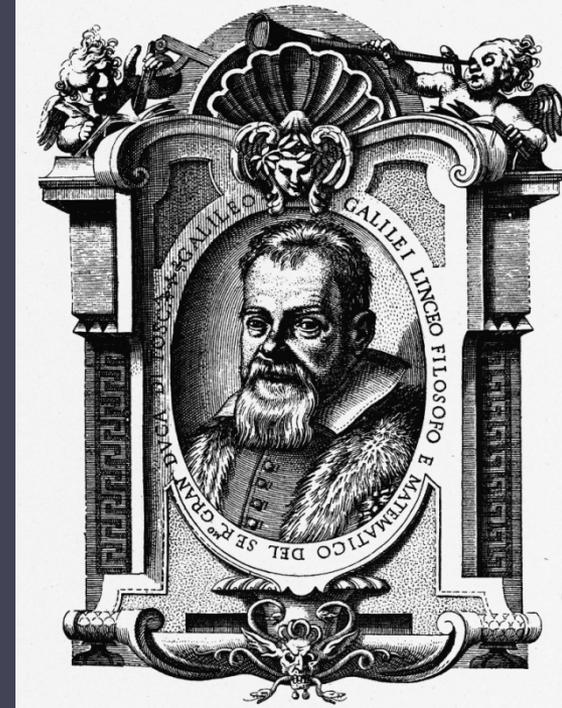


Galileu Galilei

Parte I



Filosofia e História da Ciência
Moderna

Prof. Valter A. Bezerra

Departamento de Filosofia

FFLCH-USP

Fases da vida e obra de Galileu

- Período pisano — de 1564 a 1592
- Período paduano — de 1592 a 1610
- Período polêmico — de 1610 a 1633 (a partir de 1614, em Florença)
- Período da retomada da mecânica — de 1633 a 1642

Principais obras

- *La Bilancetta* (A pequena balança), 1586
- *De Motu* (Sobre o movimento), c. 1590
- *Breve instruzione all'architettura militare*
- *Trattato di fortificazione*
- *Le Meccaniche* (As mecânicas), 1593
- *Le Operazione del Compasso Geometrico ed Militare* (As operações do compasso geométrico-militar), 1606
- *Sidereus Nuncius* (O mensageiro das estrelas), 1610
- *Discorso intorno alle cose che stanno in su l'acqua o che in quella si muovono*, 1612
- *Istoria e dimostrazioni intorno alle macchie solari* (História e demonstrações sobre as manchas solares, frequentemente referido como *Cartas sobre as manchas solares*), 1613
- *Il Saggiatore* (O Ensaíador), 1623
- *Diálogo sobre os dois grandes sistemas do mundo, ptolomaico e copernicano*, 1632
- *Discursos e demonstrações matemáticas acerca de duas novas ciências*, 1638 (referido freqüentemente como *Discorsi* ou como *Duas novas ciências*)

Censura e condenação

- **1616** — Emitida a censura, por parte da Sagrada Congregação do Índice, às “duas proposições copernicanas” — a centralidade do Sol e a mobilidade da Terra. A primeira é declarada “*stulta et absurda in philosophia*” (tola e absurda no que tange à filosofia) e “*formaliter heretica*” (formalmente herética). A segunda é também censurada como “tola e absurda *in philosophia*” e “no mínimo errônea na fé”.
- Galileu é notificado e instado a abandonar a “opinião copernicana”, e intimado a “não sustentar, ensinar ou defender *quovis modo* (de modo algum)” tal opinião.
- **1633** — Galileu é processado pelo Santo Ofício, por ter desobedecido à admoestação de 1616, obrigado a recitar publicamente e assinar a abjuração, usando vestes de penitente, e condenado à prisão domiciliar. O *Diálogo* (publicado no ano anterior) é proibido.

As observações telescópicas de Galileu



LA GACETA SIDERAL

que muestra GRANDES Y MUY ADMIRABLES maravillas e
invita a contemplarlas a todos, aunque en especial
a los Filósofos y Astrónomos, las cuales

GALILEO GALILEI

PATRICIO FLORENTINO
y matemático oficial de la Universidad paduana,
mediante el
ANTEOJO

*poco ha por él ingeniado,
ha observado en la faz de la Luna, en innumerables
fijas, en la Vía Láctea, en las estrellas nebulosas,
aunque sobre todo en*

CUATRO PLANETAS

que giran con admirable rapidez en torno a la estrella
de JÚPITER con desiguales intervalos y períodos, de los
que nadie supo hasta este día y que hace poco observó
por vez primera el autor,
DECIDIENDO LLAMARLOS

ASTROS MEDICEOS

Venecia: Tomás Baglioni, 1610

Con permiso y privilegio de la superioridad

S I D E R E V S

N V N C I V S

MAGNA, LONGEQVE ADMIRABILIA
Spectacula pandens, suspiciendaque proponens
vnicuique, præsertim verò

PHILOSOPHIS, atq; ASTRONOMIS, qua à

GALILEO GALILEO

PATRITIO FLORENTINO

Patavini Gymnasij Publico Mathematico

PERSPICILLI

*Nuper à se reperti beneficio sunt observata in LVNÆ FACIE, FIXIS IN-
NUMERIS, LACTEO CIRCVLO, STELLIS NEBVLOSIS,*

Apprime verò in

QVATVOR PLANETIS

*Circa IOVIS Stellam disparibus intervallis, atque periodis, celeri-
tate mirabili circumvolutis; quos, nemini in hanc vsque
diem cognitos, nouissimè Author depræ-
hendit primus; atque*

MEDICEA SIDERA

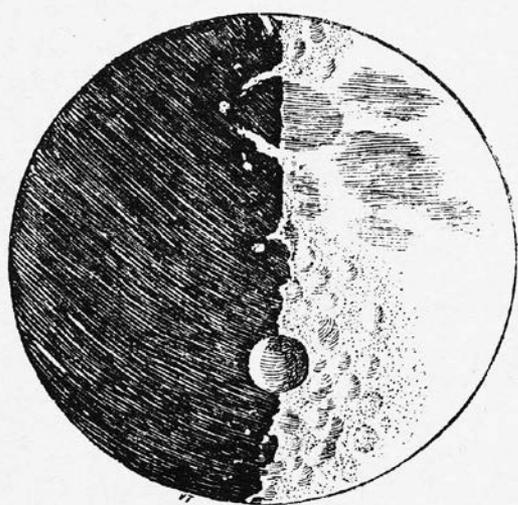
NVNCVPANDOS DECREVIT.



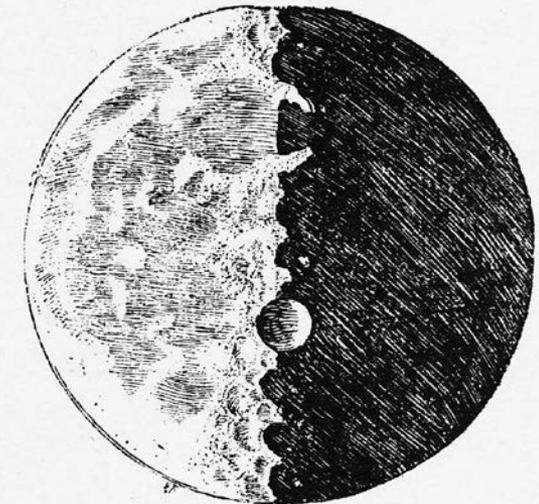
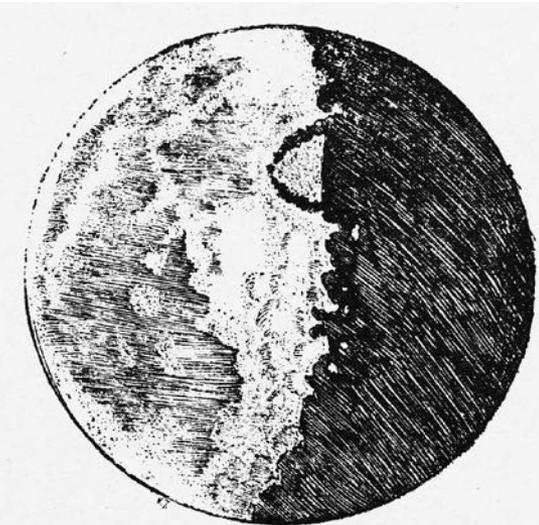
VENETIIS, Apud Thomam Baglionum. M DC X.

