

FILOSOFIA E FÍSICA. UMA OUTRA CONEXÃO

Ricardo Lopes Coelho. Universidade de Lisboa / Technische Universität Berlin

Resumen: La Filosofía puede serle útil a la Física en la solución de problemas conceptuales. El fin de este artículo es ilustrar esta tesis con la ayuda de un ejemplo: la ley de la inercia.

Abstract: Philosophy can be useful in the resolution of problems of meaning or interpretation of a physical theory. The aim of this article is to illustrate this thesis by means of an example: inertial law.

Em física pode fazer-se uma distinção, entre o que é haurido da experiência, o que provém da matemática e o que diz respeito à explicação dos fenómenos. Suposto isto, que não será aqui mostrado, compreende-se que possam surgir problemas em ciência, que não são matemáticos nem experimentais, mas decorrem das ligações estabelecidas entre as interpretações dos fenómenos, ou seja, do modo como a teoria foi construída. Em tais problemas, dos quais serão dados alguns exemplos, a filosofia pode prestar um contributo à própria ciência. Alguns deles acompanham a física há décadas ou mesmo há mais dum século.

A concepção de força constituía um problema já no século XVIII. A primeira grande crítica ao conceito data de 1743, com a publicação do *Tratado de Dinâmica* de d'Alembert. O problema mantém-se ao longo do séc. XIX, bastando lembrar L. Carnot, Mach, Kirchhoff, Hertz ou Poincaré, e chega ao século XX, como se pode constatar em French, Ludwig, Bergmann ou Schaefer. Ainda no século XIX surge uma outra questão, o que é massa. Max Jammer terminava o seu livro sobre a história do conceito assinalando, não haver solução para a questão. Nos meados do século XIX surge o conceito de energia, que nos finais do século constituía um outro problema, como o mostram Planck, Hertz ou Poincaré. Richard Feynman, cujas *Lições* percorrem o mundo universitário, frisava justamente, que apesar dos desenvolvimentos da física no século XX, não sabemos o que é energia. Físicos e filósofos viriam no séc. XX a concentrar a sua atenção numa outra questão, a interpretação da mecânica quântica.

No presente artigo ir-se-á considerar um desses problemas, a lei de inércia, a título de exemplo do contributo da filosofia na resolução de problemas conceptuais da física. Num primeiro passo será exposto o problema, num segundo é dada uma panorâmica do desenvolvimento da lei e no terceiro apresentada a solução proposta.

1. Todos nós aprendemos no liceu, e outros ainda na universidade, que um corpo livre de forças se mantém no seu estado de repouso ou de movimento uniforme e rectilíneo. Nesse contexto também nos falaram da 'inércia' dos corpos, a propriedade pela qual um corpo se mantém no seu estado de repouso ou de movimento uniforme e rectilíneo, desde que nenhuma força actue sobre ele. Acontece porém, que nunca se conseguiu realizar uma experiência com um corpo livre de forças. Ora, se se não pode

realizar uma experiência com um corpo livre de forças, então também se não sabe *de facto* como ele se move. Sendo assim, estamos a atribuir uma propriedade aos corpos, a inércia, sem nunca se ter verificado, se ela é válida. Aqui reside o problema, que os físicos têm vindo a assinalar ao longo do século XX.

2. Na História da Ciência é atribuído a Descartes a formulação da lei de inércia, como nos diz claramente Koyré¹. A primeira lei da natureza dos *Princípios de Filosofia*, de 1644, com versão francesa de 1647, diz que cada coisa se mantém no seu estado enquanto que nada a muda —no que é entendido manter a forma, o repouso ou o movimento; a segunda lei diz que os corpos tendem a mover-se rectilínea e não curvilíneamente². As duas leis em conjunto reúnem portanto os elementos da lei de inércia, manutenção do repouso e do movimento rectilíneo e uniforme³. Note-se porém, que se se interpreta a formulação cartesiana em função das consequências que o próprio autor delas haure, se verifica não coincidir o seu sentido com o da lei de inércia⁴. Contudo, como é bem conhecido da literatura, repouso e movimento são remetidos na física cartesiana a duas forças diferentes, a de repouso e a de movimento.

Nos *Princípios* de Newton, aos quais quase sempre se remete a lei de inércia, lê-se no primeiro axioma:

«Todo o corpo persevera no seu estado de repouso ou de movimento uniforme em linha recta, a menos que seja obrigado a mudar o seu estado por forças impressas»⁵.

A manutenção do repouso e movimento rectilíneo-uniforme são explicados por uma força interna aos corpos, dita força de inércia⁶; a única força interna aliás que o autor admite⁷.

Em relação a Descartes desaparecem portanto as duas forças: movimento e repouso são remetidos a uma só, a força de inércia. Ainda no século XVIII irão porém ser criticadas as forças internas aos corpos e a própria expressão 'força de inércia'.

¹ «Le plus beau titre de gloire de Descartes-physicien est, sans doute, d'avoir donné du principe d'inertie une formule «claire et distincte»; et de l'avoir mis à sa place.» (p. 161)

² Na primeira lei lê-se: «chaque chose en particulier continue d'être en même état autant qu'il se peut, & que jamais elle ne le change que par la rencontre des autres» (Parte II, § 37); e na segunda: «chaque partie de la matiere, en son particulier, ne tend jamais à continuer de se mouvoir suivant des lignes courbes, mais suivant des lignes droites» (II, § 39). No caso das leis é indiferente usar a edição latina ou a francesa. No referente às regras do choque, as consequências das leis, a francesa, ao fornecer mais indicações numéricas, permite uma análise mais precisa.

³ John Herivel, num estudo sobre as investigações em dinâmica de Newton anteriores aos *Princípios Matemáticos de Filosofia Natural*, de 1687, defende a influência de Descartes com o argumento, Newton usar nessa altura não uma única proposição, como acontecerá nos *Princípios*, mas duas, uma para o repouso e a uniformidade do movimento e outra para a rectilíneidade, tal como o houvera feito Descartes. Ele escreve: «I conclude [...] that Newton took his first known enunciation of the principle of inertia in Axioms 1 and 2 of MS. II directly from the Articles 37 and 39 of Part II of Descartes' *Principia*» (p.51).

⁴ Esta conclusão decorre dum resultado recente, a matematização das regras do choque de Descartes (Cf. Lopes Coelho, 2002).

⁵ «Corpus omne perseverare in statu suo quiescendi vel movendi uniformiter in directum, nisi quatenus illud a viribus impressis cogitur statum suum mutare» (p. 13).

⁶ «Materiae vis insita est potentia resistendi, qua corpus unumquodque, quantum in se est, perseverat in statu suo vel quiescendi vel movendi uniformiter in directum. [...] Per inertiam materiae fit, ut corpus omne de statu suo vel quiescendi vel movendi difficulter deturbetur. Unde etiam vis insita nomine significantissimo vis Inertiae dici possit» (p. 2)

⁷ «Per vim insitam intelligo solam vim inertiae.» (p. 389).

Em 1743 surge o *Tratado de Dinâmica* de d'Alembert, cujo objectivo consistia em elaborar uma teoria mecânica a partir de matéria e movimento⁸; força era para o autor um conceito problemático⁹. Forças internas aos corpos são rejeitadas, como «seres obscuros e metafísicos»¹⁰. A expressão «força de inércia» de Newton surge na obra, mas com o sentido de propriedade dos corpos¹¹.

O teor da lei de inércia é então dado em três proposições, duas leis e um corolário. Como pode concluir-se, d'Alembert apresenta como lei o que é observável e como corolário o que é haurido das observações por raciocínio¹².

A primeira das leis referidas versa a manutenção do repouso, cuja justificação diz, não haver razão para o corpo se mover mais numa direcção do que noutra, pelo que se manterá em repouso¹³. Desta lei segue-se o corolário, uma vez o corpo em movimento, não haverá razão para se mover mais na direcção do movimento do que na direcção contrária, pelo que não acelerará nem retardará, o movimento será uniforme¹⁴. A rectilidade do movimento é também apresentada como lei: não há razão para que um corpo se mova mais para a direita do que para a esquerda, pelo que se manterá na direcção inicial¹⁵.

