidade exata.

Por último, Carl Charlier considerou que o cometa tinha um duplo núcleo e que houvesse um movimento de atração entre os dois núcleos. Isto geraria uma aceleração de um dos núcleos que puxaria o outro, causando o aumento anómalo da velocidade do cometa. Para Poincaré esta é a ideia que apresenta mais vantagens, pois o núcleo duplo poderia causar a difusão no espaço de certa quantidade de matéria, dando origem a chuvas de meteoritos ou estrelas cadentes⁴⁸.

Tal como acontecia com a anomalia lunar, todas as teorias propostas para explicar a aceleração anómala do cometa de Encke encaixavam dentro do esquema da teoria newtoniana da gravitação. Efetivamente, nenhuma destas anomalias supunha uma ameaça para a lei do inverso do quadrado:

⁴⁶Cf. Poincaré (1953), p. 176.

⁴⁷Cf. Poincaré (1953), p. 176.

⁴⁸O astrónomo Fred Whipple conseguiu explicar a anomalia do cometa de Encke a partir da sua composição: um conglomerado instável de gelo. Esta instabilidade causava, de facto, certa perda de matéria, responsável pela chuva de meteoritos conhecida como Táurides. Cf. Whipple (1940), pp. 711–745.

«Eram consideradas como anomalias sérias dentro da teoria gravitacional mais ampla, que incluía não só a lei da força central, mas também leis adicionais e hipóteses que governam a aplicação dessa lei da força às condições reais concernentes ao sistema solar»⁴⁹.

5 Conclusão

A pertinência das soluções propostas às anomalias para o estado da questão da gravitação na transição do século XIX ao XX e a preocupação de Poincaré justifica-se pelo facto de que dizem respeito às condições materiais de composição dos corpos (como o hipotético núcleo duplo do cometa de Encke), à conjunção da aceleração lunar, ou ao possível efeito de outras forças físicas conhecidas mas cuja influência era dificilmente calculável nesse momento (como no caso do magnetismo sobre o movimento da Lua). É por isto que a mais problemática de todas elas é a do periélio de Mercúrio, dado que, perante as outras, não era facilmente determinável se o erro se encontrava na própria lei do inverso do quadrado ou se, como acontecia com as outras anomalias, se devia também a hipóteses adicionais da teoria mais ampla da gravitação. De facto, a anomalia mercurial questiona a aplicabilidade da lei de Newton e, embora Poincaré proponha uma solução dentro do esquema newtoniano, não foi a adotada pelos cientistas das várias áreas (astrónomos e físicos). Mas, justamente, esta foi uma das questões que mais motivou a procura de soluções alternativas à teoria newtoniana.

Juntamente com a anomalia de Mercúrio, encontramos o sempre presente problema da causa da atração gravitacional. Estas duas preocupações fundamentais constituem o núcleo do motivo pelo qual nesses anos se propuseram numerosas teorias alternativas à newtoniana. Desde 1850 foram propostas várias teorias gravitacionais⁵⁰. Estas têm por objetivo fundamental proporcionar um suporte teórico à lei do inverso do quadrado, ou por meio da introdução de mecanismos transmissores da força, ou por meio de certos coeficientes que modificam a lei original de Newton, ou ainda, no caso de alguns cientistas muito ambiciosos, através de uma conceção generalizada segundo a qual todas as forças, incluindo a gravitação, têm uma origem eletromagnética, e,

⁴⁹Roseveare (1982), p. 4.

⁵⁰Prova disto são as obras de William Taylor “Kinetic theories of Gravitation” onde é apresentada uma lista de vinte e uma teorias (1877), de John Bernhard Stallo *The Concepts and Theories of Modern Physics* (1882), na qual se acrescentam nove à lista dada por Taylor e de Jonathan Zenneck “Gravitation” (1903), onde se discutem mais de vinte teorias.

por conseguinte, a lei do inverso do quadrado é modificada de acordo com os pressupostos da eletrodinâmica. Estas últimas tentativas foram agrupadas na denominada “visão eletromagnética da natureza”, defendida, pelo menos parcialmente, por cientistas tão prestigiados como Hendrik Lorentz⁵¹. Porém, a discussão pormenorizada de todas estas teorias está fora do âmbito deste artigo.