Superiorum Permissu, & Privilegio.

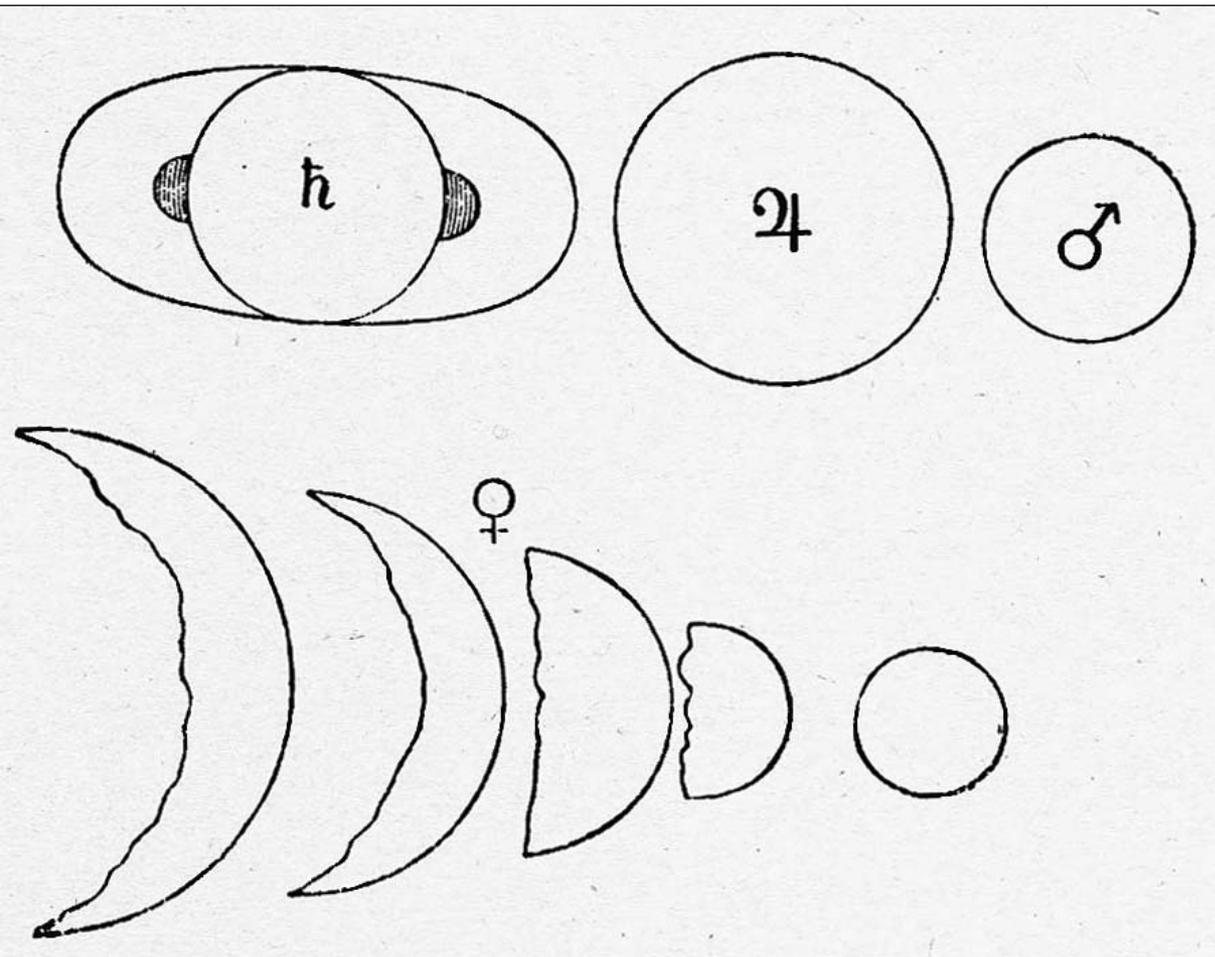
I - No *Sidereus Nuncius* (Mensageiro das estrelas, 1610)



- **(a)** Montanhas na Lua (implicando uma constituição semelhante à Terra)



I - No *Sidereus Nuncius* (Mensageiro das estrelas, 1610)



- **(b)** Fases de Vênus (inobserváveis a olho nu, o que havia preocupado Copérnico, cf. *De Revolutionibus*, I, 10)

I - No *Sidereus Nuncius* (Mensageiro das estrelas, 1610)

- **(c)** Satélites de Júpiter (chamados por Galileu “planetas mediceanos”):
- Io, Europa, Ganimedes e Calisto (hoje conhecidos como “satélites galileanos”)

OSSE^RVAZIONI

(7 GENNAIO 1610 — 29 MAGGIO 1613).

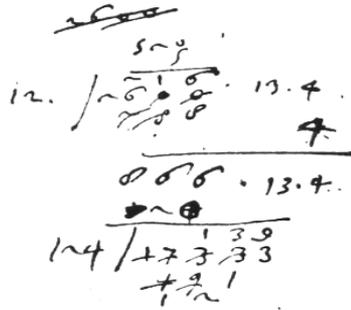
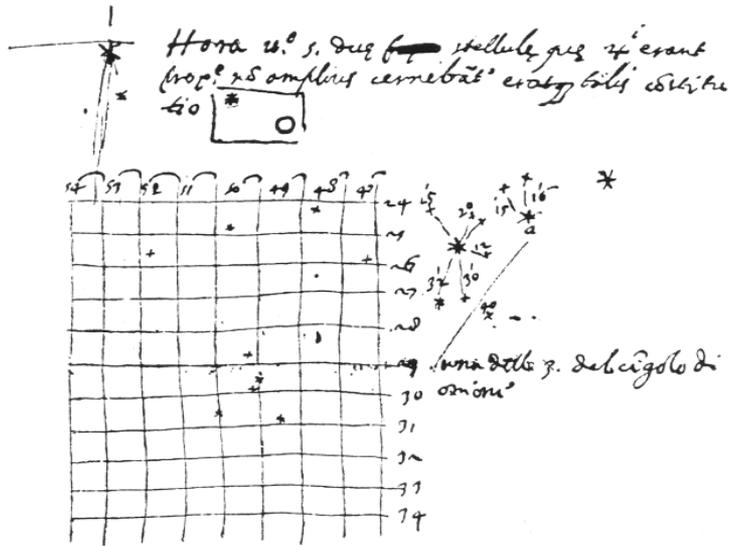
Die 20. H. 1. 15. ita se habebat Sfiguratio *O** erat 3. stellu
 a. des epigue ut uix sciri poterat, superioris sigde notitia plazq
 quadruplo maiores apparuerit a 7 et inter se ad magis distan
 bat minus uno; ~~incertus~~ incertus era nudo ex oculi libe 2. an 3.
 itally extaret. Circa H. 6. ita se habebat *O** ab erat
 orientalis stella a 7, 2. media a 7, 40. ab occidentalis
 u. 2. sm mea eximiatione. Hora u. 7. ita *O** erat
 n. 3. occidentales stelle. foss. 7. distabat ab eo. 20.
 inter fac et occidentalis erat distantia 40. ab his deflecte:
 bat paululu ad meridie alia stellula que ob occidentalis distabat
 nu amplius q 10. iuxta mea eximiatione.

Horu. ^{H. 6. 30} 3. stellule erat ex parte orientali equate ~~...~~
 inter se et a 7 distantes, erat aut interstitia in eximiatione
 ne 10. aderat et stella ex occidele a centro 7 distans. 5.
 orientalis 7. prop. erat oru minima; reliquz u. 3.
 aliquo maiores et inter se equales.

Die 21. H. 2. tibi erat * O ** 
 Sfiguratio: a stella orientali
 ad cels 7 erat 6. a centro 7. ad stella occidentalis 7.
 due intermedie distabat ad iuce 40. iter 7 et sibi prop.
 i. esse mediz stellule minores erat extremis, erat vix
 eade recta linea secundu zodiaci longitudine, nisi 7 media
 7 que 7. remotior erat, paululu declinabat ad austr

Hora 6. ita apparebat * O **
 orientalis demodu exigua
 erat distans a 7 ut antea. 3. occidentales
 et a 7 et ad iuce equate distabat, erat
 certitia figura i. prop. et stella 7.
 uicior reliquz duabz sequenti erat
 minor, erant ois exigit in eade recta
 linea

Die 23. H. 0. 40. ab occasu
 ita se habuit constite * O **
 tio; erat 3. stelle i. linea
 recta in zodiaci longitudine; orientalis di
 stabat a sequenti 7. caput ab occidenta
 li 6. 7. media tunc iter hoc obtinebat
 erat aliquatulu maior mediz; magni
 tudine front prop. equales.



circa axe preceualios
 extant stellule 7. in co
 himb. Sfiguratioe quoz
 mag. a. axe distancia
 no supat minuta 20.