Em 1750 surge um artigo de Euler, segundo o qual a expressão «força de inércia» é inadequada e nociva à teoria, pois, explica, o efeito da inércia consiste na conservação do mesmo estado, enquanto o da força tende a mudar o estado dos corpos, pelo que 'força de inércia' reuniria em si efeitos contrários¹⁶.

⁸ «De toutes ces réflexions, il s'ensuit que les loix de la Statique & de la Mécanique, exposées dans ce Livre, sont celles qui résultent de l'existence de la matiere & du mouvement» (p. xxviii).

⁹ «[...]jayant d'ailleurs pour but dans ce Traité de réduire la Mécanique au plus petit nombre de principes possibles [...]sans y faire entrer en aucune façon les puissances & les causes motrices» (p. 39).

¹⁰ «ainsi on ne sera point surpris qu'en conséquence de cette réflexion [...] que j'aille entièrement proscrire les forces inhérentes au Corps en Mouvement, êtres obscures & Métaphysiques, qui ne sont capables que de répandre les ténèbres sur une Science claire par elle-même» (p. xvi-xvii).

¹¹ «J'appelle avec M. Newton *force d'inertie*, la propriété qu'ont les Corps de rester dans l'état où ils sont: c'est cette propriété qu'il faut démontrer ici» (p. 3). No discurso preliminar lê-se: «La *force d'inertie*, c'est-à-dire la propriété qu'ont les Corps de persévérer dans leur état de repos ou de Mouvement, étant une fois établie [...]» (p. x).

¹² «L'expérience est d'accord avec le raisonnement pour prouver le principe de la *force d'inertie*: 1°. Nous voyons que les corps qui nous environnent restent en repos, tant que rien ne les en tire, & s'il arrive quelquefois qu'ils paroissent se mouvoir sans que nous en voyons la cause, nous avons lieu de juger par l'analogie, par l'uniformité des loix de la nature, & par l'incapacité de la matiere à se mouvoir d'elle-même, que cette cause n'en est pas moins réelle pour nous être cachée. 2°. Quoiqu'il n'y ait point de corps qui conserve éternellement son mouvement, puisqu'il y a toujours des causes qui le ralentissent peu-à-peu, comme le frottement & la résistance de l'air, cependant nous voyons qu'un corps en mouvement y persiste d'autant plus long-tems que les causes qui retardent ce mouvement sont moindres; d'où nous pouvons conclure que le *mouvement ne finiroit point, si les causes retardatrices étoient nulles*» (p. 9, § 8).

¹³ «Un Corps en repos y persistera, à moins qu'une cause étrangere ne l'en tire. Car un Corps ne peut se déterminer de lui-même au mouvement, puisqu'il n'y a pas de raison pour qu'il se meuve d'un côté plutôt que d'un autre.» (p. 4, § 3).

¹⁴ «Delà il s'ensuit, que si un Corps reçoit du mouvement par quelque cause que ce puisse être, il ne pourra de lui-même accélérer ni retarder ce mouvement.» (p. 4, § 4).

¹⁵ «il n'y a pas de raison pour que le Corps s'écarte à droite plutôt qu'à gauche.» (p. 5, § 6).

¹⁶ «A l'occasion de cette définition du terme de force, je remarque, que c'est très mal à propos, que quelques-uns nomment l'inertie la force d'inertie. Car, puisque l'effet de l'inertie consiste dans la conservation du même état, et que celui des forces tend à changer l'état des corps, il est évident que ces deux effets sont directement contraires

Lagrange, na *Mecânica analítica*, de 1788, fala do princípio da força de inércia, não no sentido de Newton, mas antes como propriedade: o movimento, diz ele, é por sua natureza uniforme e rectilíneo¹⁷.

Em Laplace, no *Tratado de Mecânica Celeste*, de 1799, a justificação da lei de inércia pode resumir-se no seguinte: não há razão num corpo para se colocar em movimento. Com efeito a ausência de razão para um corpo se mover por si numa direcção ou noutra justifica a manutenção do repouso¹⁸; a rectilíneidade é justificada pela falta de razão dum corpo para se mover mais para a direita ou para a esquerda da sua direcção inicial¹⁹. A uniformidade do movimento não é tão evidente como a rectilíneidade, diz o autor, que a justifica por uma incapacidade de o corpo provocar uma mudança no seu próprio movimento²⁰. Laplace defende ser a lei de inércia confirmada por experiência, embora para se chegar ao seu teor, seja feita uma inferência: observamos que os movimentos se perpetuam tanto mais quanto menos obstáculos existem, pelo que será de crer, diz Laplace, que sem obstáculos o movimento perdurará²¹.

Em 1803 aparecem os *Princípios fundamentais do repouso e do movimento* de Carnot. O objectivo do autor consiste em elaborar a teoria baseado no movimento, em detrimento do conceito «metafísico» de força²². O ponto de partida da teoria é constituído por sete hipóteses, a primeira das quais corresponde à lei de inércia. A justificação é feita por experiência e por raciocínio. Da experiência é haurido um caso particular e generalizado: uma bola em repouso sobre uma mesa, mantém-se em repouso, e se em movimento, conserva-se nele²³; o mesmo valerá para todos os corpos em circunstâncias análogas.

entr'eux, et que l'inertie marque plutôt une chose tout à fait opposée à l'idée des forces. Cette remarque paroît d'autant plus nécessaire, que cette dénomination si peu juste n'a pas peu contribué à brouiller la théorie des premiers principes des corps et du mouvement.» ((1750) 1752, p. 112, § 9).

¹⁷ «La théorie des mouvements variés et des forces accélératrices qui les produisent est fondée sur ces lois générales: que tout mouvement imprimé à un corps est, par sa nature, uniforme et rectiligne [...] C'est dans ces deux lois que consistent les principes connus de la force d'inertie et [...]» (Vol. I, p. 238-9).

¹⁸ «Un point en repos ne peut se donner aucun mouvement, puisqu'il ne renferme pas en lui-même de raison pour se mouvoir dans un sens plutôt que dans un autre.» (p. 14).

¹⁹ «La direction du mouvement en ligne droite, suit évidemment de ce qu'il n'y a aucune raison pour que le point s'écarte plutôt à droite qu'à gauche de sa direction primitive» (p. 14).

²⁰ «L'uniformité de son mouvement n'est pas de la même évidence. La nature de la force motrice étant inconnue, il est impossible de savoir *a priori* si cette force doit se conserver sans cesse. A la vérité, un corps étant incapable de se donner aucun mouvement à lui-même, il paroît également incapable d'altérer celui qu'il a reçu.» (p. 14).

²¹ «elle [la loi d'inertie] est d'ailleurs confirmée par l'expérience: en effet, nous observons sur la terre que les mouvemens se perpétuent plus long-temps, à mesure que les obstacles qui s'y opposent viennent à diminuer; ce qui nous porte à croire que, sans ces obstacles, ils dureroient toujours. Mais l'inertie de la matière est principalement remarquable dans les mouvemens célestes qui, depuis un grand nombre de siècles, n'ont point éprouvé d'altération sensible.» (p. 14).

²² «Il y a deux manières d'envisager la mécanique dans ses principes. La première est de la considérer *comme la théorie des forces*, c'est-à-dire des causes qui impriment les mouvemens. La seconde est de la considérer *comme la théorie des mouvemens eux-mêmes*» (p. xi); «j'ai adopté ici la seconde comme je l'avois déjà fait dans la première édition; parce que j'ai voulu éviter la notion métaphysique des forces» (p. xvi).

