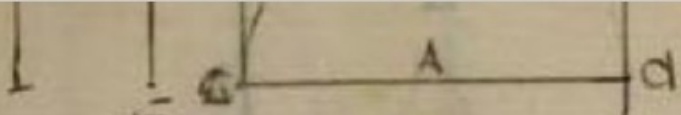


drum supra descriptam. quoniam contenta linea. et. equalis lateri
 cilindri a linea. fL. eqli basi perimetre dicte figure aia cilindrum
 astatute ponatur item. ER. linea eqli. Et. linee adducatur linea. RL.
 erit coactus triangulus. fRL. equalis superfac. EL. parallelogramme pte
 a idem triangulus equalis erit superfaci figure aia cilindrum stanti.
 a quoniam rectilinea figura aia. b. arcuum descripta similis e figure
 rectilinee aia ipsium. A. circulu descripte habebit iste due figure interse
 pportione illam qua habent semidiametri dictorum aiorum. A. a. b. secundu
 potesta igitur triangulus. KdT. habebit eadem pportionem ad figuram re
 ctilineam circa. b. circulu descriptam qua habet. Td. linea ad linea. G.

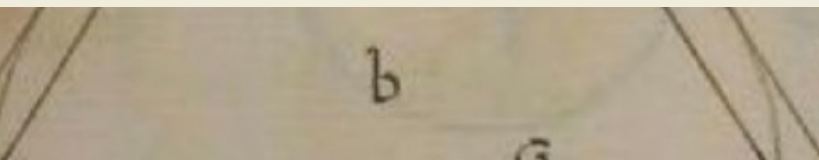
L'indeterminismo nelle teorie scientifiche dall'antichità al XVIII secolo: analisi di alcuni testi in latino

Roberto Mori e Giano Ruge
 Liceo statale scientifico e classico «E. Majorana» – Desio (MB)



drum supra descriptam. quoniam continetur linea. et. equalis lateri
cilindri a linea. f. l. eqli basi perimetre dicte figure circa cilindrum

Il percorso didattico



cilindri circa. b. circuli descriptam qua habet. T. d. linea adunata. et.

Caratteri, destinatari e scopi del percorso

L'interdisciplinarietà

- Il progetto ha carattere di interdisciplinarietà, abbracciando più discipline fra le quali latino, filosofia, matematica e fisica.

I destinatari

- I destinatari sono studenti delle classi quinte del Liceo matematico.

La finalità

- Scopo precipuo del progetto è l'insegnamento dell'indeterminismo, argomento di estrema rilevanza scientifica ed essenziale per una corretta interpretazione della realtà fisica.

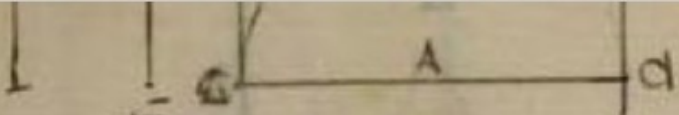
La sfida

- Si auspica di condurre i colleghi a riflettere sulla pratica comune di trasmettere la scienza come un apparato di leggi puramente deterministiche.

drum supra descriptum. d
bilidri e linza. f. l. egli

A
d

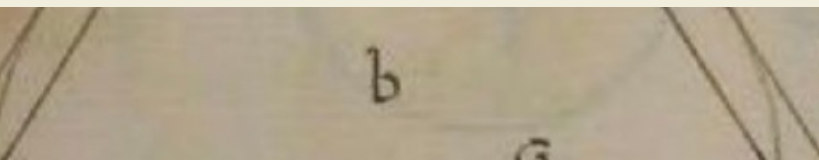
G
T



drum supra descriptam. quoniam continetur linea. et. equalis lateri
cilindri a linea. f. l. eâli basi perimetre dicte figure cîa cilindrum

Indeterminismo quantistico

Lucrezio, *De Rerum Natura*



ctilindrâ circa. b. circuli descriptam qua habet. T. d. linea adunâ. q.

Il *clinamen*

Il *clinamen* lucreziano ha una chiara matrice epicurea, benché di questa nozione non vi sia traccia nell'opera del filosofo greco, se non in un passo della famosa *Lettera a Erodoto* (cfr. paragrafo 47)

Democrito

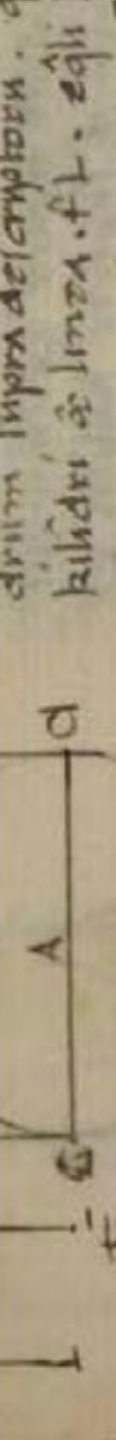
- Epicuro prende le mosse, seppur con nette differenze, dall'atomismo democriteo.