Stella a. abq, quillo no ceruit, attamen
 specillo deflecta apparet tate mag. ^{rel} et
 ut infra ipsa aliz 2. 3^e et 4^e magis
 obfiscione

CONVERSACIÓN

de JUAN KEPLERO

Matemático Imperial
con

EL MENSAJERO SIDERAL
recientemente enviado a los mortales
por

GALILEO GALILEI

Matemático paduano

ALCINOUS [ALBINO]

«El que quiera filosofar ha de menester ser libre de espíritu»

Con el privilegio imperial,

EN PRAGA,

Imprenta de Daniel Sedesanus

El Año del Señor de 1610

IOANNIS KEPLERI

Mathematici Cæsarei

DISSERTATIO

Cum

NVNICIO SIDEREO

nuper ad mortales missō

à

GALILÆO GALILÆO

Mathematico Patavino.

Alcinous.

Δὲ Ἰλιουθίριον ἰναὶ ἡ γνῶμη τῆ μίλλουα φιλοσοφῶν.

Cum Privilegio Imperatorio.

P R A G Æ,

TPPIS DANIELIS SEDESANI.

Anno Domini, M. DC. X.

HISTORIA
Y DEMOSTRACIONES

EN TORNO A LAS MANCHAS SOLARES
y sus accidentes

*comprendidas en tres cartas escritas
al Ilustrísimo Señor*

MARCO VELSER, LINCEO,
Duunviro de Augsburgo,
Consejero de Su Majestad Imperial,
por el señor

GALILEO GALILEI, LINCEO,

*Noble florentino, Filósofo y Matemático Principal
del Serenísimo*

COSME II, GRAN DUQUE DE TOSCANA

EN ROMA: Giacomo Mascardi, 1613

CON LICENCIA DE LOS SUPERIORES

ISTORIA
E DIMOSTRAZIONI

INTORNO ALLE MACCHIE SOLARI
E LORO ACCIDENTI

COMPRESSE IN TRE LETTERE SCRITTE
ALL'ILLVSTRISSIMO SIGNOR

MARCO VELSERI LINCEO
DVVMVIRO D'AVGVSTA
CONSIGLIERO DI SVA MAESTA CESAREA

DAL SIGNOR

GALILEO GALILEI LINCEO

*Nobil Fiorentino, Filosofo e Matematico Primario del Sereniss.
D. COSIMO II. GRAN DVCA DI TOSCANA.*

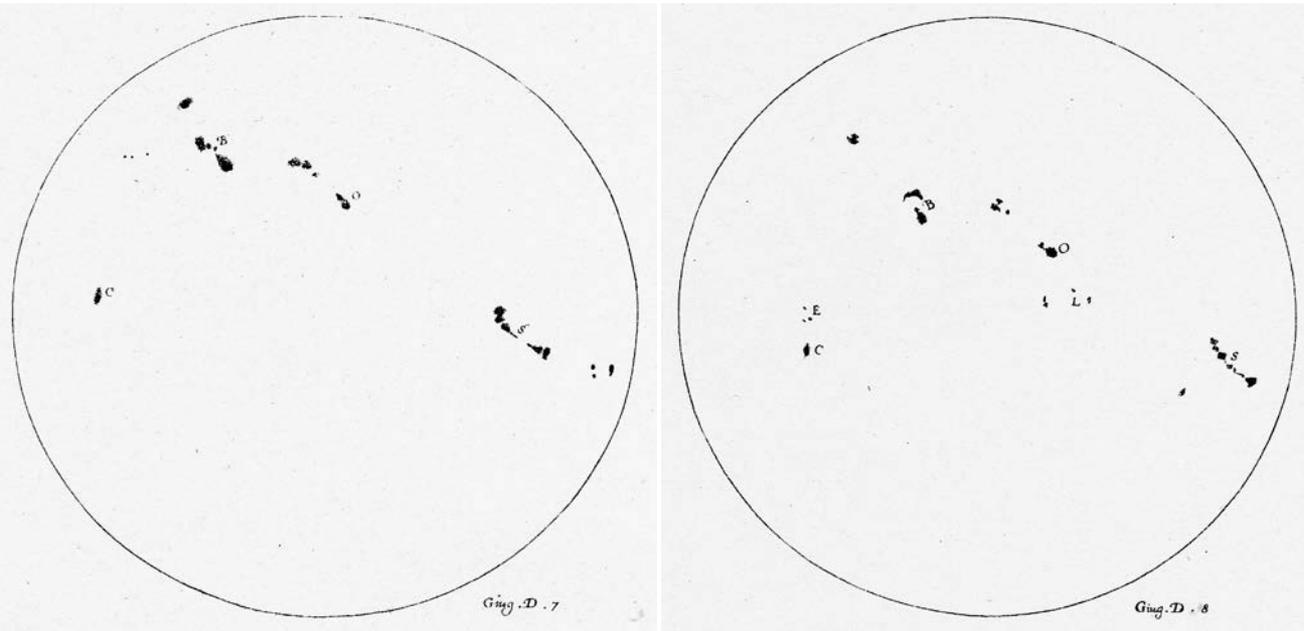


IN ROMA, Appresso Giacomo Mascardi. MDCXIII.

CON LICENZA DE SVPERIORI.

II - Na *História e demonstrações sobre as manchas solares* (1613)

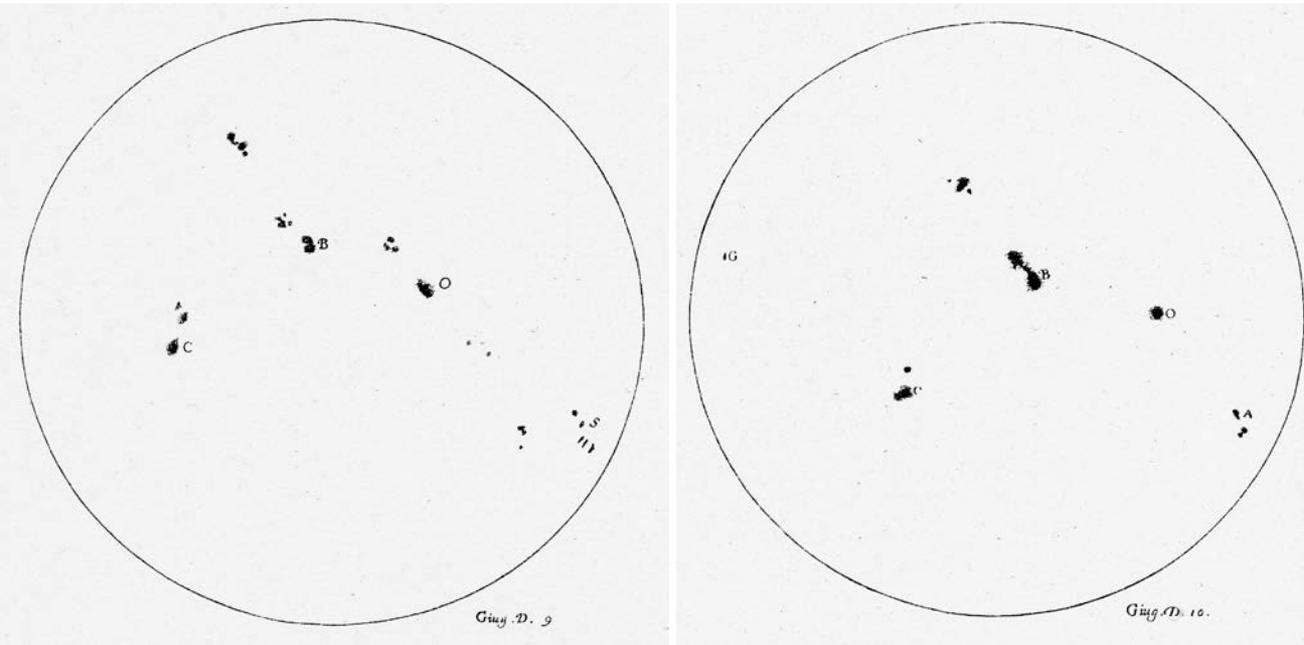
(e) Manchas solares



As observações de manchas solares têm uma rica história. Já havia relatos de observações pré-telescópicas no Ocidente na Antiguidade (como Teofrasto de Éreso, séc. IV a.C., e Virgílio, séc. I a.C.) – que eram interpretadas como fenômenos meteorológicos. Na Idade Média há relatos em uma *Vida de Carlos Magno* que refere o ano de 807, em Averróis, al-Kindi, crônicas bretãs (séc. XII), boêmias (XII) e russas (XIV) – que eram geralmente atribuídas a portentos sobrenaturais, ou a trânsitos planetários de Mercúrio e Vênus. Há crônicas chinesas registrando observações desde 165 a.C. até a Idade Média.

