Arte e Scienza in Archimede

Parte Seconda

Luca Nicotra*

La prima parte di questo articolo è stata pubblicata in «ArteScienza» N.2.

Sunto: *Archimede era figlio di un astronomo e nipote di un artista. Arte e scienza si trovano non soltanto nelle sue origini genealogiche ma anche in tutta la sua opera di matematico e ingegnere. Il recente restauro del codice C delle sue opere, nascosto in un palinsesto, ha rivelato molte importanti scoperte sul metodo di ricerca e sulle conoscenze matematiche di Archimede, alcune delle quali, come l'infinito attuale e il calcolo combinatorio, sono risultate in anticipo di 22 secoli rispetto a quelle che si riteneva acquisite soltanto con la matematica moderna del XIX e XX secolo. In particolare, è stato possibile comprendere che Archimede è il primo vero fondatore del calcolo infinitesimale e che tutti i matematici greci pensavano più per immagini che per parole. Ma tutte queste scoperte non sarebbero state possibili se uno dei direttori del progetto di restauro del palinsesto, Reviel Netz, non fosse oltre che un illustre filologo anche un appassionato cultore di matematica antica. Il restauro e la decifrazione del codice C di Archimede sono dunque il frutto di un lavoro interdisciplinare di altissimo valore, che ha collegato fruttuosamente conoscenze filologiche, matematiche, storiche e tecnologiche.*

Parole Chiave: Archimede, Metodo di Archimede, palinsesto, calcolo infinitesimale, Reviel Netz, William Noel, Codice C di Archimede.

Abstract: *Archimedes was the son of an astronomer and the grandson of an artist. Art and science are found not only in his genealogical origins but also throughout his work as a mathematician and engineer. The recent restoration of the C code of his works, tucked into a palimpsest, revealed many important discoveries on the search method and on Archimedes' mathematical knowledge, some of which, such as actual infinity and combinatorics, were in advance of 22 centuries than it was believed captured only with the modern mathematics of the 19th and 20th centuries. In particular, it has been possible to realize that Archimedes is the first true founder of calculus and presumably all Greek mathematicians thought more by images rather than by words. But all these discoveries would not have been possible if one of the directors of the restoration project of*

* Direttore responsabile di «ArteScienza», ingegnere e giornalista, Presidente dell'Associazione culturale "Arte e Scienza"; luca.nicotra@fastwebnet.it.

the palimpsest, Reviel Netz, was not only a noted philologist but also an avid lover of ancient mathematics.
Restoration and deciphering the Archimedes C code are thus the result of interdisciplinary work of great value, which linked fruitfully philological, mathematical, historical and technological knowledge.

Keyword: Archimedes, Archimedes Method, palimpsest, calculus, Reviel Netz, William Noel, Archimedes C code.

Citazione: Nicotra L., *Arte e scienza in Archimede. Parte Seconda,* «ArteScienza», Anno II, N. 3, pp. 5 -38.

7. La matematica per conoscere la fisica

Si può dire che gran parte della produzione scientifica di Archimede dimostri che il *leit motiv* della sua ricerca fosse penetrare nei misteri della complessità della natura e quindi della matematica, che considerava il suo linguaggio.

Questa sfida lo portò a essere il primo vero fondatore del calcolo infinitesimale,[1] poi portato a maturazione da Bonaventura Cavalieri, Luca Valerio, Galileo Galilei, Evangelista Torricelli, per raggiungere una forma più completa con Isaac Newton e Gottfried Leibniz e l'odierna sistemazione con i matematici del secolo XIX. La rilettura attenta del codice C da parte di Netz e Saito ha portato a questa conclusione, mentre prima si considerava Archimede soltanto un geniale precursore del calcolo infinitesimale.

Questo è lo strumento finora più potente di analisi di tutto ciò che in natura è complesso, applicabile in tutti quei casi in cui una proprietà o grandezza (fisica, chimica, matematica, sociale, ecc...) varia in maniera continua al variare di una o più altre grandezze.

[1] Generalmente si considera fondatore del calcolo infinitesimale Eudosso di Cnido (400 ca - 347 ca a. C.) essendogli attribuita (da Archimede stesso) la scoperta del metodo di esaustione, che è il principio alla base dell'analisi infinitesimale (cfr. Carl B. Boyer, *Storia della matematica*, Milano, OscarMondadori, 2004, p. 109).

Per tale motivo il calcolo infinitesimale è uno dei pilastri della moderna scienza.