Qualità degli atomi

- La realtà è costituita da *atomi*, i quali hanno una propria forma, grandezza e peso, qualità strettamente connesse tra loro (cf. per es. *Epistola a Erodoto* 54-55 o lo scolio al paragrafo 43)

Cinetica degli atomi

- Gli atomi cadono dall'alto verso il basso lungo traiettorie parallele e alla medesima velocità (cf. per es. *Epistola a Erodoto*, 43 e 61-62).
- Come possono dunque urtarsi e dare vita alle aggregazioni presenti nella realtà fisica? Emerge il concetto di *παρέγκλισις* (*clinamen*).



De rerum natura: analisi del testo

II, 216-224

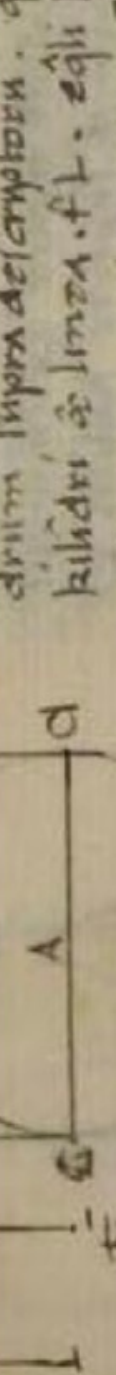
Illud in his quoque te rebus cognoscere avemus,
corpora cum deorsum rectum per inane feruntur
ponderibus propriis, incerto tempore ferme
incertisque locis spatio depellere paulum,
tantum quod momen mutatum dicere possis.
Quod nisi **declinare** solerent, omnia deorsum,
imbris uti guttae, caderent per inane profundum,
nec foret offensus natus nec plaga creata
principiis: ita nil umquam natura creasset.

[in seguito Lucrezio confuta la teoria secondo cui i corpi più pesanti cadano dall'alto sopra i più leggeri (vv. 225-242) e quella di chi ipotizza movimenti obliqui (vv. 243-250), per affrontare infine la questione della libertà umana (vv. 251-283), che esiste grazie al *clinamen*!]

II, 284-293

Quare in seminibus quoque idem fateare necessest,
esse **aliam praeter plagas et pondera causam**
motibus, unde haec est nobis innata potestas,
de nilo quoniam fieri nil posse videmus.
Pondus enim prohibet ne plagis omnia fiant
externa quasi vi. Sed ne mens ipsa necessum
intestinum habeat cunctis in rebus agendis
et devicta quasi cogatur ferre patique,
id facit **exiguum clinamen principiorum**
nec regione loci certa nec tempore certo.

I tre movimenti: quello ordinario derivato dal *pondus* degli atomi; quello eccezionale, che li porta a deviare di poco dalla verticale; quello provocato dal *clinamen*, cioè la *plaga* che fa in modo che gli atomi si aggregino tra loro formando i corpi.



De rerum natura: analisi del testo

II, 294-307: conservazione della materia e del moto degli atomi

Nec stipata magis fuit umquam **materiai copia** nec porro maioribus intervallis; nam **neque adaugescit quicquam neque deperit inde**. qua propter quo nunc in motu principiorum corpora sunt, in eodem ante acta aetate fuere et post haec semper simili ratione ferentur, et quae consuerint gigni gignentur eadem condicione et erunt et crescent vique valebunt, quantum cuique datum est per foedera naturai. nec rerum summam commutare ulla potest vis; nam neque quo possit genus ullum materiai effugere ex omni quicquam est <extra>, neque in omne unde coorta queat nova vis inrumpere et omnem naturam rerum mutare et vertere motus.

II, 308-332: movimento atomico e quiete apparente del mondo

Illud in his rebus non est mirabile, quare, **omnia cum rerum primordia sint in motu, summa tamen summa videatur stare quiete**, praeter quam siquid proprio dat corpore motus. omnis enim longe nostris ab sensibus infra primorum natura iacet; qua propter, ubi ipsa cernere iam nequeas, motus quoque surpere debent; praesertim cum, quae possimus cernere, celent saepe tamen motus spatio diducta locorum.