²³ «L'expérience prouve, que si sur une table horizontale parfaitement unie, on place une boule sans lui imprimer aucun mouvement, cette boule restera en repos jusqu'à ce qu'on vienne l'en tirer. [...] ce qui a lieu pour un globe placé sur une table horizontale, doit s'étendre à tous les corps possibles, dans toutes les positions possibles, pourvu qu'ils soient dégagés de toute influence étrangère.» (p. 51-2) Desenvolvimento análogo é dado à manutenção do movimento rectilíneo uniforme (p. 52).

A argumentação por raciocínio diz, não haver razão para que um corpo por si se mova numa qualquer direcção²⁴. (Talvez seja hoje curioso notar que os animais, elementos das máquinas de então, também estariam sujeitos à lei de inércia, segundo Carnot²⁵.)

Alguns anos mais tarde surge o *Tratado de Mecânica* de Poisson, no qual é defendida a tese, um corpo por si não se move, não há razão para que um ponto material se mova mais numa direcção do que noutra²⁶. Adiante surge a inércia da matéria, pelo que o autor entende, ser impossível que um corpo se coloque em movimento ou altere o seu movimento²⁷.

Pelo teor das argumentações percebe-se que os autores tinham como referência a experiência com os corpos circundantes, os corpos por si não mexem; e percebe-se ainda, pelos argumentos do tipo 'não há razão para', que os autores não podiam imaginar as coisas doutro modo.

Jacobi, matemático e defensor da matemática pura (Knobloch, 1995), surge com uma posição ímpar neste contexto. Nas *Lições de mecânica analítica*, do 1º semestre de 1847-48 em Berlim, defende a tese, serem as leis do movimento meras convenções do ponto de vista matemático; pelo que entende, elas não serem matematicamente demonstráveis, residindo na experiência a sua razão de ser²⁸. Tal vale naturalmente para a lei de inércia. Com efeito diz Jacobi, afirmar, 'o movimento rectilíneo é o próprio do corpo, consequentemente é para qualquer outro necessário uma acção exterior', é circular do ponto de vista matemático, pois, explica, poder-se-ia com o mesmo direito colocar um outro movimento como o da lei de inércia, sendo uma acção exterior necessária, se o corpo se não movesse desse modo²⁹.

A tese de Jacobi pode explicar-se da seguinte maneira. A lei de inércia pressupõe uma disjunção dos movimentos possíveis: entre um dado movimento, que é atribuído ao corpo, e todos os outros, que são remetidos a causas exteriores. Ora uma tal disjunção poderia ser feita com um outro movimento, a ser atribuído ao corpo, desde que os restantes fossem remetidos a causas exteriores. Para Jacobi há porém uma razão para a escolha do movimento rectilíneo e uniforme, a experiência. No final do século começará a verificar-se, que a experiência não justifica a opção.

²⁴ «à ne considérer la chose que sous le rapport du seul raisonnement, ou [on] ne voit pas pourquoi ce corps prendroit de lui-même un mouvement plutôt d'un côté que de l'autre.» (p. 51).

²⁵ «Un animal est assujéti comme les corps inanimés à la loi d'inertie» (p. 246).

²⁶ «Tous les corps sont *mobiles*; mais la matière ne se meut jamais spontanément; car il n'y aurait pas de raison pour qu'un point matériel se dirigeât plutôt d'un côté que de l'autre; et, en effet, si nous considérons un corps à l'instant où il passe de l'état de repos à l'état de mouvement, nous reconnaissons toujours que ce changement est dû à l'action d'une cause étrangère ou sans laquelle nous concevons que ce corps pourrait d'ailleurs exister.» (p. 2).

²⁷ «L'impossibilité où sont tous les points matériels de se mettre en mouvement ou de changer le mouvement qui leur a été communiqué, sans le secours d'une force, est ce qu'on entend par l'*inertie* de la matière. [...] chaque point matériel trouve [...] jamais en lui-même, le principe de son mouvement.» (p. 208-9).

²⁸ «Vom Standpunkt der reinen Mathematik aus sind diese Gesetze nicht zu beweisen, bloße Conventionen, sie sind aber so angenommen, daß sie der Natur entsprechen - daher nicht a priori darzuthun, sondern [es ist] durch Experimente die Art der Entsprechung zu zeigen.» (p. 3) (Parénteses rectos no original.)

²⁹ «Es ist vom rein mathematischen Standpunkt aus ein Cirkel, zu sagen, die geradlinige Bewegung ist die eigene, folglich ist zu jeder andern eine äußere Hinzuwirkung erforderlich: denn man könnte mit demselben Rechte jede andere Bewegung als Gesetz der Trägheit eines Körpers setzen, wenn man nur hinzufügt, wenn er sich nicht so bewegt, ist eine Außenwirkung daran Schuld.» (p. 3-4).

Na *Mecânica* de Reech, 1852, surge novamente o termo convenção com a lei de inércia, mas com um sentido diferente do de Jacobi. Reech usa o movimento rectilíneo-uniforme, mas, explica, não por se tratar do movimento natural, mas antes por mera razão de simplicidade - trata-se duma convenção, diz o autor³⁰.

Riemann, que viveu de 26 a 66 e assistiu às lições de Jacobi em 47-48, criticava a distinção newtoniana de axioma e hipótese, pois a proposição de inércia, o primeiro axioma de Newton, era para ele uma hipótese: se um ponto material, diz ele, existisse só no mundo e se movesse no espaço com uma determinada velocidade, então sim iria manter a velocidade³¹.

Riemann coloca portanto em evidência, serem irreais as condições exigidas pela lei de inércia — um corpo só no espaço. Uma justificação da lei pelo princípio de razão suficiente, como já tinha surgido, é expressamente rejeitada³².

Em 1869 C. Neumann profere a sua lição inaugural em Leipzig, intitulada *Sobre os princípios da teoria galilaico-newtoniana*. Defende então a tese, a lei de inércia não poder constituir base duma construção científica por ser «completamente incompreensível»³³. A razão era a seguinte: a lei diz que um ponto deixado a si mesmo percorre rectilíneamente espaços iguais em intervalos de tempo iguais, sem indicar o sistema espacial de referência nem como se medem os tempos. Ora, é o teor da argumentação, sem a primeira indicação a direcção do ponto fica indeterminada, pois ela difere com o sistema de referência e, no referente à medição do tempo, diz Neumann, os movimentos dos astros não nos garantem segurança suficiente³⁴.

Como solução para o problema são apresentadas cinco proposições, três princípios e duas definições. O primeiro princípio expressa uma suposição: num lugar desconhecido do universo existiria um corpo absolutamente rígido, também desconhecido³⁵, designado

³⁰ «Mais alors, il y aura une convention à faire. Il s'agira de savoir quelle sorte de mouvement, rectiligne ou curviligne, uniforme ou varié, nous devrons admettre, comme étant celui d'un point matériel entièrement libre en apparence, et parce que nous aurons une entière latitude à cet égard, ainsi que nous l'avons déjà fait pressentir dans la dernière section de la première partie, avec le seul avantage ou inconvénient d'en voir résulter de plus ou moins grandes simplifications dans les relations mécaniques des systèmes, nous serons conduits naturellement à faire servir à un tel usage l'état de mouvement rectiligne uniforme, et à rencontrer cette fameuse *loi d'inertie* de la matière, qui ne sera plus un principe ni un fait d'expérience, mais une pure convention, la plus simple de toutes celles parmi lesquelles nous nous trouverons obligés de choisir.» (p. 49). Sobre o tema ainda p. 55, 170 e 175.

³¹ «Das Trägheitsgesetz ist die Hypothese: Wenn ein materieller Punkt allein in der Welt vorhanden wäre und sich im Raum mit einer bestimmten Geschwindigkeit bewegte, so würde er diese Geschwindigkeit beständig behalten.» (p. 493).

³² «Dieses Bewegungsgesetz kann nicht aus dem Princip des zureichenden Grundes erklärt werden.» (p. 496).