A existência das anomalias observacionais aqui consideradas e dos problemas teóricos brevemente apontados permite desmentir uma certa posição comum nas explicações gerais da história da ciência, da qual as seguintes afirmações são uma amostra:

«No século XIX, a doutrina da atração universal tornar-se-á um dogma da ciência. Permanecerá assim até ao aparecimento da teoria einsteiniana da gravitação»⁵².

«Em geral não havia razão teórica para prosseguir estas especulações [sobre a gravitação] até ao surgimento da teoria da relatividade»⁵³.

Efetivamente, como afirma Dugas, é durante o século XIX que a teoria newtoniana adquire um estatuto privilegiado graças à sua capacidade preditiva, principalmente por causa da precisão no cálculo das órbitas dos novos habitantes do sistema solar (novos planetas, cometas, satélites, etc.). Contudo, não é completamente certo que possua esse carácter de ‘dogma científico’, pois como mostrámos neste artigo, existiam sérios problemas que a puseram em questão, do que são prova as soluções alternativas que brevemente mencionámos. Além disso, é falso afirmar que nenhuma razão teórica justificava a modificação da teoria newtoniana, dado que o problema de considerar a gravitação como ‘atração à distância’ reapareceu com força nesse período histórico⁵⁴ e uma das principais causas para a proposta das teorias alternativas é, justamente, o estatuto epistemológico e ontológico de tal força. A outra, como também tentámos mostrar neste artigo, é a discrepância entre a teoria e a observação nos movimentos astronómicos, principalmente no que diz respeito ao avanço do periélio de Mercúrio.

⁵¹Cf. Lorentz (1900) e McCormach (1970). Nesta linha situam-se também os trabalhos prévios de Mossotti e Zöllner, cf. Renn e Schemmel (2007), p. 7.

⁵²Dugas (1950), p. 208.

⁵³Hesse (1961), p. 225.

⁵⁴Cf. de Paz (2014), pp. 262–285.

Referências

- Babinet, J., 1846. “Mémoire sur les nuages ignés du soleil considérés comme des masses planétaires”, *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris*, 22, 281–286.
- Brown, E. W., 1909. “Darwin’s scientific papers”, *Bulletin of the American Mathematical Society*, 16 (2), 73–78.
- Brown, E. W., 1910. “On the effects of certain magnetic and gravitational forces on the motion of the moon”, *American Journal of Science*, 29, 529–539.
- Darwin, G., 1907. *Scientific Papers. Vol. 1: Oceanic tides and lunar disturbance of gravity*, Cambridge, Cambridge University Press.
- Darwin, G., 1908. *Scientific Papers. Vol. 2: Tidal friction and cosmogony*, Cambridge, Cambridge University Press.
- de Paz, M., 2014. *Mecânica e Epistemologia em Henri Poincaré*, Tese de Doutorado, Universidade de Lisboa e Universidad Complutense de Madrid.
- Dugas, R., 1950. *Histoire de la mécanique*, Neuchâtel, Éditions du Griffon. (Reed. 1996, Paris, Éditions Jacques Gabay).
- Eisenstaedt, J., 2003. *The Curious History of Relativity: How Einstein’s Theory was lost and found again*, Princeton, Princeton University Press.
- Hesse, M. B., 1961. *Forces and Fields: The Concept of Action at a Distance in the History of Physics*, New York, Dover Publications.
- Lescarbault, E., 1860. “Passage d’une planète sur le disque du soleil observé à Orgères (Eure-et-Loir). Lettre à M. Le Verrier”, *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris*, 50, 40–45.
- Le Verrier, U., 1849. “Nouvelles recherches sur les mouvements des planètes”, *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris*, 29, 1–3.
- Le Verrier, U., 1859. “Théorie du mouvement de Mercure”, *Annales de l'Observatoire impérial de Paris (Mémoires)*, 5, 1–195.
- Le Verrier, U., 1876. “Examen des observations qu’on à présentées, à diverses époques, comme pouvant appartenir aux passages d’une planète intramercurielle devant le disque du soleil”, *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris*, 83, 583–589, 621–624, 647–650, 719–723.