[seguono due bellissimi esempi: quello (vv. 317-322) delle pecore che brucano su pascoli visti da lontano, che ci appaiono come un'unica macchia bianca, anche se in realtà sono in movimento; e quello (vv. 323-332) di chi, vedendo dall'alto di un'ipotetica montagna le pur frenetiche operazioni militari del campo di battaglia, vi scorge solo un indistinto e immobile fulgore]

drum supra descriptum. d
cilindri e limba. f. l. e gli

De Rerum Natura: analisi del testo

L' argomentazione

=
rigore logico + esempi

uso della II p. s.

uso dei connettivi
(*ita, quare, unde, nam*)

alternanza di
indicativo e
congiuntivo

Le parole scelte

=
il lessico specifico

calchi e prestiti adattati

accezioni specifiche

alternanza con realtà
concrete

Gli elementi retorici

=
nobilitare la materia

Arcaismi e formule
epiche

nessi allitteranti

iperbati e poliptoti

Equilibrio tra
impianto
didascalico-
argomentativo
ed espressione
artistica:
si toccano le
corde del
cuore, oltre
che la
razionalità del
lettore.

drum supra descriptum.
bilidri e lima. f. l. e gli

A

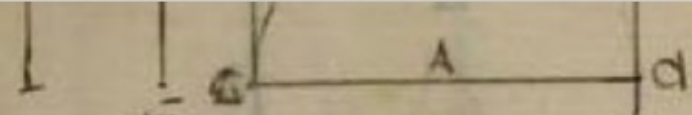
D

Un illuminante parallelo storico

«La visione del mondo del De rerum natura di Lucrezio è indeterministica, per l'introduzione del clinamen degli atomi. In questo sviluppo dell'atomismo antico, una teoria strettamente deterministica viene modificata con l'introduzione di un piccolissimo elemento di indeterminismo – il rarissimo e quasi irrilevante, ma del tutto imprevedibile clinamen che altera il moto degli atomi. Le ragioni non erano molto diverse da quelle che noi vediamo avanzare per la stocasticità oggi.»

«Se gli atomi di Epicuro non avessero fatto altro che "cadere verso il basso" non ci sarebbero state collisioni o interazioni di alcun tipo. Se i sistemi quantistici non facessero altro che ubbidire all'equazione di Schrodinger, si può facilmente argomentare, non si avrebbero esiti nei processi di misura né alcun evento macroscopico risulterebbe definito. I gatti non muoiono, ma neppure continuano a vivere – non risulta possibile render conto dei più banali fatti del mondo attorno a noi.»

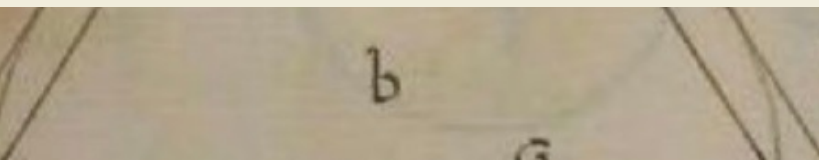
Bas Van Fraassen, *The Interpretation of Quantum Theory: Where do we Stand?*, Columbia University di New York, 1992



drum supra descriptam. quoniam continetur linea. et. equalis lateri
cilindri a linea. f. l. eâli basi perimetro dicte figure cîa cilindrum