³³ «Ein in Bewegung gesetzter materieller Punkt läuft, falls keine fremde Ursache auf ihn einwirkt, falls er vollständig sich selber überlassen ist, in *gerader Linie* fort, und legt in gleichen Zeiten *gleiche Wegabschnitte* zurück. - So lautet das von *Galilei* ausgesprochene Trägheitsgesetz. In dieser Fassung kann der Satz als *Grundstein* eines wissenschaftlichen Gebäudes, als *Ausgangspunkt* mathematischer Deductionen unmöglich stehen bleiben. Denn er ist vollständig *unverständlich*.» (p. 14).

³⁴ «Wir wissen ja nicht, was unter einer Bewegung in *gerader Linie* zu verstehen ist; oder wir wissen vielmehr, dass diese Worte in sehr verschiedenartiger Weise interpretiert werden können, unendlich vieler Bedeutungen fähig sind.» (p. 14). Em relação à medição do tempo lê-se: «Absurd also würde es sein, wenn wir sagen wollten: Zwei gegebene Zeitintervalle sind gleich lang, sobald beide gleich viel Sterntage, oder gleich viel Sternstunden umfassen» (p. 17-8).

³⁵ «Als *erstes Princip* der *Galilei-Newton*'schen Theorie würde daher der Satz hinzustellen sein, dass an irgend einer unbekanntem Stelle des Weltraumes ein unbekannter Körper vorhanden ist, und zwar ein *absolut starrer* Körper, ein Körper, dessen Figur und Dimensionen für alle Zeiten unveränderlich sind.» (p. 15).

por corpo alfa³⁶, que constituiria o sistema de referência universal. Segue-se a primeira definição, a de movimento: mudança de lugar em relação ao corpo alfa³⁷. Ainda em relação ao corpo alfa é postulada a rectilineidade do ponto deixado a si mesmo, o que constitui o segundo princípio³⁸. A uniformidade do movimento é estabelecida pelo terceiro princípio³⁹. Em função dele é dada a segunda definição, a de intervalos de tempo iguais: distâncias iguais em percursos de pontos deixados a si mesmos⁴⁰.

A crítica de Neumann não visa com efeito o cerne da lei: a rectilineidade e a uniformidade não são tocadas, mas sim as condições necessárias para as poder afirmar, ou seja, o sistema de referência espacial e a forma de medição do tempo.

Numa pequena brochura de 1872, sobre a conservação do trabalho, diz Mach, numa longa nota de rodapé, já se ter debatido com os mesmos problemas. Não concorda porém com a solução proposta por Neumann, pois por ela ficaria tudo como dantes, diz ele⁴¹. A posição de Mach, desenvolvida na *Mecânica*, de 1883, pode ser apresentada da seguinte maneira: a lei de inércia pressupõe um referencial; o corpo alfa ou o espaço absoluto não servem porém para o efeito, porque são meros entes conceptuais, são irreais⁴²; apenas corpos reais podem constituir um sistema de referência⁴³, na condição porém de estarem muito distantes, para evitar o efeito da aceleração recíproca⁴⁴.

A proposta de Mach visa dar um contexto físico real à lei. Ela não é porém conveniente pela seguinte razão. É exigida uma «grande distância» entre o sistema de referência e o corpo a observar, para evitar aceleração recíproca. Mas pela mesma razão seria necessário exigir também uma grande distância entre o corpo a observar e os corpos circundantes — rigorosamente seria necessário isolar o corpo a observar, o que é obviamente impossível.

³⁶ «Es mag mir gestattet sein, diesen Körper kurzweg zu bezeichnen als den Körper *Alpha*.» (p. 15).

³⁷ «Hinzufügen würde sodann sein, dass unter der *Bewegung* eines Punktes nicht etwa seine Ortsveränderung in Bezug auf Erde oder Sonne, sondern seine Ortsveränderung in Bezug auf jenen Körper Alpha zu verstehen ist.» (p. 15-6).

³⁸ «*zweites Princip*, darin bestehend, dass ein sich selbst überlassener materieller Punkt in gerader Linie fortschreitet, also in einer Bahn dahingeht, die geradlinig ist in Bezug auf jenen Körper Alpha.» (p. 16).

³⁹ O terceiro princípio é formulado na seguinte maneira: «*Zwei materielle Punkte*, von denen jeder sich selbst überlassen ist, bewegen sich in solcher Weise fort, dass gleiche Wegabschnitte des einen immer mit gleichen Wegabschnitten des andern correspondiren.» (p. 18).

⁴⁰ «In Uebereinstimmung mit dem Geiste *Galilei's* und *Newton's* [...] können wir nämlich jetzt (nachdem das dritte Princip in der angegebenen Weise festgestellt ist) *gleiche Zeitintervalle* als diejenigen definiren, innerhalb welcher ein sich selbst überlassener Punkt gleiche Wegabschnitte zurücklegt.» (p. 18).

⁴¹ «Nun muss ich noch hinzufügen, dass wenn auch die Schwierigkeiten, die ich in dem Trägheitsgesetze gefunden [habe], ganz mit jenen *Neumann's* übereinstimmen, doch meine Auflösung derselben eine andere ist. *Neumann* meint die Schwierigkeiten dadurch zu heben, dass er alle Bewegung als eine absolute betrachtete, bestimmt durch einen hypothetischen Körper *a*. Allein damit bliebe alles beim Alten.» (1872, p. 48).

⁴² «Über den absoluten Raum und die absolute Bewegung kann niemand etwas aussagen, sie sind bloße Gedankendinge, die in der Erfahrung nicht aufgezeigt werden können» (1933, p. 222-3)

O corpo alfa é dito ser uma ficção: «Ich glaube jedoch nicht, daß die Fiktion des Körpers Alpha, sowie [...] zur Klärung der Sache besonders beigetragen haben» (1933, p. 231)

⁴³ «Die Bewegung eines Körpers *K* kann immer nur beurteilt werden in bezug auf andere Körper *A*, *B*, *C*,...» (1933, p. 224).

⁴⁴ «Voneinander sehr ferne Körper, welche in bezug auf andere ferne festliegende Körper sich mit konstanter Richtung und Geschwindigkeit bewegen, ändern ihre gegenseitige Entfernung der Zeit proportional.» (1933, S. 228) No escrito de 1872 lê-se: «Sofern die Körper so weit von einander entfernt sind, dass sie sich keine merklichen Beschleunigungen ertheilen, ändern sich sämtliche Entfernungen einander proportional.» (p. 50).

O discurso inaugural de Neumann constituiu também um estímulo para um trabalho de Streintz, de 1883⁴⁵. O autor trata aí a questão, qual o sistema de referência no qual vale a lei de inércia⁴⁶. Propõe então, é a solução encontrada, o chamado «corpo fundamental», com o qual estaria ligado um sistema de coordenadas, também dito «sistema de coordenadas fundamental»⁴⁷. O corpo fundamental é caracterizado por não possuir rotação e ser independente dos corpos circundantes⁴⁸. Na nota de rodapé anexa à caracterização, lê-se porém o seguinte, o corpo fundamental constitui um ideal, que nunca poderá ser atingido na prática⁴⁹.

Se se considera a questão tratada e a solução encontrada, conclui-se o seguinte: para arranjar um sistema de referência no qual a lei de inércia fosse válida, o autor recorreu a uma representação, que não é fisicamente exequível.

Lange trabalhou intensivamente a temática e propôs também uma solução. Ele vai generalizar ao sistema espacial de referência o que Neumann tinha sugerido para o tempo, ou seja, tal como para a medição do tempo, que é unidimensional, era usado um ponto deixado a si mesmo, para a referência espacial irão ser usados três⁵⁰. Lange imagina então três pontos que são feitos partir dum mesmo lugar no espaço em diferentes direcções, não co-planares, e são deixados a si mesmos. As linhas que os ligam a um quarto ponto do espaço formam três rectas, que pensadas rígidas constituem o sistema de referência⁵¹.