In geometria Archimede ha affrontato numerose volte, in maniera geniale, il problema della misura di figure piane e solide curvilinee che, rispetto a quelle poligonali (delimitate da segmenti rettilinei) o poliedriche (delimitate da piani), rappresentano la complessità, di cui la variabilità è l'espressione più ricorrente. Per esempio, in un rettangolo la distanza di un punto di un lato dal lato opposto non varia lungo il lato stesso; in un cerchio invece la distanza da un diametro di un punto della circonferenza varia spostandosi lungo la circonferenza. Il rettangolo rappresenta la semplicità, il cerchio invece la complessità.

Alcuni di questi risultati sono noti a tutti: la misura approssimata della lunghezza della circonferenza (e quindi la scoperta del famoso numero π, rapporto fra la lunghezza della circonferenza e il suo diametro), l'area del cerchio (πr^2), il volume della sfera pari ai 2/3 del volume del cilindro ad essa circoscritto ($4\pi r^3/3$), l'area della superficie sferica pari a quattro volte quella del suo cerchio massimo ($4\pi r^2$). Molti altri, invece, riguardano figure piane e solide più complesse, sempre delimitate da contorni curvi: l'area della

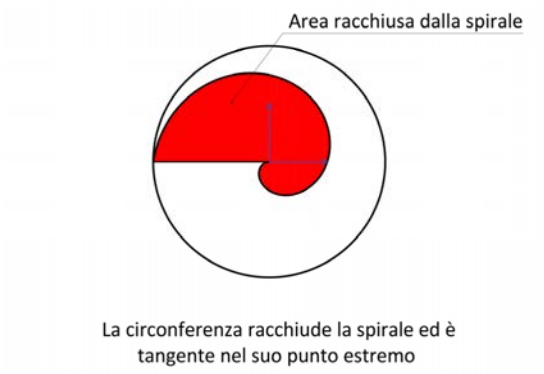


Fig. 11 - Area della spirale di Archimede.

spirale che porta il suo nome,[2] che dimostra essere 1/3 dell'area del cerchio ad essa circoscritto (figura 11), l'area di un segmento di parabola,[3] il volume dell'unghia cilindrica, il volume dei conoidi (solidi ottenuti per rotazione di una parabola o di un'iperbole attorno al proprio asse) e degli sferoidi (solidi ottenuti per rotazione di un'ellisse attorno a uno dei due assi). In figura 12 sono riportate

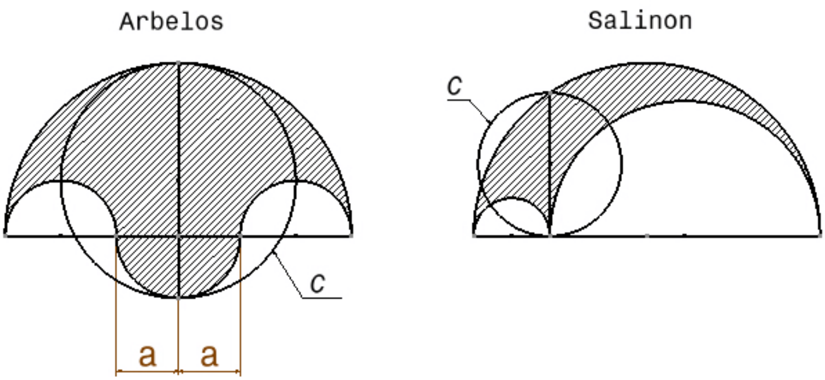


Fig. 12 - Arbelos e Salinon.

altre due figure ideate da Archimede: l'*arbelos* (αρβελοσ) e il *salinon* (σαλὶυου) evidenziate dal tratteggio: le loro aree sono uguali a quelle dei cerchi *C*.

Nella lettera di introduzione alla sua opera *Sulla sfera e il cilindro* inviata a Dositeo, Archimede menziona alcuni risultati principali delle sue ricerche su aree e volumi:

[2] Archimede, però, ne attribuisce la scoperta all'amico Conone di Alessandria (cfr. Carl B. Boyer, *Op. cit*, p.150).

[3] Archimede chiama sezione di cono retto la parabola, utilizzando l'immagine della parabola come sezione di un cono rotondo fatta con un piano parallelo a una sua generatrice. Il termine "parabola" sarà coniato in tempi posteriori.