Indeterminismo caotico

Isaac Newton, *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica*

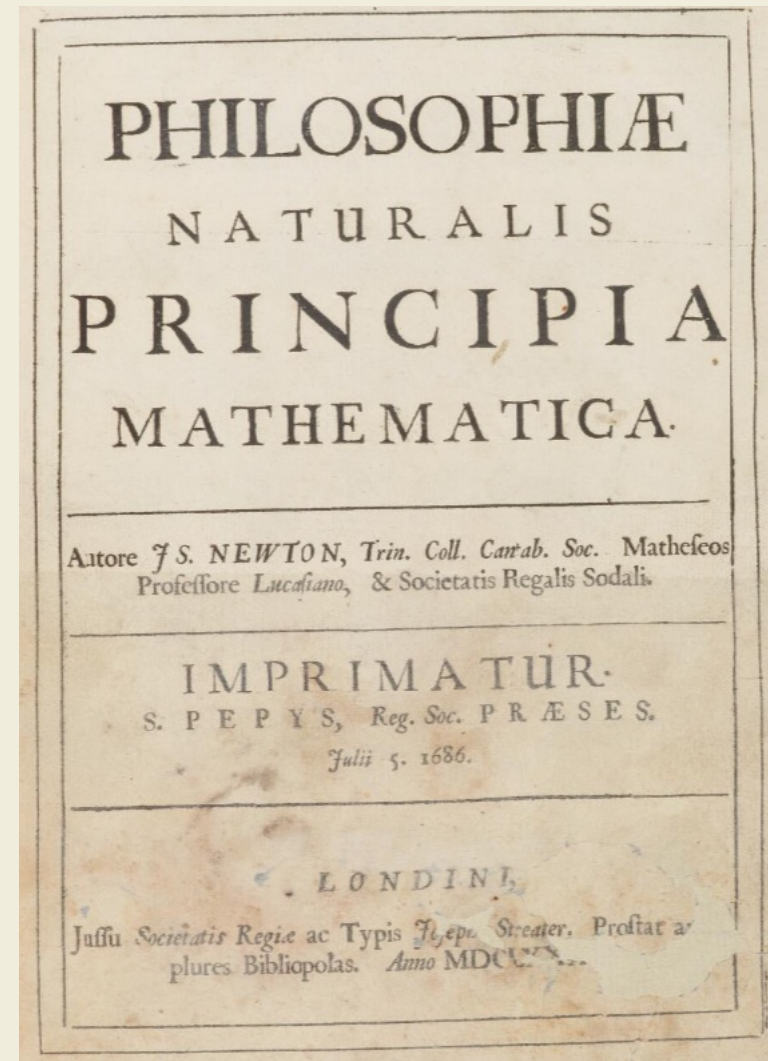


ctilineâ circa. b. circuli descriptam qua habet. Td. linea adlinea. q.

Il problema dei due corpi

- Il problema dei due corpi descrive il moto di due corpi puntiformi soggetti alle sole forze di interazione reciproca.
- Il problema, per quanto possa sembrare una semplificazione eccessiva per lo studio dei sistemi più complessi come il Sistema Solare, è di straordinaria importanza in quanto costituisce l'unico caso risolvibile esattamente del più generale problema degli n corpi.

Copia digitale della prima edizione **1686**.



Principia: analisi del testo

Propositio LXIII Problema XXXIX

Corporum duorum quæ viribus quadrato distantiaæ suæ reciproce proportionalibus se mutuo trahunt, deque locis datis, secundum datas rectas, datis cum velocitatibus exeunt, determinare motus.

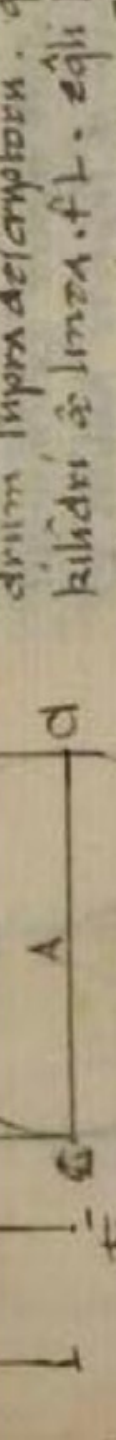
Ex datis corporum motibus sub initio, datur uniformis motus centri communis gravitatis, ut & motus spatii quod una cum hoc centro movetur uniformiter in directum, nec non corporum motus initiales respectu hujus spatii. Motus autem subsequentes (per legum corollarium quintum & theoremata novissima) perinde fiunt in hoc spatio, ac si spatium ipsum una cum communi illo gravitatis centro quiesceret, & corpora non traherent se mutuo, sed a corpore tertio sito in centro illo traherentur. Corporis igitur alterutrius in hoc spatio mobili de loco dato, secundum datam rectam, data cum velocitate exeuntis, & vi centripeta ad centrum illud tendente correpti, determinandus est motus per problema nonum & vicesimum sextum: & habebitur simul motus corporis alterius circum idem centrum. Cum hoc motu componendus est uniformis ille systematis spatii & corporum in eo gyrantium motus progressivus supra inventus, & habebitur motus absolutus corporum in spatio immobili. Q.E.I.

Proposizione enunciata come se fosse un problema, non come certezza data

testo con un andamento molto 'narrativo-descrittivo' (cf. sintassi)

lessico specifico: non solo varianti diacroniche, ma anche diafasiche

utilizzo delle abbreviazioni (&, Q.E.I.)



Una dimostrazione del problema dei due corpi

Si considerino due corpi, rispettivamente di massa m e M , e indichiamo con O il centro di massa del sistema.

Siano poi r_1 e r_2 , rispettivamente, la distanza del corpo di massa M da O e quella del corpo di massa m dal medesimo punto.

Ancora, si definisca il vettore $r = r_1 - r_2$ e siano

$$F_m = -GMm \frac{r}{r^3},$$

$$F_M = GMm \frac{r}{r^3}$$

le forze esercitate reciprocamente dai due corpi.