- Lorentz, H. A., 1900. "Considerations on gravitation", *Proceedings of the Section of Sciences, Koninklijke Akademie van Wetenschappen te Amsterdam*, 2, 559–574.
- McCormmach, R., 1970. "H. A. Lorentz and the Electromagnetic view of Nature", *Isis*, 61, 459–497.
- Newcomb, S., 1882. "Discussion and results of observations on transits of Mercury from 1677 to 1881", *Astronomical Papers prepared for the use of the American Ephemeris and nautical Almanac*, 1, 367–487.
- Newcomb, S., 1895. *The elements of the four inner planets and the fundamental constants of astronomy, Supplement to the American Ephemeris and nautical Almanac*, Washington, Government Printing Office.
- Norton, J. D., 1999. "The Cosmological Woes of Newtonian Gravitation Theory", in Goenner, H., Renn, J., Ritter, J. y Sauer, T. (eds.) *The Expanding Worlds of General Relativity (Einstein Studies vol. 7)*, Boston, Basel, Berlin, Birkhäuser, 271–322.
- Poincaré, H., 1905. *La Valeur de la Science*, Paris, Flammarion. (Reed. 1970).
- Poincaré, H., 1953. "Les limites de la loi de Newton", *Bulletin astronomique*, 17, 121–178, 181–269.
- Renn, J. e Schemmel, M., 2007. "Gravitation in the Twilight of Classical Physics: An Introduction", in Renn, J. (ed.) *The Genesis of General Relativity*, vol. 3: *Gravitation in the Twilight of Classical Physics. Between Mechanics, Field Theory, and Astronomy*, Boston Studies in the Philosophy of Science, Dordrecht, Springer, 1–18.
- Roseveare, N. T., 1982. *Mercury's perihelion from Le Verrier to Einstein*, Oxford, Clarendon Press.
- Seeliger, H. von, 1895. "Über das Newton'sche Gravitationsgesetz", *Astronomische Nachrichten*, 137, 129–136.
- Seeliger, H. von, 1906. "Das Zodiaklicht und die empirischen Glieder in der Bewegung der innere Planeten", *Sitzungsberichte der Mathematisch-Naturwissenschaften Klasse der Bayerischen Akademie der Wissenschaften zu München*, 36, 595–622.

- Seeliger, H. von, 1909. “Über die Anwendung der Naturgesetze auf das Universum”, *Scientia. Rivista di scienza*, 6, pp. 225–289. Trad. fr. “Sur l’application des lois de la nature a l’univers”, supplément, 89–107.
- Stallo, J. B., 1882. *The concepts and theories of modern physics*, New York, D. Appleton and Company.
- Taylor, W. B., 1877. “Kinetic theories of gravitation”, *Annual report of the Boards of Regents of the Smithsonian Institution for the year 1876*, Washington, Government Printing Office, 205–282.
- Tisserand, F., 1882. “Notice sur les planètes intra-mercurielles”, *Annuaire du Bureau des Longitudes pour l’an 1882*, 729–772.
- Whipple, F., 1940. “Photographic Meteor Studies III. The Taurid Shower”, *Proceedings of the American Philosophical Society*, 83, 711–745.
- Zenneck, J., 1903. “Gravitation”, *Encyklopädie der mathematischen Wissenschaften*, vol. 5, Leipzig, 25–67.