Archimede a Dositeo salute

Antecedentemente ti mandai per iscritto, insieme alla dimostrazione, [la seguente] tra le cose che avevo considerato: che ogni sezione compresa da una retta e da una sezione di cono rettangolo [= parabola] supera di un terzo il triangolo avente la stessa base della sezione e uguale altezza. In seguito, essendomi imbattuto in teoremi degni di considerazione, composi le loro dimostrazioni. Sono questi: dapprima che la superficie di ogni sfera è quadrupla del suo circolo massimo, poi che alla superficie di qualunque segmento sferico è uguale il cerchio, il raggio del quale sia uguale alla retta condotta dal vertice della sezione alla circonferenza del cerchio che è base della sezione. Oltre a questi: che per qualunque sfera il cilindro avente la base uguale al circolo massimo della sfera e l'altezza uguale al diametro della sfera supera della metà la sfera, e così la sua superficie [totale] supera della metà la superficie della sfera. Queste proprietà erano da sempre inerenti alla natura delle figure menzionate ed erano ignorate da coloro che prima di noi si occuparono di geometria: nessuno di loro si era accorto che per queste figure c'è una simmetria.[4] *Perciò non ho esitato a porre queste proposizioni accanto a quelle trovate da altri geometri, ed a quei teoremi, che sembrano di molto superiori, che Eudosso stabilì sulle figure solide, cioè che ogni piramide è la terza parte del prisma avente la stessa base della piramide e uguale altezza, e che ogni cono è la terza parte del cilindro avente la stessa base del cono e uguale altezza: e infatti per queste proprietà appartenenti da sempre alla natura di queste figure accadde che dei molti degni geometri anteriori a Eudosso tutti le ignorarono e nessuno le comprese. È ora data la possibilità ai competenti di esaminare queste proposizioni. Sarebbe stato bene che esse fossero state rese note quando Conone era ancora in vita: pensiamo infatti che egli massimamente avrebbe potuto comprenderle pienamente e dare su di esse un giudizio confacente: ma ritenendo che sia bene portarle a conoscenza di coloro cui la matematica è familiare, ti inviamo le dimostrazioni che abbiamo scritte, e che sarà possibile di esaminare a coloro che si occupano di matematica.*

Vengono ora scritti dapprima gli assiomi e i postulati che servono per le dimostrazioni delle proposizioni.[5]

Nel carteggio epistolare Archimede usava anche la prima persona plurale, secondo il costume del tempo. Dalla lettera a Dositeo

[4] Sulla traduzione di questo termine vi sono diverse interpretazioni. Secondo Attilio Frajese probabilmente Archimede intendeva riferirsi alla "commensurabilità" delle figure cui allude.

[5] Da Attilio Frajese (a cura di), *Opere di Archimede*, Torino, UTET, 1974, pp. 69-72.

trapela la sua ammirazione per Eudosso e Conone, degna di nota in quanto Archimede era tutt'altro che prodigo di complimenti. Euclide, infatti, non viene citato, perché la sua matematica era da lui considerata elementare.

Misurare ciò che è complesso, in geometria la forma curva: questo dunque affascinava e intrigava Archimede. Lo strumento che usava è concettualmente quello del calcolo differenziale, quando scindeva un fenomeno complesso in infiniti fatti elementari, seguito dal calcolo integrale, per ricomporre l'infinità di tali fatti elementari nel fenomeno complesso. È in fondo un esempio del metodo "analisi e sintesi" ampiamente utilizzato dagli antichi matematici greci. Calcolo differenziale e calcolo integrale sono le due fasi del calcolo infinitesimale.[6]

Il lettore che non si fosse mai imbattuto nel corso dei suoi studi scolastici in questo tipo di calcolo, potrà comprenderne il significato con un esempio a tutti familiare tratto dalla fisica: la velocità di un moto.

Per velocità di un corpo in movimento intendiamo la rapidità con cui un dato spazio viene percorso, per cui diremo che maggiore è lo spazio percorso in un certo tempo, maggiore è la sua velocità. È immediato convincersi che matematicamente possiamo esprimere la velocità v come rapporto fra lo spazio s percorso e il tempo t impiegato a percorrerlo: $v = s/t$. Infatti questo rapporto risulta tanto più grande quanto maggiore è lo spazio percorso in uno stesso tempo, in accordo con le nostre aspettative. Nel caso più generale e comune, la velocità cambia durante il moto. Un'automobile da ferma raggiungerà una certa velocità, acquistando successivamente gli infiniti valori da zero fino a quella velocità, che però difficilmente potrà essere mantenuta costante.