Definendo $\gamma = GMm$, è possibile scrivere le equazioni della dinamica come

$$m\ddot{r}_1 = -\gamma \frac{r}{r^3},$$

$$M\ddot{r}_2 = \gamma \frac{r}{r^3}.$$

Dividendo la prima equazione per m e la seconda per M e sottraendo membro a membro si ottiene

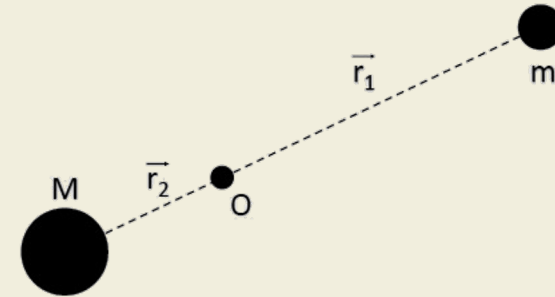
$$\ddot{r}_1 - \ddot{r}_2 = -\frac{\gamma}{m} \frac{r}{r^3} - \frac{\gamma}{M} \frac{r}{r^3} = -\gamma \frac{r}{r^3} \left(\frac{1}{m} + \frac{1}{M} \right).$$

Infine, definendo $\frac{1}{\mu} = \frac{1}{m} + \frac{1}{M}$, si ha

$$\ddot{r} = -\frac{\gamma}{\mu} \frac{r}{r^3}.$$

Si è dunque ridotto il problema allo studio del moto di un singolo corpo di massa μ .

Integrando l'ultima equazione si ottiene la legge oraria del corpo.



drum supra descriptum. e
bilidri e linea. f. l. e gli

d

A

G

T

Il problema dei tre corpi

Propositio LXVI Theorema XXVI

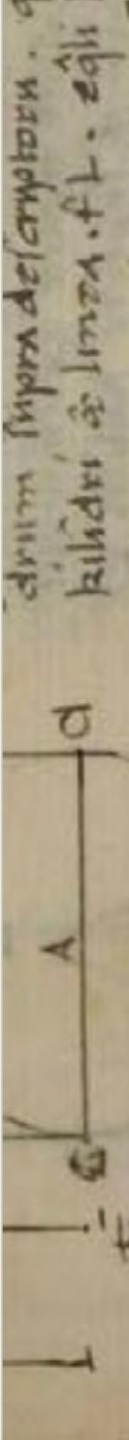
*Si corpora tria, quorum vires decrescunt in duplicata ratione distantiarum, se mutuo trahant; & attractiones acceleratrices binorum quorumcumque in tertium sint inter se reciproce ut quadrata distantiarum; minora **autem** circa maximum revolvantur; dico quod interius circa intimum & maximum, radiis ad ipsum ductis, describet areas temporibus magis proportionales, & figuram ad formam ellipseos umbilicum in concursu radiorum habentis accedentem, **si** corpus maximum his attractionibus agitetur, quam si maximum illud **vel** a minoribus non attractus quiescat, **vel** multo minus **vel** multo magis attractum, **aut** multo minus **aut** multo magis agitetur.*

testo con un andamento molto
'narrativo-descrittivo' (cf. sintassi)



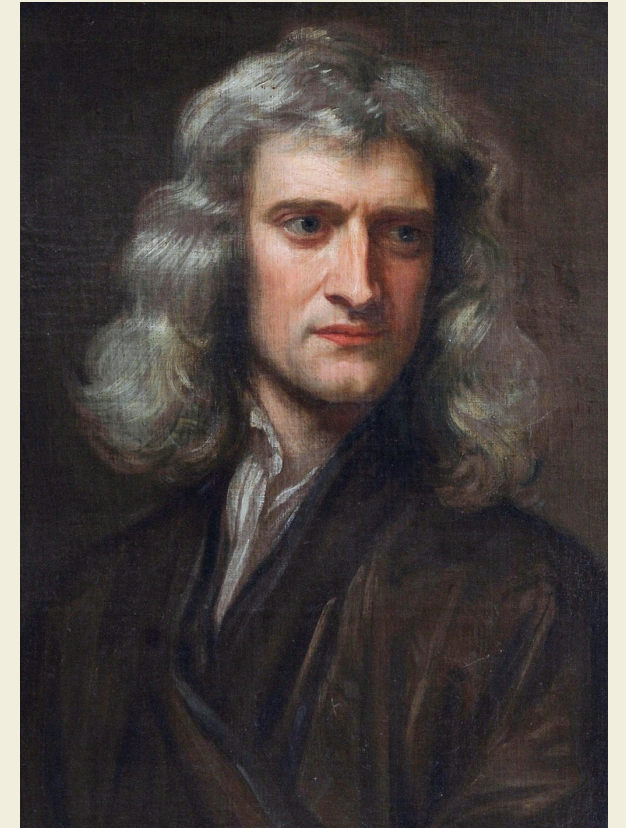
Es. subordinate ipotetiche in
enumerazione, interrogative indirette...