II - Na *História e demonstrações sobre as manchas solares* (1613)

(e) Manchas solares (cont.)



Manchas solares foram observadas telescopicamente por Johannes Fabricius (1610-1611), descritas em *De maculis in Sole observatis et apparente earum cum Sole conversione narratio* (Wittenberg, 1611) – no primeiro registro *publicado* desse tipo de observação – e por Thomas Harriott (1610-1611) – em um diário manuscrito que é o mais antigo registro *escrito* desse tipo de observação. Francis Bacon em *Descriptio Globi Intellectualis* (1612) também faz referência às manchas solares. A polêmica “tradicional” sobre a prioridade

na descoberta das manchas solares envolveu Galileu (com observações realizadas por volta de abril / maio de 1611, registradas em três cartas de 1612, publicadas em livro em 1613) e Christoph Scheiner (com observações realizadas a partir de março / abril de 1611, registradas em três cartas de novembro / dezembro de 1611, publicadas em 1612).

III - Em correspondência

(f) Estrutura “tripla” de Saturno - relatada em carta em 1610, seria observada com um círculo + uma elipse por Galileu em 1616.

Seria compreendida como um anel por Huygens, por meio de observações em outubro de 1655 – Outro anagrama foi publicado em *De Saturni observatio nova* (1656), com resolução 3 anos depois no *Systema Saturnium*.

Smaismrmilme poetaleumibunenugttauiras.

Anagrama original de Galileu, comunicado por carta.

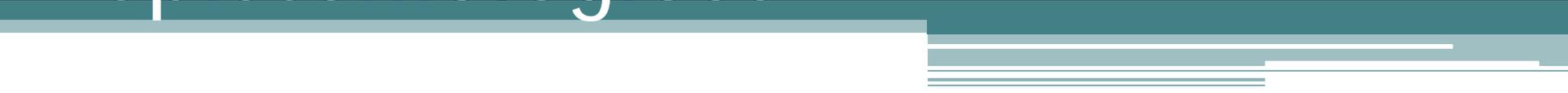
Salve umbistineum geminatum Martia proles.

Resolução proposta por Kepler na *Narratio de observatis a se quatuor Jovis satellitibus erronibus* (1610), citada no prefácio à *Dióptrica* (1611): «Salve, jóias gêmeas, filhos de Marte».

Altissimum planetam tergeminum observavi⁶

Solução divulgada por Galileu em carta a Giuliano de Medici em 13/11/1610: «Observei o planeta mais alto trigêmeo».

Certos problemas epistemológicos



Problemas associados às observações telescópicas

- No *Ensaizador*, sec. 49, Galileu discute o argumento anti-copernicano de que, em conformidade com o sistema copernicano, deveríamos observar uma diferença no diâmetro aparente de Vênus de 40 vezes entre a sua posição em conjunção e em oposição. No caso de Marte, a diferença entre os diâmetros deveria ser 60X. E no entanto observa-se uma diferença de apenas 4 ou 5X.
- Explicação de Galileu: a olho nu não se consegue estimar corretamente a variação no diâmetro aparente por causa do halo ou dos raios. Ao telescópio, esses halos / raios são quase totalmente removidos, e o disco visto com nitidez, permitindo uma estimativa correta da variação. (Galileu também salienta que, na observação das estrelas, o telescópio não aumentava apreciavelmente o diâmetro do disco, o que indica que elas se encontram a uma distância imensa.)
- Crítica à suposição de confiabilidade do telescópio como instrumento astronômico: certas estrelas aparecem duplas!
- Problemas do telescópio: (a) Problemas práticos: imperfeição de um instrumento novo; instabilidade; falta de uma montagem correta; qualidade da imagem; início do aprendizado do manejo. (b) Problemas teóricos: polêmicas em que Galileu se envolveu acerca da interpretação dos dados telescópicos.

Qualidades primárias e qualidades secundárias

Qualidades secundárias	Qualidades primárias subjacentes
Calor	«Muitas sensações, que são reputadas qualidades ínsitas nos sujeitos externos, não possuem existência a não ser em nós, não sendo outra coisa senão nome fora de nós. [Acredito] que o calor seja um fenômeno deste tipo, e que aquelas matérias que produzem e fazem perceber o calor em nós, matérias que nós chamamos com o nome geral de fogo, sejam uma multidão de pequeníssimos corpos, com determinadas figuras, movimentados com velocidade enorme. Estes pequeníssimos corpos encontram nosso corpo e o penetram com a sua maior sutileza, e o contato deles, realizado na passagem através de nossa substância e percebido por nós, resulta ser aquilo que nós chamamos calor — grato ou ingrato, segundo a multidão e a velocidade maior ou menor daqueles pequenos corpos que nos afetam e penetram. [...] Que exista, além da figura, número, movimento, penetração e junção, outra qualidade no fogo, e que esta qualidade seja o calor, eu não acredito; considero que o calor seja uma característica tão nossa que, deixando de lado o corpo animado e sensitivo, o calor torna-se simplesmente um vocábulo.» [Galileu, <i>O Ensaiador</i> , sec. 48]
Som	«Os sons, então, são produzidos e escutados por nós quando (sem outras qualidades sonoras ou trans-sonoras) um tremor frequente do ar encrespado com ondas muito pequenas movimenta a membrana de um certo tímpano, existente em nosso ouvido.» [Galileu, <i>O Ensaiador</i> , sec. 48]

Qualidades primárias e qualidades secundárias

Qualidades secundárias	Qualidades primárias subjacentes
Cheiro, sabor	«Alguns desses corpos [sólidos] separam-se continuamente em pequenas partes — umas delas, mais graves que o ar, [que] descem, e outras, mais leves, [que] sobem; e pode ser que nasçam daqui dois outros sentidos, na medida em que aquelas ferem duas partes do nosso corpo muito mais sensíveis do que a nossa pele (que não sente o contato de matérias muito sutis, ralas e moles). Aqueles pequenos corpos que descem, recebidos sobre a parte superior da língua, penetrando, misturados com sua umidade, com sua substância, geram sabores, agradáveis ou não, segundo a diversidade dos contatos das várias figuras destas pequenas partes, e conforme sejam muitos ou poucos, mais ou menos rápidos. Os outros, que sobem, entrando pelo nariz, ferem aquelas pequenas membranas que são o instrumento do olfato, e são aqui recebidos, da mesma forma, seus contatos e passagens, de nosso agrado ou não, conforme as figuras deles sejam de um modo ou de outro, e os movimentos lentos ou rápidos, e estes ínfimos, poucos ou muitos.» [Galileu, <i>O Ensaaiador</i> , sec. 48]
Cor segundo Newton	«Pois os raios, propriamente falando, não são coloridos. Não há nada neles além de uma certa potência e disposição para excitar uma sensação desta ou daquela cor.» [Newton, <i>Óptica</i>]

Qualidades primárias e qualidades secundárias

- Há uma rica e complexa tradição na história da filosofia discutindo o estatuto, o significado e as implicações da distinção entre qualidades primárias e secundárias.