Un moto nel quale la velocità risulti invariata si dice "moto uniforme" e poiché la velocità è una grandezza vettoriale (cioè definita oltre che da un valore numerico anche da una direzione e da

[6] Una eccellente esposizione concettuale di estrema chiarezza, a tutti comprensibile, del calcolo infinitesimale si trova nel volumetto di Attilio Frajese *Che cosa è il calcolo infinitesimale*, Roma, Editrice Studium, 1954.

un verso), la velocità è costante soltanto quando si percorre un tratto rettilineo sempre nello stesso verso con il medesimo valore numerico, per es. 80 km/h. Si comprende quindi come tale caso rappresenti una particolarità e risulti anche semplice, nel senso che non è necessario scomporlo in qualcosa di più semplice, perché per calcolare il valore numerico della velocità (velocità scalare) basta il rapporto fra la lunghezza di un qualunque tratto dell'intero percorso e il tempo impiegato a percorrerlo.

Il caso più comune, invece, è quello in cui la velocità cambia durante il moto, che per tale motivo si dice "moto vario". Consideriamo, per semplicità di esposizione, la variabilità soltanto del valore scalare della velocità, cioè immaginiamo di percorrere un tratto rettilineo nello stesso verso e semplicemente di accelerare o decelerare, facendo così cambiare il valore numerico della velocità. In questi casi la velocità cambia da istante a istante ed è evidente che il rapporto fra un tratto del percorso e il tempo impiegato in questo caso darebbe soltanto un valore medio della velocità relativo a quell'intervallo temporale. E allora come fare per conoscere la velocità in un certo istante t_1? Il metodo è quello che insegna la matematica: cercare di riportarsi a un caso "precedente", già noto, più semplice, che si sa risolvere, calcolare. Ecco come. Se riduciamo l'intervallo di tempo preso in considerazione per il calcolo della velocità, mantenendo fisso l'istante iniziale t_1, otterremo un valore della velocità che pur essendo ancora medio è tuttavia più vicino al valore della velocità all'istante t_1. Ripetendo il calcolo considerando intervalli di tempo sempre più piccoli, ma aventi tutti lo stesso istante iniziale t_1, otterremo successivi valori medi della velocità sempre meno discosti dal valore della velocità al tempo t_1, per il semplice motivo che la velocità avrà meno possibilità di cambiare in intervalli di tempo sempre più piccoli. Se idealmente proseguiamo all'infinito questo processo di progressivo annichilimento degli intervalli di tempo, otteniamo il valore della velocità all'istante t_1. In fondo stiamo facendo infiniti "esperimenti ideali o mentali" logicamente ammissibili. In altri termini non abbiamo fatto altro che ricondurre al caso del moto uniforme (che sappiamo calcolare e che rappresenta la realtà semplice) il caso del moto vario (che di per sé non sapremmo calcolare e che rappresenta la realtà complessa). E questa "riduzione" l'abbiamo fatta ricorrendo all'infinito potenziale, cioè a un processo che iteriamo indefinitamente: immaginiamo cioè di "scomporre" il moto vario (complesso) in infiniti moti uniformi (semplici) che avvengono ciascuno in un intervallino di tempo infinitesimo, cioè che per quanto piccolo si pensi può essere reso ancora più piccolo, cioè tendente a zero.

Questa operazione è concettualmente l'operazione fondamentale del "calcolo differenziale".

Una volta scomposto il moto vario in infiniti moti uniformi infinitesimi, lo si può ricomporre sommando o, come si dice, integrando gli infiniti moti infinitesimi. Allora lo spazio percorso durante l'intero moto vario nell'intervallo di tempo fra gli istanti t_1 e t_2 è la somma degli infiniti spazi infinitesimi $ds = v\, dt$ relativi agli infiniti moti uniformi infinitesimi in cui è stato scomposto il moto vario in quell'intervallo temporale (la lettera "*d*" minuscola davanti una grandezza indica che si considera un infinitesimo di quella grandezza).[7] Per indicare quella somma si usa una lettera "s" deformata, il famoso simbolo di integrale $\int$.[8] L'intero spazio percorso fra gli istanti t_1 e t_2 sarà allora la somma o integrale degli infiniti spazi infinitesimi $ds = v\, dt$ estesa all'intervallo temporale $[t_1, t_2]$: [9]

$$(1) \qquad S = \int_{t1}^{t2} ds = \int_{t1}^{t2} v dt \,.$$

[7] In maniera più precisa: indica il "differenziale" della grandezza in questione.