altri esempi di lessico specifico



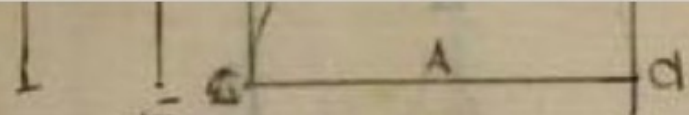
Il problema dei tre corpi

- Il noto problema dei tre corpi pone l'obiettivo di determinare la legge oraria $r = r(t)$ per ciascuno dei tre corpi che interagiscono mutuamente, note le posizioni (r_1, r_2, r_3) , le masse (m_1, m_2, m_3) e le velocità (v_1, v_2, v_3) degli stessi all'istante iniziale t_0 .
- Newton, consapevole delle difficoltà che il problema presentava, cerca di ricondurlo a quello di due corpi interagenti sui quali agisce una *perturbazione* provocata da un terzo corpo.
- Nel XVIII secolo, il problema presentato da Newton viene ripreso e riformulato da vari scienziati, quali Clairaut, D'Alembert, Eulero e Lagrange. Le soluzioni proposte dagli ultimi due, in particolare, sono di profondo interesse.
- Occorre attendere la fine del XIX secolo per stabilire la non integrabilità del problema tre corpi grazie ai lavori di Bruns e Poincaré.



Newton ritratto da Sir Godfrey Kneller (1689)

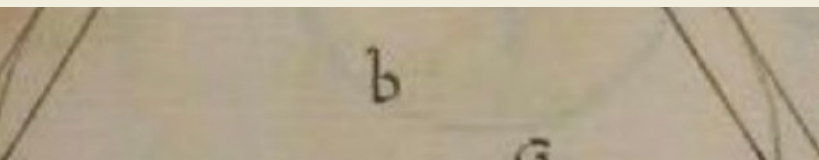
drum supra descriptum. d
Kilidri e limza. f. l. e gli
d
A
G
T



drum supra descriptam. quoniam continetur linea. et. equalis lateri
cilindri à linea. f. l. equali basi perimetro dicte figure circa cylindrum

Indeterminismo statistico

Daniel Bernoulli, *Hydrodynamica*



et linea circa. b. circuli descriptam qua habet. T. d. linea ad lineam. q.

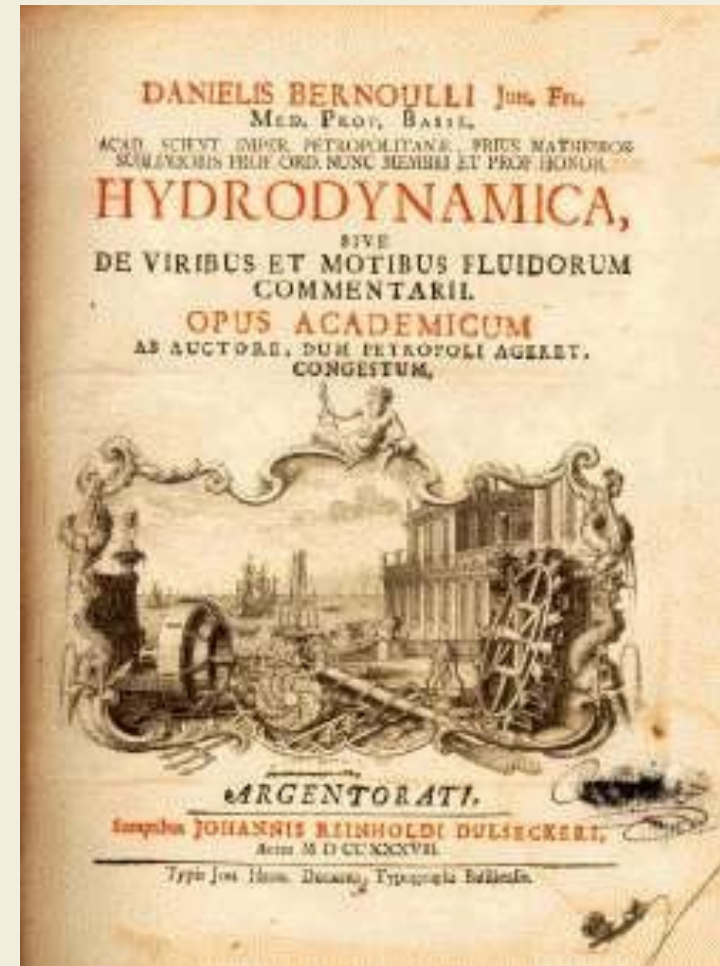
Verso la teoria cinetica dei gas...