Qualidades secundárias	Qualidades primárias subjacentes
Cor, sabor, calor segundo Demócrito	«Por convenção há o doce e o amargo, o quente e o frio, por convenção há a cor; porém na realidade existem os átomos e o vazio.» [Demócrito, Fragmento 9, cit. por Sexto Empírico]
Calor, cor, sabor segundo Kant	«That one could, without detracting from the actual existence of outer things, say of a great many of their predicates: they belong not to these things in themselves, but only to their appearances and have no existence of their own outside our representation, is something that was generally accepted and acknowledged long before <i>Locke's</i> time, though more commonly thereafter. To these predicates belong warmth, color, taste, etc. That I, however, even beyond these, include (for weighty reasons) also among mere appearances the remaining qualities of bodies, which are called <i>primaries</i> : extension, place, and more generally space along with everything that depends on it (impenetrability or materiality, shape, etc.), is something against which not the least ground of uncertainty can be raised; and as little as someone can be called an idealist because he wants to admit colors as properties that attach not to the object in itself, but only to the sense of vision as modifications, just as little can my system be called idealist simply because I find that even more of, <i>nay, all of the properties that make up the intuition of a body</i> belong merely to its appearance: for the existence of the thing that appears is not thereby nullified, as with real idealism, but it is only shown that through the senses we cannot cognize it at all as it is in itself.» [Kant, <i>Prolegomena to any future metaphysics</i> , § 13, Nota II, trad. G. Hatfield]

Qualidades primárias e qualidades secundárias

- Há uma rica e complexa tradição na história da filosofia discutindo o estatuto, o significado e as implicações da distinção entre qualidades primárias e secundárias.

Qualidades secundárias	Qualidades primárias subjacentes
Luz, cor, odor, sabor, som, calor, frio segundo Descartes	«Temos motivo para concluir que não temos ciência, de nenhuma maneira, de que tudo aquilo que está nos objetos – que chamamos sua luz, suas cores, seus odores, seus sabores, seus sons, seu calor ou frio, e as demais qualidades que são sentidas com o tato, e também aquilo que denominamos suas formas substanciais – seja neles outra coisa que não as diversas formas, posições, tamanhos e movimentos de suas partes, as quais encontram-se dispostas de tal modo que podem mover os nossos nervos de todas as maneiras diferentes que nos são necessárias para excitar, em nossa alma, as diversas sensações que eles nela excitam.» [Descartes, <i>Princípios da Filosofia</i> , Parte IV, CXCVIII – “Que não há nada nos corpos que possa excitar em nós nenhuma sensação, exceto o movimento, a forma, a posição e tamanho de suas partes”.] [Cf. também <i>Princípios</i> , Parte II, IV – “A natureza do corpo não consiste no peso, dureza, cor ou qualidades semelhantes, mas tão somente na extensão”.]
	Outros protagonistas do debate (além de Galileu, Newton, Demócrito, Lucrecio, Kant, Descartes...) – Boyle, Locke, Berkeley, Thomas Reid, Holbach, Condillac... ... a tradição islâmica do <i>Kālām</i> (criticada pela tradição <i>Falsafa</i> , mas empregando outra tábua de qualidades primárias: quente/frio e seco/úmido), etc... ... a metafísica das qualidades supervenientes de João Filopono, etc...
	N.B.: Note que traçar uma distinção entre qualidades primárias e secundárias <i>não remete automaticamente ao atomismo!</i>

A ciência do movimento local de Galileu



O programa de geometrização do estudo do movimento local

A filosofia encontra-se escrita neste grande livro que continuamente se abre perante nossos olhos (isto é, o universo), que não se pode compreender antes de entender a língua e conhecer os caracteres com os quais está escrito²¹. Ele está escrito em língua matemática, os caracteres são triângulos, circunferências e outras figuras geométricas, sem cujos meios é impossível entender humanamente as palavras; sem eles nós vagamos perdidos dentro de um obscuro labirinto.

Galileu Galilei - *O Ensaíador* (trad. por Helda Barraco), Seção 6, in: *Os Pensadores - Galileu*, p. 21. São Paulo: Nova Cultural, 1991.

O programa de geometrização do estudo do movimento local

Galileu precisa **construir** um domínio, um âmbito para a sua teoria geométrica do movimento local. Esse espaço para a teoria não está “dado”.

- Primeiramente, ele precisa passar a pensar o movimento como um *estado*, não como um *processo de mudança*; pois como aplicar os métodos da geometria, que se aplicam a objetos estáveis, a um objeto que se transforma? (*)
- Em segundo lugar, ele só pode considerar razões entre grandezas homogêneas; assim, ele não define, nem poderia definir, velocidade à maneira contemporânea, como $v = s/t$. Por isso Galileu sempre fala em razões entre espaços, e na sua proporcionalidade, p. ex., com razões entre tempos.
- A velocidade é considerada um “conceito primitivo” do sistema, tal como o espaço e o tempo.
- Terceiro, Galileu precisa estabelecer a plausibilidade física do movimento uniforme (a “primeira neutralização da gravidade”, no dizer de Maurice Clavelin). Ele o faz em *As mecânicas* e no *Diálogo*, 1ª. Jornada.
- Quarto, ele precisa estabelecer – o que faz na Parte 2 da Primeira Jornada dos *Discorsi* – que móveis que caem no vácuo caem com velocidades iguais (a “segunda neutralização da gravidade”).

(*) Guilherme de Ockham, nominalista, já havia sugerido que o movimento não é um ente que existe de maneira distinta do corpo. O movimento seria simplesmente a sucessão de posições (“diferentes partes do espaço”) assumidas por um corpo relativamente a outro.

Geometrização do estudo do movimento local

Plausibilidade física do movimento uniforme - Experiência de pensamento (*Diálogo sobre os dois grandes sistemas*, 1ª. Jornada, [51-53]):

- Um corpo experimenta uma tendência a acelerar se houver declive (encorajamento ao movimento), e uma tendência a desacelerar se houver acline (resistência ao movimento). 
O diagrama mostra dois triângulos azuis. O primeiro triângulo tem um ângulo de inclinação para cima à esquerda, com um círculo azul (representando um corpo) no topo da inclinação. O segundo triângulo tem um ângulo de inclinação para cima à direita, com o mesmo círculo azul no topo da inclinação.
- Considere-se agora uma superfície sem inclinação para cima ou para baixo. (Note-se que Galileu define acline e declive em relação ao centro da Terra, portanto a superfície sem inclinação seria circular, concêntrica à superfície da Terra.) Salviati leva Simplicio a concordar que, nessa superfície, estabelece-se uma situação de *indiferença* entre a tendência ao movimento e a resistência ao movimento.

Geometrização do estudo do movimento local

“O movimento pela linha horizontal, que não é declive nem aclave, é movimento circular em torno do centro: o movimento circular, portanto, nunca será adquirido naturalmente sem o precedente movimento reto, mas uma vez adquirido, ele continuará perpetuamente com velocidade uniforme”.
(*Diálogo*, 1. Jornada, [53], p. 109 trad. bras.)

Esta passagem denota a crença de Galileu em uma *inércia circular*.

(Voltaremos mais tarde à questão da inércia e do movimento circular.)

Galileu pressupõe que tanto a tendência ao movimento (no caso do declive), como a resistência ao movimento (no caso do aclave), como a indiferença ao movimento (no caso da superfície plana) são noções que podem se aplicar tanto a um corpo que estivesse inicialmente em repouso quanto a um corpo que já estivesse inicialmente dotado de algum movimento.

Geometrização do estudo do movimento local

Plausibilidade física do movimento naturalmente acelerado -

Experiência de pensamento (*Duas novas ciências [Discorsi]*, 1ª. Jornada, pp. 62-63 trad. bras.):

- **Salviati** – “[...] Já que somente um espaço totalmente vazio de ar e de qualquer outro corpo, ainda que sutil e penetrável, poderia mostrar-nos perceptivamente o que buscamos, e posto que não dispomos de semelhante espaço, observaremos o que ocorre nos meios mais sutis e menos resistentes por comparação com o que se vê acontecer nos meios menos sutis e mais resistentes. Se constatarmos efetivamente que os móveis de diferentes pesos específicos diferem cada vez menos em velocidade à medida que os meios são cada vez menos resistentes e que, finalmente, embora extremamente desiguais em peso, no meio mais tênue, ainda que não vazio, a desigualdade das velocidades é pequeníssima e quase inobservável, parece-me que podemos admitir, como conjectura altamente provável, que no vazio suas velocidades [instantâneas] seriam totalmente iguais.” (pp. 62-63)

Geometrização do estudo do movimento local

A definição de movimento acelerado em Galileu abre a possibilidade de pensar uma velocidade instantânea (i.e. ao longo de um intervalo que pode ser tão pequeno quanto se queira).