[8] Questa notazione fu introdotta da Gottfried Wilhelm Leibniz (cfr. M. Cantor, *Vorlesungen über Geshichteder Mathematic,* 3, 2ª ed. , p.166, Leipzig, 1901) considerando l'iniziale della parola latina *summa* e deformandola per indicare che non si tratta di una somma di quantità finite ma di una somma di infinite quantità infinitesime o meglio del limite di una somma (nell'esempio riportato, è il limite della somma dei prodotti $v_i\, \Delta t_i$ al tendere a zero del massimo degli intervalli temporali Δt_i di suddivisione dell'intervallo di tempo finito dell'intero moto).

[9] La parola "integrale" fu introdotta per la prima volta da Jacques Bernoulli (*Acta Erudita*, 1690, p.217), mentre la notazione di integrale definito $\int_a^b f(x)dx$ fu introdotta da J. B. Joseph Fourier (*Th. de la Chaleur*, Paris, 1822, par. 231).

Questa operazione di somma è quella fondamentale del "calcolo integrale".

Queste due operazioni di "scomposizione" della realtà complessa in infiniti fatti infinitesimi (semplici) e della sua "ricomposizione" sommando gli infiniti fatti infinitesimi costituiscono le due fasi del "calcolo infinitesimale": calcolo differenziale e calcolo integrale, che fanno uso entrambi dell'infinito.[10]

Le stesse considerazioni fatte a proposito della velocità di un moto possono essere ripetute in tutti i campi della realtà fisica e della matematica.

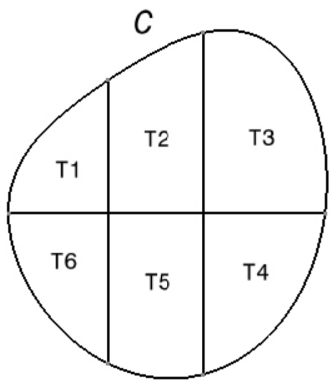


Fig. 13 - Suddivisione di una figura curvilinea in trapezoidi.

Per esempio, l'applicazione al calcolo dell'area di una figura geometrica curvilinea qualsiasi *C* renderà ancora più chiaro e "intuitivo" il metodo del calcolo infinitesimale. La figura *C* può essere divisa nelle figure *T1,T2,T3,T4,T5,T6* dette trapezoidi (figura 13) in quanto assomiglianti a trapezi rettangoli in cui il lato obliquo è curvilineo anziché rettilineo (in alcuni casi un lato si riduce a un punto). L'area della figura *C* è evidentemente la somma delle aree dei sei trapezoidi e il suo calcolo, quindi, si riporta a quello dell'area di uno essi. Facciamo riferimento, dunque, all'area del generico trapezoide (figura 14) e osserviamo che essa risulta minore di quella della figura costituita dalla somma delle aree dei rettangoli *R*, detta, per la sua forma a scalini, scaloi-

[10] Secondo Vincenzo Riccati e G. Saladini differenziare è dividere una quantità nei suoi elementi e integrare è sommarli (*Institutiones analyticae*, Bononiae 1765-1767, p. 4).

de inscritto nel trapezoide. Per il postulato della continuità[11] è possibile sostituire allo scaloide inscritto considerato un altro scaloide inscritto di area maggiore del precedente ma sempre minore di quella del trapezoide *T*, semplicemente rimpicciolendo le basi dei rettangoli *R* e aumentando di conseguenza il loro numero. In altre parole per il postulato di Eudosso-Archimede è sempre possibile "infiltrare" fra uno scaloide e il trapezoide *T* un altro scaloide maggiore (come area) dello scaloide precedente ma minore del trapezoide. Anche in questo caso applichiamo il principio dell'infinito potenziale, ripetendo indefinitamente questo procedimento.[12] In maniera equivalente possiamo dire che al tendere a zero delle basi dei rettangoli, il loro numero tende a infinito, riempiendo completamente l'area del trapezoide. Dunque quest'ultima sarà la somma delle aree degli infiniti rettangoli infinitesimi d*R* in cui abbiamo scomposto il trapezoide T :

$$S = \int_a^b dR = \int_a^b y dx \tag{2}$$

Anche in questo caso, dunque, il calcolo infinitesimale ci ha permesso di considerare una situazione complessa (il trapezoide *T*) come somma di infinite situazioni semplici: gli infiniti rettangoli infinitesimi d*R*.[13]

[11] Postulato della continuità di Eudosso-Archimede: date due grandezze disuguali, che stiano fra loro in un rapporto finito (quindi entrambe diverse da zero), esiste sempre un multiplo della minore che supera la maggiore.