Lange apresenta então uma versão da lei de inércia com uma parte espacial e uma temporal, formalmente similares, cada uma das quais incluindo uma definição e um teorema. Os teoremas expressam a rectilindade e a uniformidade do movimento; as

⁴⁵ «[...] Carl Neumann in Leipzig, durch dessen später citierten Vortrag (3. November 1869) ich die erste Anregung zu dieser Arbeit empfangen habe [...]» (S. VI).

⁴⁶ «Mit Bezug auf welchen Körper oder welches Coordinatensystem gilt das Trägheitsprincip, oder gelten die Differentialgleichungen der Bewegung eines materiellen Systemes?» (S. III).

⁴⁷ «Unter Fundamental-Coordinatensystem (FS) soll analog ein solches verstanden werden, das mit einem Fundamental-Körper in fester Verbindung ist oder in solcher gedacht werden kann.» (p. 25).

⁴⁸ «Zur Vereinfachung der Ausdrucksweise werde ich künftig einen Körper, der keine Rotation ausführt und der als vollkommen unabhängig von allen umgebenden Körpern betrachtet werden kann, als Fundamental-Körper (FK) bezeichnen.» (p. 24-5).

⁴⁹ «Es ist selbstverständlich, dass die für den Fundamentalkörper gestellte Forderung, er solle keine Rotation ausführen und keiner fremden Einwirkung unterworfen sein, nur den Idealfall bildet, der in der Praxis nicht wird erreicht werden können.» (p. 25).

⁵⁰ É Lange que se refere à analogia entre tempo e espaço: «Genau ebenso nun, wie die *eindimensionale* Inertialzeitscala definiert werden konnte an Hand *eines einzelnen* sich selbst überlassenen Punktes, so lässt sich das *dreidimensionale* Inertialsystem definiren an Hand *dreier* sich selbst überlassener Punkte.» (1885, Ueber das Beharrungsgesetz, p. 336-7).

⁵¹ Die *ideale Construction* des Inertialsystemes würde also etwa folgendermaßen auszuführen sein. Drei materielle Punkte P_1, P_2, P_3 werden gleichzeitig vom selben Raumpunkte ausgeschleudert und dann sich selbst überlassen. Sobald man sich vergewissert hat, dass sie nicht in einer geraden Linie gelegen sind, verbindet man sie einzeln mit einem *ganz beliebigen* vierten Raumpunkte Q . Die Verbindungslinien, welche bez. G_1, G_2, G_3 heißen mögen, bilden zusammen eine dreiseitige Ecke. Lässt man nun diese Ecke *in unveränderlicher Starrheit ihre Gestalt bewahren* und verfügt man über ihre Lage beständig so, dass P_1 auf der Kante G_1, P_2 auf G_2, P_3 auf G_3 stetig fortschreitet¹), so ist ein Coordinatensystem, worin die Ecke ihre Lage beibehält, ein Inertialsystem. Die drei Kanten können auch gleich selbst als Achsen eines Inertialsystemes benutzt werden, nur dürfen sie dann nicht in einer Ebene liegen.» (1885, Nochmals über ..., p. 543).

definições os respectivos sistemas: de referência espacial, o dito «sistema inercial», e de medição do tempo, a «escala inercial do tempo»⁵².

Com a sua construção pretendia Lange evitar o recurso a corpos astronómicos, razão pela qual teria recorrido a «conceitos dinâmicos», ao movimento de pontos deixados a si mesmos⁵³. Para porém poder ser dito dum ponto deixado a si mesmo, que o seu movimento é rectilíneo e uniforme, é já suposto que isso seja válido para pelo menos três pontos - eis porque o autor fala neste contexto de convenção⁵⁴. Além disso, diz-nos, não ser a lei de inércia uma proposição experimental, mas uma hipótese⁵⁵.

Para Poincaré, no 1º Congresso internacional de Filosofia, 1900, os princípios de mecânica são convenções. A razão reside na diferença entre o que é possível afirmar-se em função da experiência e o que se expressa ao colocarem-se as proposições como princípios⁵⁶. Podia dizer-se que a convencionalidade é expressão para a diferença entre a verdade lógica, que é atribuída aos princípios, e o resultado duma indução, no que consiste o seu teor. Especificamente em relação à lei de inércia Poincaré defende a tese, não se poder afirmar que um corpo não actuado por forças se mova rectilínea e uniformemente, por não ser possível retirar um corpo à acção de todas as forças⁵⁷. Esta dificuldade virá a constar nos manuais de física até ao presente.

⁵² «Definition I: »Inertialsystem« heißt ein jedes Coordinatensystem von der Beschaffenheit: dass mit Bezug darauf die in einem Punkte zusammenlaufenden stetig beschriebenen Bahnen dreier gleichzeitig von demselben Raumpunkte projectirter und dann sich selbst überlassener Punkte (die aber nicht in einer Geraden liegen sollen) sämtlich *geradlinig* sind. Theorem I: In Bezug auf ein Inertialsystem ist auch die Bahn eines jeden vierten sich selbst überlassenen Punktes *geradlinig*. Definition II. »Inertialzeitscala« heißt eine jede Zeitscala, in Bezug auf welche irgend ein sich selbst überlassener Punkt in seiner Inertialbahn *gleichförmig* bewegt ist. Theorem II. Rücksichtlich einer Inertialzeitscala ist auch jeder andere sich selbst überlassene Punkt in seiner Inertialbahn *gleichförmig* bewegt.» (Ib. S. 544-5).

⁵³ «Es drängt sich also das Bedürfniss nach einer Fassung des Trägheitsgesetzes auf, welche von den soeben angegebenen Bezugsobjecten keinen Gebrauch macht. Vielleicht wird in Jahrhunderten die Astronomie eine concrete, an die Materie gebundene Construction eines allen Anforderungen gerechten Bezugssystemes zu leisten im Stande sein. Jedenfalls aber muss ihr hier die abstracte Mechanik vorarbeiten. Und diese wird mit Recht eine Fassung des Gesetzes verlangen, welche von den Zufälligkeiten des Weltalls unabhängig ist, welche sich an kein bestimmtes Object der physischen Astronomie anlehnt, sondern vielmehr aus *rein dynamischen* Begriffen sich zusammensetzt.» (1885, Ueber die wissenschaftliche Fassung ..., p. 269).

⁵⁴ «Für drei oder weniger als drei Punkte ist die *geradlinige* Bewegung in Bezug auf ein Coordinatensystem Sache einer bloßen Convention; erst für mehr als drei Punkte ist sie mehr als Convention, ist sie Forschungsergebniss.» (1885, Nochmals über ..., p. 542).

⁵⁵ «Betrachten wir nun die Stellung des Gesetzes zu dem durch Beobachtung unmittelbar oder mittelbar gewonnenen empirischen Material, so erscheint es nicht correct, ihm den Charakter eines eigentlichen *Erfahrungssatzes* zuzusprechen. Vielmehr ist und bleibt das Trägheitsgesetz eine physikalische *Hypothese*, wenngleich sicher diejenige, welche am ersten den Anspruch auf Permanenz erheben darf.» (1885, Ueber die wissenschaftliche Fassung ..., p. 270).

⁵⁶ «Les principes de la Mécanique se présentent donc à nous sous deux aspects différents. D'une part, ce sont des vérités fondées sur l'expérience et vérifiées d'une façon très approchée en ce qui concerne des systèmes presque isolés. D'autre part, ce sont des postulats applicables à l'ensemble de l'univers et regardés comme rigoureusement vrais. Si ces postulats possèdent une généralité et une certitude qui faisaient défaut aux vérités expérimentales d'où ils sont tirés, c'est qu'ils se réduisent en dernière analyse à une simple convention que nous avons le droit de faire, parce que nous sommes certains d'avance qu'aucune expérience ne viendra la contredire.» (1901, p. 491).