«**SOBRE O MOVIMENTO LOCAL [...] – MOVIMENTO UNIFORME**
[...] **Definição** – Entendo por movimento constante ou uniforme aquele no qual as distâncias percorridas pelo móvel em quaisquer intervalos iguais de tempo são iguais.
Precaução – Devemos acrescentar à antiga definição (que definia movimento constante simplesmente como aquele no qual distâncias iguais são percorridas em tempos iguais) a palavra “quaisquer” [*quibuscumque*], querendo dizer com isso todos os intervalos iguais de tempo; **pois pode acontecer que o móvel percorra distâncias iguais em certos intervalos iguais de tempo, e contudo as distâncias percorridas em alguma pequena porção desses intervalos de tempo não sejam iguais, mesmo que os intervalos de tempo sejam iguais. [...]**»

(Continua)

Geometrização do estudo do movimento local

(Continuação)

«MOVIMENTO NATURALMENTE ACELERADO

[...] Assim como a uniformidade do movimento é definida e concebida por meio de tempos iguais e espaços iguais (assim, dizemos que um movimento é uniforme quando distâncias iguais são percorridas em intervalos de tempo iguais), da mesma maneira podemos conceber, sem dificuldade, acréscimos de velocidade tendo lugar através de intervalos de tempo iguais; desse modo podemos conceber mentalmente um movimento como sendo uniformemente e continuamente acelerado quando, em quaisquer [*quibuscumque*] intervalos de tempo, a ele são acrescentados incrementos iguais de velocidade [*aequalia ei superaddantur celeritatis additamenta*].

[...] **Sagredo** – Parece que, por enquanto, estabelecemos a definição de movimento uniformemente acelerado, que é expressa como segue:

Um movimento é dito igualmente ou uniformemente acelerado quando, partindo do repouso, em tempos iguais lhe são acrescentados momentos de velocidade [*celeritatis momenta*] iguais.»

(*Discorsi*, 3^a. Jornada, pp. [191, 197-198, 205] da Ed. Nazionale)

Geometrização do estudo do movimento local

- **Salviati** – “[...] E (volto a repetir) minha intenção é a de declarar que a diferença de velocidade em móveis de diferentes pesos específicos não tem por causa essa diferença de peso específico, mas depende de acidentes externos e, particularmente, da resistência do meio, de modo que, eliminada esta, todos os móveis se moveriam com os mesmos graus de velocidade.” (p. 63)
- “O que expus até o presente e particularmente o que se refere à diferença de peso que, por maior que seja, não afeta em nada a diferença das velocidades dos móveis, de sorte que, por depender do peso, todos os corpos se moveriam com a mesma velocidade [instantânea], é tão novo e, à primeira vista, tão inacreditável, que se não existisse forma de elucidá-lo e torná-lo mais claro que a luz do Sol, melhor seria calar-se e não dizer nada [...]” (*Duas novas ciências*, 1^a. Jornada, p. 70 trad. bras.)
- “[...] Estimo, portanto, que existe um limite para a aceleração de todo móvel natural que parte do repouso, e que a resistência do meio acaba por reduzir sua velocidade à uniformidade, na qual deverá manter-se para sempre.” (p. 78) (*)

(*) Alberto da Saxônia já havia sugerido que a resistência do meio poderia limitar a velocidade de um corpo em queda.

Geometrização do estudo do movimento local

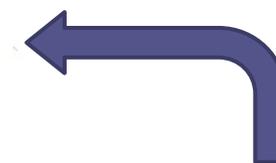
Estrutura dos *Discursos e demonstrações matemáticas sobre duas novas ciências*:

1ª. Jornada	1ª. Parte – Hipóteses sobre a coesão das partes dos corpos sólidos e resistência dos materiais (a “primeira nova ciência”)
	2ª. Parte – Ausência de relação entre a diferença de velocidade na queda livre e a gravidade dos móveis
	3ª. Parte – Teoria do som (cordas vibrantes)
2ª. Jornada	Resistência dos sólidos à fratura
3ª. Jornada	Teorias do movimento uniforme e do uniformemente acelerado, apresentadas geometricamente <ul style="list-style-type: none">• Inclui o Tratado sobre o Movimento Local (em latim)
4ª. Jornada	Movimento dos projéteis: trajetória parabólica, composição entre movimento uniforme na horizontal e uniformemente acelerado na vertical

Geometrização do estudo do movimento local

Salviati - Não me parece ser este o momento oportuno para empreender a investigação da causa da aceleração do movimento natural, a respeito da qual vários filósofos apresentaram diferentes opiniões, reduzindo-a alguns à aproximação do centro; outros, à redução progressiva das partes do meio que falta a serem atravessadas; outros ainda, a certa extrusão do meio ambiente o qual, ao fechar-se por detrás do móvel, vai pressionando e projetando o móvel continuamente. Estas fantasias, e muitas outras, conviria serem examinadas e resolvidas com pouco proveito. Por ora, é suficiente ao nosso autor que entendamos que ele quis investigar e demonstrar algumas propriedades de um movimento acelerado (qualquer que seja a causa da aceleração) de tal modo que a intensidade de sua velocidade aumenta, após ter saído do repouso, com aquela simplicíssima proporção com a qual cresce a continuação do tempo, que é o mesmo que dizer que em tempos iguais se fazem acréscimos iguais de velocidade. E se se encontrar que as propriedades que serão assim demonstradas se verificam no movimento dos graves que caem naturalmente acelerados, poderemos admitir que a definição proposta compreende tal movimento dos graves e que é verdade que a aceleração dos mesmos cresce à medida que cresce o tempo e a duração do movimento.

Galileu Galilei, *Duas novas ciências* (trad. P. R. Mariconda e L. Mariconda), 3a. Jornada, seção “Do movimento naturalmente acelerado”. São Paulo: Nova Stella / Ched / Inst. Cultural Ítalo-Brasileiro, s/d, p. 131.



Passagens como estas poderiam ser tomadas, à primeira vista, como indicação de que Galileu “não leva em conta as **causas** do movimento” ou “não se interessa” por elas, e estaria desenvolvendo “apenas uma cinemática”, uma **descrição** do movimento.

Geometrização do estudo do movimento local

Mas...

Salviati – “Afirmo que um corpo pesado **possui por natureza um princípio intrínseco** para mover-se em direção ao centro comum dos graves, isto é, nosso globo terrestre, com um movimento uniformemente acelerado, e sempre igualmente acelerado, ou seja, que em tempos iguais se fazem acréscimos iguais de novos momentos e graus de velocidade.”

(*Duas novas ciências*, 1^a. Jornada, p. 64 trad. bras., ênfase minha)

“Chamemos, portanto, *gravidade* àquela **propensão** de mover-se **naturalmente** para baixo, a qual se encontra causada, nos corpos sólidos, pela maior ou menor quantidade (*copia*) de matéria, da qual são constituídos.”

(Galileu, *As mecânicas*, *Sci. Stud.* 6(4)2008, p. 610, ênfase minha)

Geometrização do estudo do movimento local

- Galileu não abandonou a sua convicção original (presente desde o *De Motu*) de que a gravidade é a *causa* do movimento.
- Na sua teoria do movimento local, ele *contorna*, porém não *nega*, a tese da gravidade como causa da aceleração, limitando-se às propriedades do movimento.
- William Shea afirma que Galileu teria “desistido” de investigar a causa da aceleração “somente porque não conseguiu identificá-la satisfatoriamente”.
- A propósito, a ciência do movimento de Galileu também não é “meramente descritiva” no sentido de que ele busca consistentemente compreender a *natureza*, a *essência* do movimento.
- Galileu também se envolve com aspectos dinâmicos: (a) por negação, ao rejeitar a antiperístase aristotélica e as teorias medievais do *impetus*, dando soluções diferentes aos problemas do lançamento vertical, do lançamento de projéteis, etc; (b) por assumir um princípio de inércia (conservação do movimento). Cf. os slides *Galileu – Parte II*.