Nel XVI secolo il filosofo naturale inglese Robert Boyle e alcuni studiosi coevi avanzano delle tesi relative alle proprietà dell'aria: viene mostrato che, a temperatura costante, il prodotto tra pressione e volume è anch'esso costante. Tali proposte, però, hanno perlopiù carattere qualitativo.

Lo scienziato svizzero Daniel Bernoulli, nella sua opera ***Hydrodynamica* (1738)**, formula un modello in cui l'aria è immaginata come un insieme di particelle in continuo movimento.

Bernoulli fornisce, a differenza dei suoi predecessori, una spiegazione dell'origine della pressione e di alcune proprietà dei gas, nonché della legge di Boyle-Mariotte.

Pone in tal modo le **basi per un approccio quantitativo alla teoria cinetica dei gas.**



drum supra descriptum. d
cilindri & limba. f. l. eqli
d
A
G
T

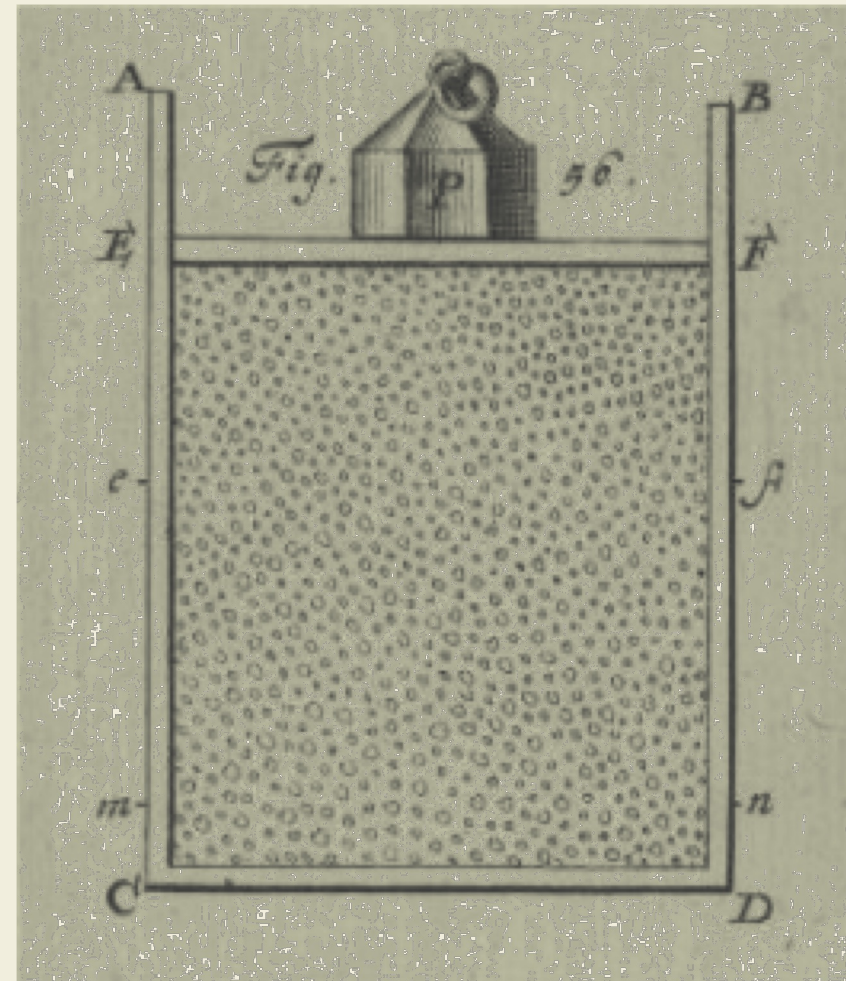
Hydrodynamica: analisi del testo

*Finge itaque vas cylindricum verticaliter positum ACDB atque in illo operculum mobile EF, cui pondus P super incubat: contineat cavitas ECDF corpuscula minima motu rapidissimo hinc inde agitata: **sic** corpuscula, dum impingunt in operculum EF idemque suis sustinent impetibus continue repetitis fluidum componunt elasticum quod remoto aut diminuito pondere P sese expandit.*