⁵⁷ «Mais a-t-on jamais expérimenté sur des corps soustraits à l'action de toute force, et si on l'a fait, comment a-t-on su que ces corps n'étaient soumis à aucune force? On cite ordinairement l'exemple d'une bille roulant un temps très long sur une table de marbre; mais pourquoi disons-nous qu'elle n'est soumise à aucune force? est-ce parce qu'elle est trop éloignée de tous les autres corps pour pouvoir en éprouver aucune action sensible? Elle n'est

Na *Mecânica* de Planck, de 1916, lê-se, «a primeira questão que queremos responder é esta, como se move um ponto material, [...] quando se encontre completamente isolado, a uma distância infinita de todos os outros corpos, no espaço vazio?» Porém, acrescenta Planck, uma tal experiência não se pode realizar, podendo mesmo duvidar-se, se a questão colocada tem sentido⁵⁸.

Nielsen em 1935 expõe a lei, mas nota de imediato a dificuldade, ser impossível um teste experimental⁵⁹.

Becker em 1954 afirma novamente, ser impossível realizar uma experiência sem forças⁶⁰.

Schaefer, na sua *Introdução à Física Teórica*, uma obra em vários volumes, defende a seguinte tese:

—a inércia como propriedade dos corpos tem origem na nossa necessidade duma causa⁶¹;

—o teor da lei tem origem em considerações antropomórficas⁶².

Uma vez que o antropomorfismo não é adequado para fundar uma lei física nem é razoável atribuir propriedades à natureza para satisfazer a nossa necessidade causal, segue-se que a tese de Schaeffer coloca expressamente em questão a fundamentação da lei.

Budó, 1974, formula a lei de inércia, mas acrescenta, representar o axioma uma extrapolação da experiência, um caso limite ideal, visto não ser exequível um teste da lei⁶³.

Grimsehl, 1991, fala-nos duma propriedade inerente aos corpos, dita inércia ou capacidade de perseverança, graças à qual eles seguem a lei de inércia. Também ele defende

pas cependant plus loin de la Terre que si on la lançait librement dans l'air; et chacun sait que dans ce cas elle subirait l'influence de la pesanteur due à l'attraction de la Terre.» (1901, p. 460).

⁵⁸ «Die erste Frage, die wir beantworten wollen, ist nun die: Wie bewegt sich ein materieller Punkt, ohne Rücksicht auf seine Vorgeschichte, wenn alle etwa früher wirksamen Ursachen seiner Bewegung beseitigt sind, wenn er sich also vollkommen isoliert, in unendlicher Entfernung von allen anderen Körpern, im leeren Raume befindet? Selbstverständlich läßt sich dies Experiment nicht rein anstellen; vor allem kann man die Erde nicht beseitigen. Ja, man darf zweifeln, ob die gestellte Frage überhaupt einen Sinn hat.» (p. 8).

⁵⁹ «Da man keine Mittel hat, einen Massenpunkt jeder Wechselwirkung mit anderen Körpern zu entziehen, ist das Trägheitsgesetz für sich allein genommen keiner direkten experimentellen Kontrolle zugänglich.» (p. 194).

⁶⁰ «It is impossible to outline an experiment in which no forces are acting, since, to do so, an isolated body would be required.» (p. 24).

⁶¹ «Um dieses Verhalten der Körper, eine einmal vorhandene gleichförmige geradlinige Bewegung beizubehalten, unserem Kausalbedürfnis näher zu bringen, hat man ihnen die Eigenschaft der *Trägheit* oder des *Beharrungsvermögens* zugeschrieben, und daher nennt man den oben ausgesprochenen Satz auch das *Trägheitsgesetz*.» (p. 77).

⁶² «*Unter welchen Umständen behält in der Natur ein substantieller Punkt eine ihm erteilte Anfangsgeschwindigkeit der Größe und Richtung nach bei?* [...] Die Antwort, die man in der Mechanik seit *Galilei* darauf zu geben pflegt, ist im Grunde aus folgenden anthropomorphen Erwägungen hervorgegangen: Wir können durch Eingreifen unserer Muskeltätigkeit den Bewegungszustand eines substantiellen Punktes verändern [...]. Dies führt dazu, die Beschleunigung allgemein als Folge oder Wirkung äußerer Eingriffe anzusehen. Akzeptiert man vorläufig einmal diese Formulierung, so ist Fehlen von Beschleunigung gleichbedeutend mit dem Fehlen äußerer Einwirkungen, und somit lautet die Antwort auf die gestellte Frage: „Ein substantieller Punkt verharrt in seinem Zustande der gleichförmigen Bewegung auf geradliniger Bahn, wenn keine äußeren Einwirkungen vorhanden sind.“» (p. 76).

⁶³ «Das Axiom ist nicht etwas Selbstverständliches, sondern stellt eine Extrapolation vieler Erfahrungen für einen idealen Grenzfall dar. Es kann nicht Gegenstand einer unmittelbaren experimentellen Überprüfung sein, da ein Körper nicht vollständig jeder Einwirkung anderer Körper entzogen werden kann.» (p. 32).

a tese, ser impossível provar a lei, embora acrescente, dever valer como fundamento suficiente, serem confirmadas por experiência as consequências da lei⁶⁴.

Esta fundamentação não é porém válida, pois segundo a Lógica, se as consequências duma proposição são verdadeiras, a proposição pode ser verdadeira, mas também pode ser falsa; logo a verdade das consequências não garantem a da lei.

Alonso e Finn formulam a lei de inércia para uma partícula livre, a saber, uma partícula livre move-se com velocidade constante⁶⁵. Acrescentam porém, estritamente falando não existe uma tal coisa⁶⁶.

Aqui terá de se dizer o seguinte: se uma tal partícula não existe, não se pode naturalmente saber como ela se move.

Tipler, 1994, fala da propriedade dos corpos que designa por inércia, razão pela qual o primeiro axioma de Newton seria designado por lei de inércia⁶⁷.

A designação da lei é consonante com a da propriedade, determinante seria porém a verificação da propriedade, que é justamente a questão em aberto.

Na obra de French de 1995 é focado o problema, temos de compreender, diz-nos o autor, que a lei não pode ser examinada num teste experimental, pois nunca podemos estar seguros, que o objecto considerado esteja realmente livre de forças exteriores, como as que por exemplo objectos de grande massa exercem a grandes distâncias⁶⁸. French refere-se então não à validade da lei, mas à nossa crença na sua validade⁶⁹.

Knudsen e Hjorth, no compêndio de mecânica de 1996, referem-se ao mesmo problema: não termos experiência com corpos não sujeitos a forças externas⁷⁰.

Nolting, numa obra física em vários volumes, 2002, formula a lei para o corpo livre: um corpo livre mantém-se em repouso ou em movimento rectilíneo e uniforme⁷¹. A seguir explica-nos o que é um corpo livre⁷², ao que acrescenta, não existir um tal corpo⁷³.

⁶⁴ «Die allen Körpern innewohnende Eigenschaft, vermöge deren sie das Trägheitsgesetz befolgen, heißt die *Trägheit* oder das *Beharrungsvermögen* der Körper. Ein unmittelbarer Nachweis der Richtigkeit dieses Satzes ist unmöglich, da wir keinen Körper äußeren Einflüssen völlig entziehen können. Es muß als hinreichende Begründung gelten, daß alle aus diesem Satz gezogenen Schlußfolgerungen durch die Erfahrung bestätigt werden.» (p. 38).

⁶⁵ «*a free particle always moves with constant velocity, or (which amounts to the same thing) without acceleration.*» (p. 95)
A partícula livre é definida da seguinte maneira: «A free particle is one that is not subject to any interaction.» (p. 95).

⁶⁶ «Strictly speaking, there is no such thing, because each particle is subject to interactions with the rest of the particles in the world.» (p. 95).

⁶⁷ «Diese Eigenschaft eines Körpers, seinen Bewegungszustand beizubehalten, bezeichnet man als *Trägheit*. Deshalb wird das erste Newtonsche Axiom auch *Trägheitsgesetz* (oder *Trägheitsprinzip*) genannt.» (p. 72).