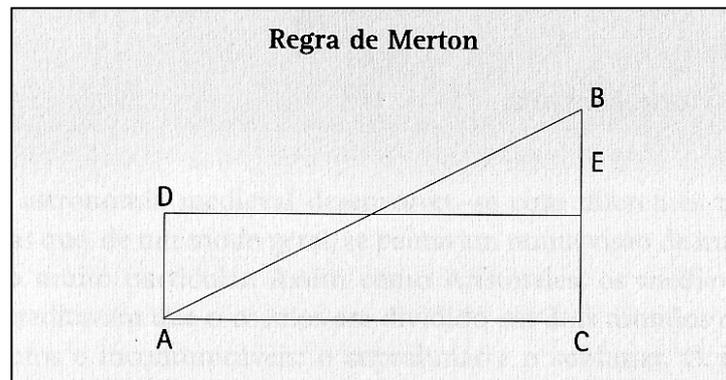
Geometrização do estudo do movimento local

Teorema I – Proposição I

O tempo no qual um determinado espaço é percorrido por um móvel que parte do repouso com um movimento uniformemente acelerado é igual ao tempo no qual aquele mesmo espaço seria percorrido pelo mesmo móvel com um movimento uniforme, cujo grau de velocidade seja a metade do maior e último grau de velocidade alcançado no movimento uniformemente acelerado.

(Galileu, 1988a, p. 170)

(*Duas novas ciências*, trad. P. R. Mariconda)



Paralelo com a Regra Mertoniana do século XIV, sobre as quantidades variáveis: “Qualquer qualidade uniformemente irregular tem a mesma medida total (*tanta quanta qualitas*) que teria se ela afetasse uniformemente o sujeito conforme o grau de seu ponto central”.

Pelo Merton College de Oxford passaram Thomas Bradwardine, William Heytesbury, John Dumbleton e outros. A regra foi aplicada no caso da velocidade média por Nicole Oresme, em Paris, também no século XIV.

Geometrização do estudo do movimento local

A representação gráfica de qualidades havia sido antecipada por Nicole Oresme (1348-1382) em seu *Tractatus de figuracione potentiarum et mensura difformitatum* (há controvérsia sobre o título exato, pois os manuscritos divergem). As figuras abaixo representam qualidades *unifformiter difformis* (uniformemente variadas). No eixo horizontal está representada a medida (*longitudo*) de um sujeito mensurável qualquer (por exemplo, sua extensão). Na vertical (*altitudo*) está representada a intensidade (*intensio*) da propriedade no correspondente ponto do sujeito.

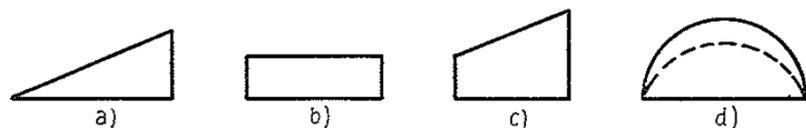


Fig. 16

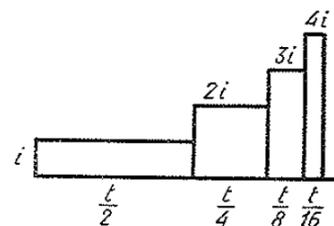


Fig. 17

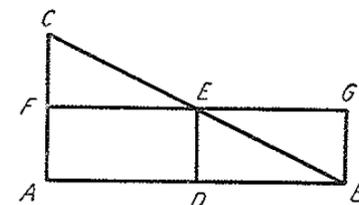


Fig. 18

Oresme chegou ao ponto de conceber as *qualidades superficiais* – propriedades que possuem duas dimensões com relação ao sujeito, e seriam representadas por uma linha normal em relação a uma superfície plana que, por sua vez, representa a amplitude ou extensão. Ele generalizou essa noção para as *qualidades corpóreas*, que seriam linhas perpendiculares a uma figura *sólida* que representa a extensão do sujeito – embora “uma quarta dimensão não exista e seja impossível de conceber”.

Geometrização do estudo do movimento local

A velocidade final em diferentes planos inclinados *depende somente da diferença de altura*, não do seu comprimento.

(Galileu, *Duas novas ciências*, 3^a. Jornada, seção “Do movimento naturalmente acelerado” – teorema enunciado durante a discussão que se segue à definição de movimento uniformemente acelerado, e antes do Teorema I; e demonstrado, sem numeração, logo antes do Teorema III.)

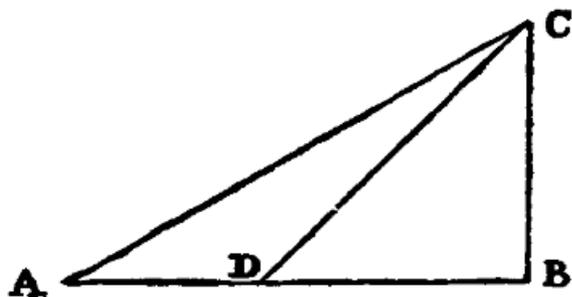


Fig. 45

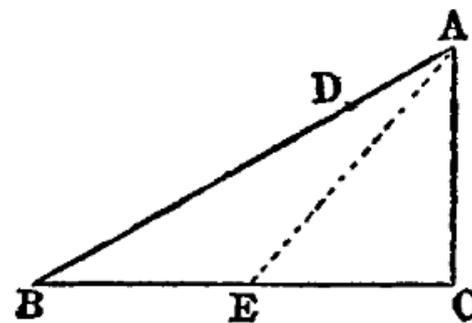


Fig. 52

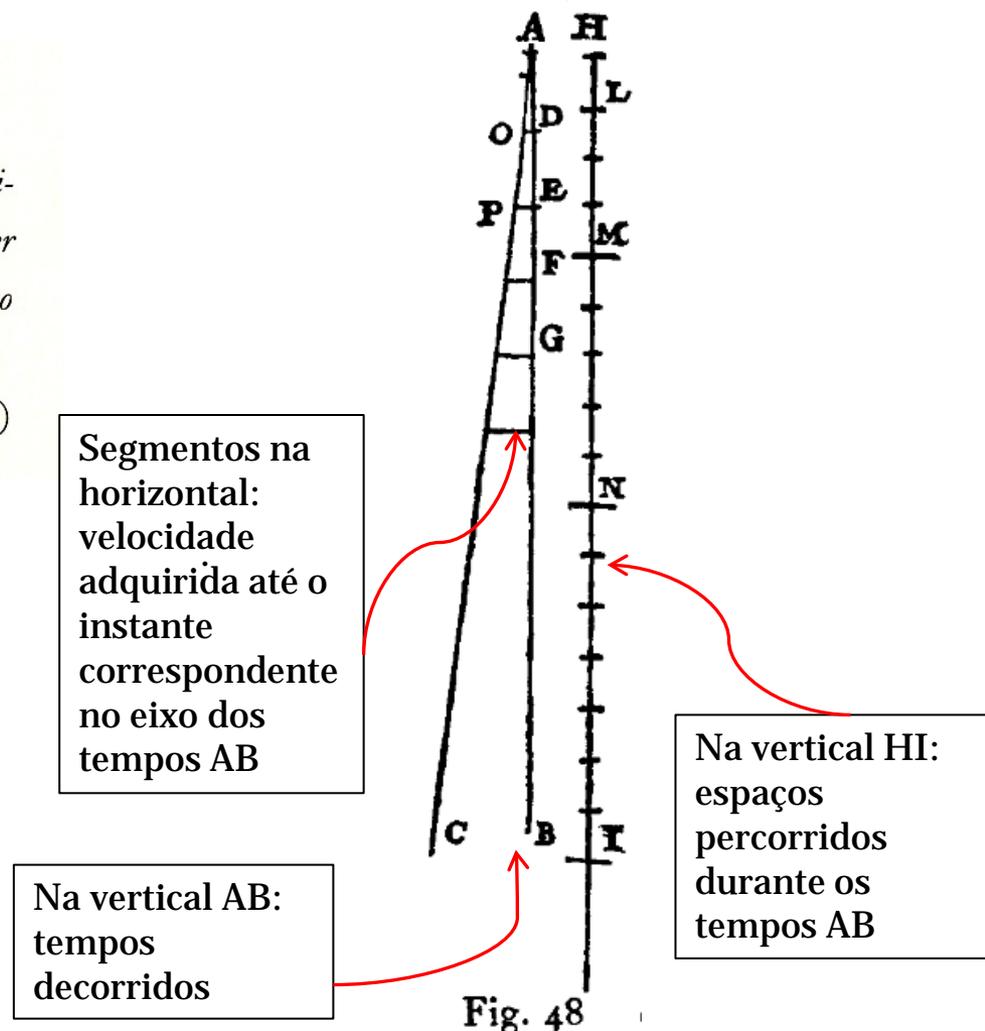
Geometrização do estudo do movimento local

Teorema II – Proposição II

Se um móvel, partindo do repouso, cai com um movimento uniformemente acelerado, os espaços por ele percorridos em qualquer tempo estão entre si na razão dupla dos tempos, a saber, como os quadrados desses mesmos tempos.