[12] Che costituisce il cosiddetto "metodo di esaustione" attribuito da Archimede a Eudosso e di cui Archimede stesso si servì largamente. Il nome "esaustione" (o esaurimento) pone in evidenza il significato del metodo: tendere a esaurire lo scarto di una grandezza variabile da una grandezza fissa inserendo di volta in volta *ad infinitum* una grandezza maggiore della precedente ma pur sempre minore della grandezza fissa data. Nel nostro caso, la grandezza fissa è il trapezoide e la grandezza variabile che approssima sempre più il trapezoide è lo scaloide inscritto. È ovvio che il metodo di esaustione presuppone la validità del postulato della continuità di Eudosso-Archimede.

[13] È appena il caso di accennare ad alcune semplificazioni adottate per rendere più facilmente comprensibile a livello divulgativo l'introduzione del "metodo" del calcolo infinitesimale. Più in generale se il lato curvilineo del trapezoide non è sempre crescente e presenta quindi dei minimi e massimi relativi, la costruzione dello scaloide inscritto richiede che le altezze dei rettangoli componenti siano i minimi relativi di ciascun inter-

La (2) esprime con una formula il metodo di calcolo di S, cioè indica un procedimento mentale ma non permette in sé di trovare il valore numerico: in altri termini la (2) rimarrebbe soltanto un simbolo per indicare l'area del trapezoide se nei secoli XVII e XVIII il calcolo infinitesimale non fosse stato sviluppato analiticamente facendolo quindi evolvere dai suoi inizi puramente geometrici. In

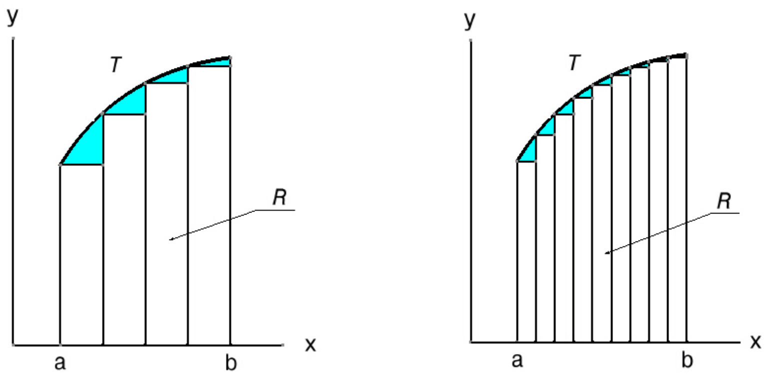


Fig. 14 - Approssimazione di un trapezoide con rettangoli.

particolare è stata determinante la scoperta di un teorema (di Torricelli-Barrow) da cui deriva immediatamente la possibilità di riportare il calcolo dell'integrale definito (prima introdotto) alla differenza fra i valori degli integrali indefiniti negli estremi di inte-

vallo parziale di decomposizione dell'intero intervallo [a,b]. Inoltre non è necessario che tale decomposizione avvenga in parti uguali: se tende a zero il maggiore degli intervalli parziali (*norma*) tenderanno a zero evidentemente anche gli altri. Infine, a rigore, occorrerebbe ripetere le considerazioni fatte anche per gli scaloidi circoscritti, che nel caso più generale hanno come altezze i massimi relativi dei singoli intervalli parziali. L'area del trapezoide risulta pertanto l'elemento di separazione delle due classi contigue di scaloidi inscritti e circoscritti ed è quindi il limite comune di tali classi al tendere a zero della norma della decomposizione di [a,b].

grazione.[14] Non è questa la sede per addentrarci nei particolari che sono fra l'altro noti da un qualunque testo di analisi infinitesimale. È importante, invece, notare come la matematica antica avesse dei limiti nello sviluppare l'analisi dovuti, probabilmente, alla inadeguatezza degli antichi sistemi di numerazione non posizionali.

Le recenti riletture critiche del *Metodo* hanno mostrato come Archimede fu il primo a servirsi "consapevolmente" di questo potente strumento di ricerca per calcolare aree e volumi di figure piane e solide curvilinee, che rappresentano in campo geometrico la complessità.