⁶⁸ «Wir müssen begreifen, daß das *Trägheitsgesetz* nicht in einem experimentellen Test 'überprüfbar' ist, weil man niemals sicher sein kann, daß das betrachtete Objekt wirklich von allen äußeren Kräften frei ist, wie sie z.B. extrem massereiche Objekte in sehr großer Entfernung ausüben.» (p. 142).

⁶⁹ «es ist eine mögliche Interpretation der beobachteten Bewegungen, und unser Glaube an seine Gültigkeit wächst mit der Zahl der Erscheinungen, die mit seiner Hilfe erfolgreich zueinander in Beziehung gebracht werden können.» (p. 142).

⁷⁰ «It is by no means simple to grasp the physical content of the law of inertia. We have (almost by definition) no experience with objects that are not subject to some external influence.» (p. 28).

⁷¹ «*Es gibt Koordinatensysteme, in denen ein kräftefreier Körper (Massenpunkt) im Zustand der Ruhe oder der geradlinig gleichförmigen Bewegung verharrt. Solche Systeme sollen Inertialsysteme heißen.*» (p. 109).

⁷² «*Ein Körper, der jeder äußeren Einwirkung entzogen ist.*» (p. 109).

⁷³ «In dieser Definition steckt eine recht gewagte, wenn auch plausible Extrapolation unserer Erfahrung. Den restlos isolierten Körper gibt es nicht.» (p. 109).

Se o corpo do qual se fala não existe, então não se move. Por isso não tem sentido falar-se do seu movimento.

3. Se se pudesse dizer aos estudantes, 'os corpos por si mantêm-se em repouso ou em movimento uniforme rectilíneo, como lhes vamos mostrar', não haveria objecção à lei de inércia. A questão reside justamente na impossibilidade de realizar uma experiência, pois daqui se segue não sabermos, se aquilo que se ensina é ou não correcto. Fazer como se fosse, causa naturalmente mal-estar, não apenas quando os estudantes colocam questões, mas muito provavelmente também na própria exposição, pois é certamente incomodativo, formular uma lei física para corpos irrealis. Passemos a considerar a proposta de solução.

A mecânica newtoniana faz uma distinção dos movimentos possíveis em dois tipos: um movimento ou é rectilíneo e uniforme ou é acelerado. Do primeiro sabemos tudo o que se precisa de saber dum movimento: a trajectória e o modo como ela é percorrida (condições iniciais são no contexto secundárias). O movimento acelerado é definido em relação àquele: pois tratando-se do movimento não-uniforme ou não-rectilíneo, é a negação lógica de 'movimento uniforme e rectilíneo'. A Mecânica diz-nos que este último é o movimento próprio ou natural dos corpos. Acontece porém, que não há fundamento para a atribuição daquele movimento aos corpos. Com efeito, como foi dito e redito durante o séc. XX não é sequer possível realizar uma experiência, que satisfaça as condições expressas na lei.

A solução proposta para a lei de inércia passa por eliminar da proposição, o que em todo o caso não pode ser afirmado, porque se desconhece, e manter a posição privilegiada do movimento na teoria, ficando salvaguardada a sua função. O movimento rectilíneo uniforme deixa de ser o movimento natural, deixa de se falar da propriedade dos corpos, da qual ele seria consequência, para passar a ser visto como o 'movimento unidade' da teoria⁷⁴.

O leitor poderá interrogar-se, se o movimento unidade como qualquer unidade é convencional. 'Convenção' e 'lei de inércia' foram ligados por vários autores ao longo da história, encontrámo-lo em Jacobi, Reech, Riemann, Poincaré. O carácter convencional do movimento rectilíneo-uniforme tornar-se-á claro, se houver uma teoria mecânica que use um outro como movimento unidade. Tal é o caso da mecânica hertziana, como iremos ver.

Em 1894 surgiram *Os Princípios de Mecânica* de H. Hertz. O autor, famoso pela descoberta das ondas electromagnéticas, elaborou nos últimos três anos de vida uma teoria mecânica, cujo o principal valor residia, segundo o próprio, na coerência lógica⁷⁵. A teoria é constituída por um único axioma, a saber, um sistema livre persiste no seu estado de repouso ou de movimento uniforme segundo a trajectória de menor curvatura.⁷⁶ A diferença entre esta proposição e a primeira lei de Newton reduz-se à introdução do

⁷⁴ A argumentação sobre a proposta de solução está exposta no livro do autor de 2001, pp. 170-205.

⁷⁵ «Was, wie ich hoffe, neu ist, und worauf ich einzig Wert lege, ist die Anordnung und Zusammenstellung des Ganzen, also die logische, oder, wenn man will, die philosophische Seite des Gegenstandes. Meine Arbeit hat ihr Ziel erreicht oder verfehlt, je nachdem in dieser Richtung etwas gewonnen ist oder nicht.» (p. XXXII) Adiante escreve: «Was zunächst die logische Zulässigkeit des entworfenen Bildes anlangt, so denke ich, daß dieselbe selbst strengen Anforderungen genügen könne, und hoffe, daß diese Meinung der Zustimmung begegnen möge. Ich lege auf diesen Vorzug der Darstellung das größte Gewicht, ja einzig Gewicht.» (p. 39).

⁷⁶ «Jedes freie System beharrt in seinem Zustande der Ruhe oder der gleichförmigen Bewegung in einer geradesten Bahn.» (§ 309).

conceito de «sistema» em vez de «corpo», pois tal tem como consequência, não ser rectilínea a trajectória descrita pelo móvel, mas «a mais recta» entre as trajectórias possíveis do sistema, a de curvatura mínima⁷⁷. Assim, a curvatura da trajectória é mínima, mas não necessariamente nula, segundo Hertz, e nula segundo Newton. Logo pode suceder, que em certos casos haja força segundo a teoria newtoniana e não exista segundo a hertziana. Ora como os físicos supunham que o movimento rectilíneo uniforme era o movimento natural dos corpos, seria de esperar que eles criticassem Hertz. Hertz previu a objecção e antecipou a resposta: a vossa objecção, dizia ele, tem razão de ser segundo a vossa maneira de pensar, mas não fora dela⁷⁸.

Para o assunto em questão vale pois que a teoria de Hertz não parte do movimento rectilíneo-uniforme, como o faz a teoria tradicional, o que tem implicações nomeadamente em relação ao conceito de força. O movimento constante na lei fundamental da mecânica hertziana é pois um outro movimento unidade.

A possibilidade de vários movimentos unidades tinha sido vislumbrada por Jacobi, numa passagem anteriormente aludida. Ele julgava porém que a experiência impunha o movimento rectilíneo-uniforme. Hertz desenvolveu a primeira teoria mecânica, logicamente cuidada, na qual o movimento unidade não é o rectilíneo-uniforme. O reconhecimento do movimento unidade, e consequentemente do rectilíneo-uniforme como o movimento unidade da teoria clássica, evita os problemas com a lei de inércia. Ao deixar de ser necessário atribuir aos corpos um movimento natural, torna-se desnecessária a experiência com o corpo livre, pelo que desaparece a dificuldade assinalada pelos físicos ao longo do séc. XX.

* * *

Índice bibliográfico

- Alembert, Jean d' (1758) *Traité de Dynamique*, 2ª ed.. Paris. (Reimpressão New York, London: Johnson Reprint Corporation, 1968)
- Alonso, Marcelo; Finn, Edward J. (1992) *Physics*. Wokingham [etc.]: Addison-Wesley.
- Becker, Robert A. (1954) *Introduction to Theoretical Mechanics*. New York, London, Toronto: McGraw-Hill.
- Budó, Ágoston (1974) *Theoretische Mechanik*. 7ª ed.. Berlin: VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften.
- Carnot, Lazare (1803) *Principes fondamentaux de l'équilibre et du mouvement*. Paris.