introduzione più schematica rispetto a Newton

sintassi più lineare rispetto a Newton

lettere maiuscole secondo l'uso moderno



drum supra descriptum.
cilindri ac limba. f. l. eqli

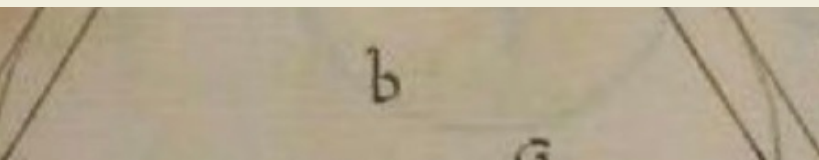
d
A
G
T



drum supra descriptam. quoniam continetur linea. et. equalis lateri
cilindri a linea. f. l. eâli basi perimetro dicte figure cîa cilindrum

Conclusioni

con uno sguardo sul futuro



ctilinea cîca. b. circuli descriptam qua habet. Td. linea adlinea. q.



drum supra descriptam. quoniam continetur linea. et. equalis lateri
cilindri a linea. f. l. eâli basi perimetro dicte figure cîa cilindrum

Bibliografia

Testi

D. Bernoulli, *Hydrodynamica, sive de Viribus et motibus fluidorum commentarii, opus academicum ab auctore, dum Petropoli ageret, congestum*, Argentorati 1738 (qui la prima edizione, digitalizzata dalla BNF).

Lucrezio, *De rerum natura*, a cura di A. Fellin, Torino 2017.

Lucretii *De rerum natura*, rec. Bailey, Oxford 1963².

I. Newton, *Philosophiæ naturalis principia mathematica*, Londini 1687 (qui la prima edizione con note a margine dell'autore, digitalizzata dalla UL di Cambridge)



cilindrâ circa. b. circuli descriptam qua habet. T. d. linea adunca. q.

b



drum supra descriptum. quoniam continetur linea. et. equalis lateri
cilindri a linea. f. l. eâli basi perimetro dicte figure circa cilindrum

Bibliografia

Studi

E. Bellone, *Caos e armonia. Storia della fisica moderna e contemporanea*, Torino 1990.

P. Bicknell, *Why Atoms had to Swerve: An Exploration in Epicurus Physics*, in «Proceedings of the Boston Area Colloquium in Ancient Philosophy», 6 (1990), pp. 241-76.

W. Englert, *Epicurus on the Swerve and Voluntary Action*, Atlanta, 1987.

D. Fowler, *Lucretius and the Clinamen and 'Free Will' (II 251-93)*, in *Syzetesis. Studi sull'epicureismo greco e romano offerti a Marcello Gigante*, vol. 1, Napoli, pp. 329-52.

D. Furley, *Two Studies in the Greek Atomists, Study II: Aristotle and Epicurus on Voluntary Action*, Princeton 1967.

G. C. Ghirardi, *Un'occhiata alle carte di Dio . Gli interrogativi che la scienza moderna pone all'uomo*, Milano 1997.

G. Israel, *Modelli matematici . Introduzione alla matematica applicata*, Roma 2002.



cilindri circa. b. circuli descriptam qua habet. T. d. linea adunca. et



drum supra descriptam. quoliam cotenenti linea. et. equali lateri
cilindri a linea. f. l. eqli basi perimetre dicte figure aia cilindrum

Bibliografia

T. O'Keefe, *Epicurus on Freedom*, Cambridge 2005.

P.-M. Morel, *Atome et nécessité: Démocrite, Épicure, Lucrèce*, Paris 2000.

M. Pope, *Epicureanism and the Atomic Swerve*, in «Symbolae Osloenses», 61 (1986), pp. 77-97.

J.S. Purinton, *Epicurus on 'Free Volition' and the Atomic Swerve*, in «Phronesis» 44 (1999), pp. 253-99.

D.N. Sedley, *Epicurus' Refutation of Determinism*, in *Syzetesis. Studi sull'epicureismo greco e romano offerti a Marcello Gigante*, vol. 1, Napoli, pp. 11-51.

R.W. Sharples, *Epicurus, Carneades and the Atomic Swerve*, in «Bulletin of the Institute of Classical Studies», 38 (1991-93), pp. 174-90.

A. Wasserstein, *Epicurean Science*, in «Hermes», 106 (1978), pp. 484-94.

L. Wendlandt – D. Baltzly, *Knowing Freedom: Epicurean Philosophy Beyond Atomism and the Swerve*, in «Phronesis», 49 (2004), pp. 41-71.



cilindri aia. b. circuli descriptam qua habet. T. d. linea adunata. et

b