(Galileu, 1988a, p. 171)

(*Dois novas ciências*, trad. P. R. Mariconda)



Geometrização do estudo do movimento local

COROLARIO I

Daí, segue-se claramente que, se a partir do primeiro instante do movimento fossem tomados sucessivamente intervalos de tempos iguais, como, por exemplo, AD, DE, EF, FG nos quais se percorrem os espaços HL, LM, MN, NI, estes espaços estariam entre si assim como os números ímpares a partir da unidade, a saber, 1, 3, 5, 7: esta é, com efeito, a proporção entre os excessos dos quadrados das linhas que se excedem igualmente, diferença essa que é igual à menor delas, ou seja, à proporção entre os quadrados dos números inteiros que se seguem à unidade. Quando, portanto, os graus de velocidade aumentam em tempos iguais, de acordo com a simples série dos números, os espaços percorridos em tempos iguais adquirem incrementos segundo a série dos números ímpares ab unitate.

(Galileu, *Dois novas ciências*)

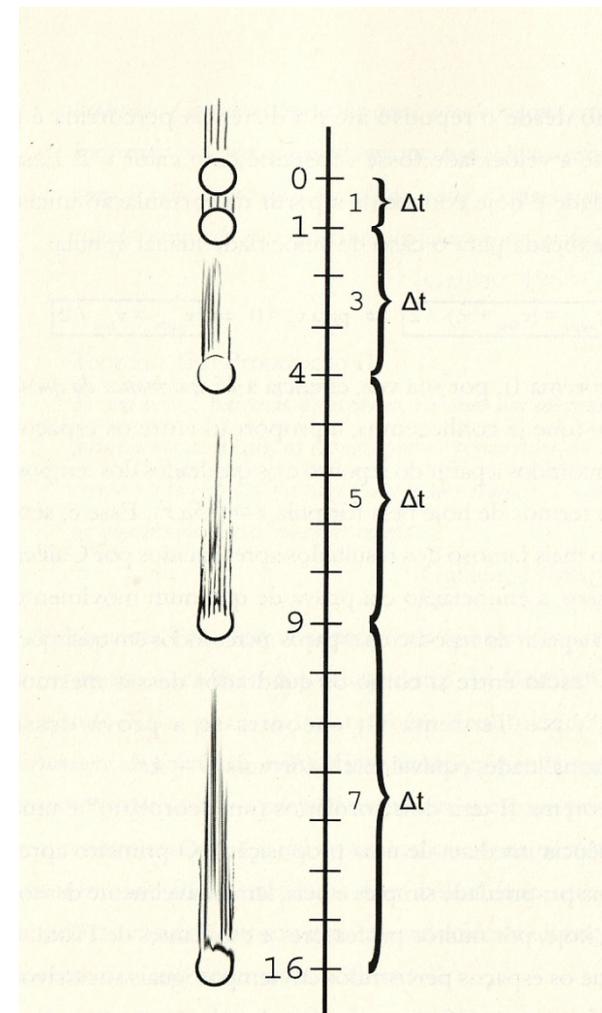


Figura 29

Ilustração: P. R. Mariconda e J. Vasconcelos,
Galileu e a nova física, p.224

Geometrização do estudo do movimento local

Galileu, apesar de estabelecer as teses corretas de que os espaços estão entre si como os quadrados dos tempos, e de que os espaços percorridos em tempos iguais estão entre si como a série dos números ímpares, também formula o princípio errôneo de que *os graus de velocidade estão entre si como os caminhos percorridos* – ou, em termos modernos, *a velocidade seria proporcional ao espaço percorrido*. (Carta a Paolo Sarpi, 1604, *Ed. Nazionale*, X, p. 115; cf. tb. *Dois novas ciências*, p. 144-145 trad. bras.)

Porém o correto é afirmar que a velocidade é proporcional ao *tempo* decorrido, e não ao espaço.

A formulação incorreta já havia sido antecipada por Benedetti e Tartaglia. Alberto de Saxônia já havia considerado e manifestado sua dúvida entre a tese da proporcionalidade ao tempo e a proporcionalidade ao espaço (*Quaestiones*, Livro II, § 13). Leonardo da Vinci, em seus manuscritos, antecipa a formulação correta (i.e. proporcionalidade da velocidade ao tempo).

O experimento com o plano inclinado

À direita: Galileu, *Duas novas ciências*, pp. 140-141, trad. Mariconda. Fonte da imagem abaixo: P. R. Mariconda & J. Vasconcelos, *Galileu e a nova física*, p. 44.

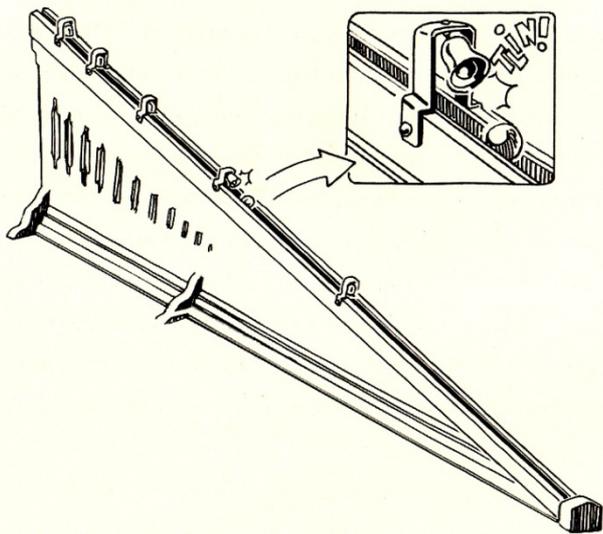


Figura 7

Numa ripa, ou melhor dito, numa viga de madeira com um comprimento aproximado de 12 braças, uma largura de meia braça num lado e três dedos no outro, foi escavada uma canaleta neste lado menos largo com pouco mais que um dedo de largura. No interior desta canaleta perfeitamente retilínea, para ficar bem polida e limpa, foi colada uma folha de pergaminho que era polida até ficar bem lisa; fazíamos descer por ela uma bola de bronze duríssima perfeitamente redonda e lisa. Uma vez construído o mencionado aparelho, ele era colocado numa posição inclinada, elevando sobre o horizonte uma de suas extremidades até a altura de uma ou duas braças, e se deixava descer (como afirmei) a bola pela canaleta, anotando como exporei mais adiante o tempo que empregava para uma descida completa; repetindo a mesma experiência muitas vezes para determinar exatamente a quantidade de tempo, na qual nunca se encontrava uma diferença nem mesmo da décima parte de uma batida de pulso. Feita e estabelecida com precisão tal operação, fizemos descer a mesma bola apenas por uma quarta parte do comprimento total da canaleta; e, medido o tempo de queda, resultava ser sempre rigorosamente igual à metade do outro. Variando a seguir a experiência, e comparando o tempo requerido para percorrer todo o comprimento com o tempo requerido para percorrer a metade, ou os dois terços, ou os três quartos, ou para concluir qualquer outra fração, através de experiências repetidas mais de cem vezes, sempre se encontrava que os espaços percorridos estavam entre si como os quadrados dos tempos e isso em todas as inclinações do plano, ou seja, da canaleta, pela qual se fazia descer a bola. Observamos também que os tempos de queda para as diferentes inclinações do plano mantinham exatamente entre si aquela proporção que, como veremos mais adiante,

foi encontrada e demonstrada pelo autor. No que diz respeito à medida do tempo, empregávamos um grande recipiente cheio de água, suspenso no alto, o qual através de um pequeno orifício feito no fundo, deixava cair um fino fio de água, que era recolhido num pequeno copo durante todo o tempo em que a bola descia pela canaleta ou por suas partes. As quantidades de água assim recolhidas eram a cada vez pesadas com uma balança muito precisa, sendo as diferenças e proporções entre os pesos correspondentes às diferenças e proporções entre os tempos; e isto com tal precisão que, como afirmei, estas operações, muitas vezes repetidas, nunca diferiam de maneira significativa (8).