⁷⁷ Hertz possibilita-nos uma comparação imediata com a primeira lei de Newton, uma vez que formula a sua própria lei também em latim: «Systema omne liberum perseverare in statu suo quiescendi vel movendi uniformiter in directissimam.» (§ 309). Ora Newton escreve: «Corpus omne perseverare in statu suo quiescendi vel movendi uniformiter in directum, nisi quatenus illud a viribus impressis cogitur statum suum mutare.» (p. 54). Logo, como «nisi quatenus illud a viribus impressis cogitur statum suum mutare» corresponde ao que Hertz exprime por «liberum», a diferença reduz-se a. «Systema [...] in directissimam». «Corpus [...] in directum». Se o sistema se compõe dum único ponto material (o «corpus» de Newton), então a trajectória rectilíssima coincide com uma recta..

⁷⁸ «Viele Physiker werden zunächst der Ansicht sein, daß mit diesen Verbindungen doch schon Kräfte in die Elemente der Mechanik eingeführt und zwar in heimlicher und deshalb unerlaubter Weise eingeführt seien. Denn - so werden sie sagen - starre Verbindungen sind nicht denkbar ohne Kräfte [...] Wir antworten darauf: Euere Behauptung ist allerdings richtig für die Denkweise der gewöhnlichen Mechanik, aber sie ist nicht richtig unabhängig von dieser Denkweise». (p. 40).

- R. Descartes (1647), *Principes de la Philosophie*, (Paris, 1647) in *Oeuvres de Descartes*, vol. IX-2, ed. p. Ch. Adam e P. Tannery, Paris, 1957.
- Eddington, Arthur (1943) *The nature of the Physical World*. New York, Cambridge: Macmillan, Univ. Pr..
- Euler, Leonhard (1736) *Mechanica sive motus scientia analitice exposita*. Saint-Petersbourg.
- Euler, Leonhard ((1750) 1752) Recherches sur l'origine des forces, *Mémoires de l'académie des sciences de Berlin* 6, p. 419-447. Também in *Opera Omnia*, serie II, Vol. 5, p. 109-131.
- French, Anthony P. (1995) *Newtonsche Mechanik: eine Einführung in die klassische Mechanik*. Trad. de F. Epperlein. Berlin, New York: de Gruyter.
- Grimsehl, Ernst (1991) *Lehrbuch der Physik*, 27^a ed.. Leipzig: Teubner.
- Herivel, John W. (1965) *The Background to Newton's Principia*. Oxford: Clarendon Pr..
- Hertz, Heinrich (1894) *Die Prinzipien der Mechanik in neuem Zusammenhange dargestellt*. Leipzig: J. A. Barth.
- Jacobi, Carl Gustav J. (1847/48) *Vorlesungen über analytische Mechanik Berlin 1847/48*. Ed. p. Helmut Pulte. Braunschweig, Wiesbaden: Vieweg, 1996.
- Joos, George (1989) *Lehrbuch der theoretischen Physik*. 15^a ed.. Wiesbaden: Aula-Verl..
- Kirchhoff, Gustav (1897) *Vorlesungen über Mathematische Physik*, Vol. I *Mechanik*. 4^a ed.. Ed. p. W. Wien. Leipzig: Teubner.
- Knobloch, Eberhard; Pieper, Herbert; Pulte, Helmut (1995) ... das Wesen der reinen Mathematik verherrlichen», *Mathematische Semesterberichte* 42, 99-132.
- Knudsen, Jens M.; Hjorth, Poul G. (1996) *Elements of Newtonian Mechanics*. 2^a ed.. Berlin [etc.]: Springer.
- Koyré, Alexander (1966) *Études Galiléennes*. Paris: Hermann.
- Lagrange, Joseph-Louis de (1888-9) *Mécanique Analytique*. 4^a ed.. Paris.
- Lange, Ludwig (1885) Ueber die wissenschaftliche Fassung des Galilei'schen Beharrungsgesetzes, *Philosophische Studien* 2, 266-297.
- Lange, Ludwig (1885) Ueber das Beharrungsgesetz, *Berichte über die Verhandlungen der Königlich Sächsischen Gesellschaft der Wissenschaften zu Leipzig* 37, 333-351.
- Lange, Ludwig (1885) Nochmals über das Beharrungsgesetz, *Philosophische Studien* 2, 539-545.
- Laplace, Pierre S. (1799) *Traité de Mécanique Céleste*, Vol. I. Paris (Reimpressão Bruxelas: Culture et civilisation, 1967).
- Lopes Coelho, Ricardo (2001) *Zur Konzeption der Kraft der Mechanik*. Münster [etc.]: Waxmann
- Lopes Coelho, Ricardo (2002) Zur Physik von Descartes: Naturgesetze und Stoßregeln, *Philosophia naturalis*, 39, 45-60
- Mach, Ernst (1872) *Die Geschichte und die Wurzel des Satzes von der Erhaltung der Arbeit*. Reimpressão Leipzig: Barth, 1909.
- Mach, Ernst (1933) *Die Mechanik in ihrer Entwicklung*. 9^a ed.. Leipzig: Brockhaus.
- Neumann, Carl (1870) *Ueber die Principien der Galilei-Newtonschen Theorie*. Leipzig.
- Newton, Isaac (1726) *Isaac Newton's Philosophiae naturalis Principia Mathematica*. 3^a ed.. Ed. p. A. Koyré e I. B. Cohen, Harvard Univ. Pr., 1972.
- Nielsen, Jakob (1935) *Vorlesungen über elementare Mechanik*. Trad. de W. Fenchel. Berlin: Springer.
- Nolting, Wolfgang (2002) *Grundkurs theoretische Physik*. Vol. I. *Klassische Mechanik*, 6^a ed.. Berlin [etc.]: Springer.
- Planck, Max (1916) *Einführung in die Allgemeine Mechanik*. Leipzig: S. Hirzel.
- Poincaré, Henri (1897) Les idées de Hertz sur la mécanique, *Revue générale des Sciences* VIII, 734-743.

- Poincaré, Henri (1901) Sur les Principes de la Mécanique. 1^{er} Congrès international de Philosophie, Tome 3. Paris, p. 457-494. Reimpressão Nendeln, Liechtenstein: Kraus Reprint Limited, 1968.
- Poisson, Siméon Denis (1833) *Traité de Mécanique*. Paris: Bachelier.
- Reech, Ferdinand (1852) *Cours de Mécanique d'après la nature généralement flexible et élastique des corps*. Paris: Carilian-Goeury et V^{or} Dalmont.
- Riemann, Bernard (1876) *Bernhard Riemann's gesammelte mathematische Werke und wissenschaftlicher Nachlass*. Ed. com a colab. de R. Dedekind, H. Weber. Leipzig: Teubner.
- Schaefer, Clemens (1962) *Einführung in die Theoretische Physik*. Vol 1. 6^a ed.. Berlin: de Gruyter.
- Sears, Francis W./ Zemansky, Mark W./ Young, Hugh D. (1985). *College Physics*. 6^a ed.. Reading/Massachusetts [etc.]: Addison-Wesley.
- Sommerfeld, Arnold (1947) *Vorlesungen über theoretische Physik*. Vol. I *Mechanik*. 3^a ed.. Leipzig: Akad. Verl. Geest & Portig.
- Streintz, Heinrich (1883) *Die physikalischen Grundlagen der Mechanik*. Leipzig: Teubner.
- Tipler, Paul (1994) *Physik*. Trad. de M. Baumgartner. Heidelberg [etc.]: Spektrum Akad. Verl..
- Voigt, Woldemar (1901) *Elementare Mechanik*. Leipzig: Veit & Comp..

Ricardo Lopes Coelho
TU-Berlin TEL 12.1 Sekr.
Ernst-Reuter-Platz 7
D-10587 Berlin
Lopes.Coelho@TU-Berlin.de