Egli risulta dunque il primo vero fondatore del calcolo infinitesimale e non un semplice precursore, come lo furono invece Democrito di Abdera ed Eudosso di Cnido.

Per quanto rigorosi e fertili siano i metodi del calcolo infinitesimale, risulta tuttavia difficilmente accettabile dal punto di vista intuitivo e psicologico l'idea che il finito (qual è la realtà esperibile complessa) possa essere ottenuto sommando infinite quantità che tendono ad annichilirsi. Ci si trova di fronte allo stesso enigma della geometria: come è possibile che un segmento di retta, che è finito, sia composto da infiniti punti privi di dimensione? Questi enigmi legati alla presenza dell'infinito nel finito non sono forse un retaggio dell'enigma stesso del Big Bang? All'istante zero del Big Bang tutto l'universo attuale era concentrato in un punto infinitamente piccolo. È un concetto che trascende ogni nostra facoltà immaginativa. La scienza lo può anche dimostrare, ma ciò che è dimostrabile con la logica può non essere accettabile a livello psicologico, perché al di fuori della nostra esperienza.

[14] L'integrale indefinito di una funzione continua è l'insieme delle sue infinite funzioni primitive fra loro differenti per una costante ovvero è l'insieme delle funzioni che hanno per derivata la funzione integranda. La spiegazione, sia pure a livello divulgativo, di questa definizione ci allontanerebbe in maniera ingiustificabile dal tema del presente scritto e non sarebbe in ogni caso necessaria per fornire una illustrazione concettuale del calcolo integrale.

8. La fisica per conoscere la matematica

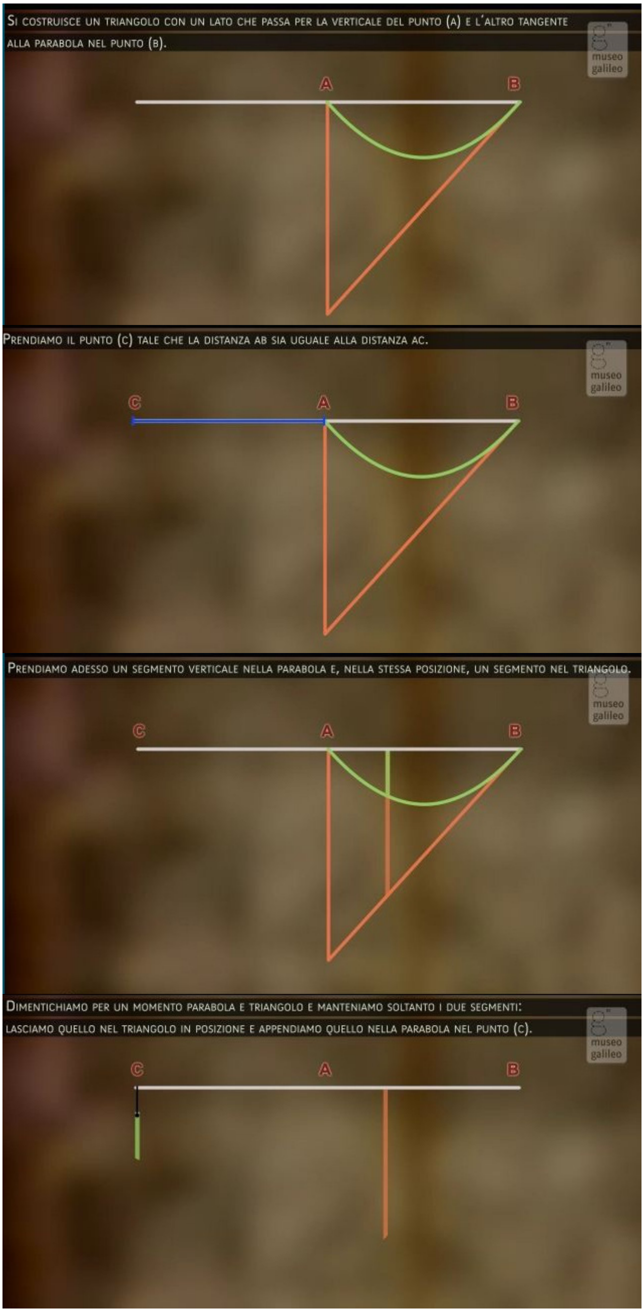
Gli esperimenti mentali (i *Gedankenexperiment*) di cui tanto si serviva Albert Einstein, e la cui introduzione erroneamente gli si attribuisce, costituivano già in Archimede un modo di approcciare la ricerca matematica utilizzando idealmente oggetti fisici, come quando nel *Metodo* ricava la quadratura di un segmento di parabola[15] immaginandolo come un oggetto fisico costituito da infiniti segmenti appesi ai piatti di una bilancia ideale.

Il seguente filmato, curato dal Museo Galileo - Istituto e Museo di Storia della Scienza in occasione della mostra *Archimede: arte e scienza dell'invenzione,* illustra in maniera molto semplificata l'esperimento ideale immaginato da Archimede per quadrare[16] un segmento di parabola e da lui illustrato nella prima proposizione del *Metodo*: Archimede-Quadratura della parabola

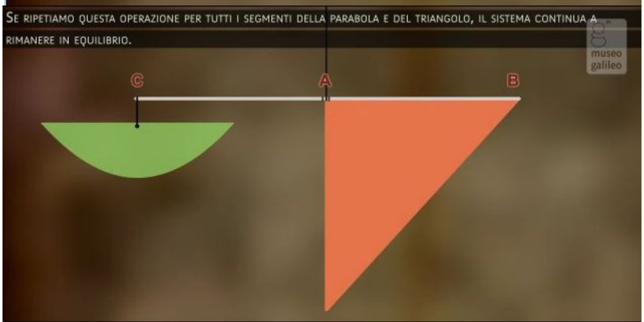
Di seguito sono riportati i fotogrammi principali del filmato stesso.

[15] Un segmento di parabola è la figura delimitata da un arco di parabola e da una retta perpendicolare all'asse della parabola. Archimede dimostrò in tre diversi modi che un segmento di parabola ha area pari ai 4/3 di quella del triangolo isoscele in esso inscritto. La dimostrazione contenuta nel *Metodo* fa uso del suo metodo "meccanico" facendo ricorso all'analogia con una bilancia ideale.

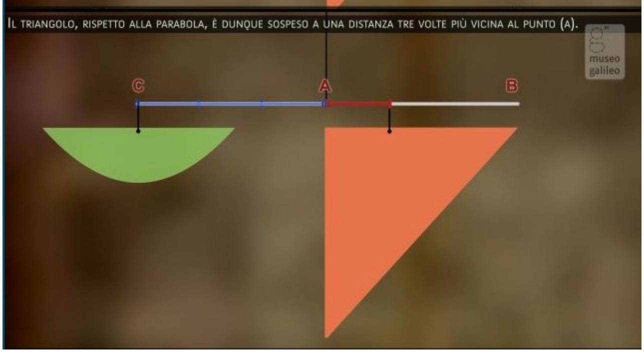
[16] Il termine "quadrare" ha qui il significato di misurare. L'origine è dovuta all'assunzione di un quadrato come unità di misura delle aree. Così diciamo che una certa area è, per esempio, 14 metri quadrati ovvero che un quadrato di lato 1 metro è contenuto 14 volte nell'area considerata. Il ricorso al quadrato come unità di misura è giustificato da queste tre proprietà: 1) una qualsiasi superficie delimitata da segmenti rettilinei può essere suddivisa in triangoli; 2) un qualsiasi triangolo può essere considerato la metà di un rettangolo; 3) esiste sempre un quadrato di area uguale a quella di un dato rettangolo. Dunque, il calcolo dell'area di una qualsiasi superficie a contorno rettilineo può essere ottenuto sommando le aree di un certo numero di opportuni quadrati.

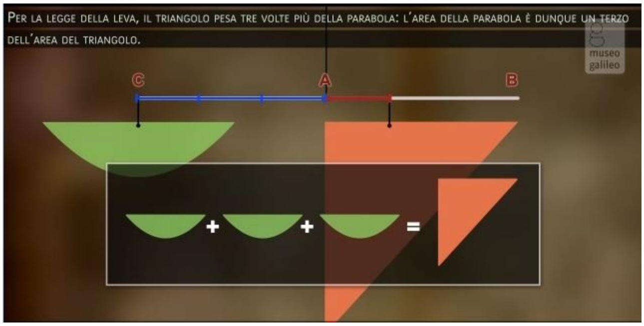

Si costruisce un triangolo con un lato che passa per la verticale del punto (a) e l'altro tangente alla parabola nel punto (b).
A
B
Prendiamo il punto (c) tale che la distanza AB sia uguale alla distanza AC.
C
A
B
Prendiamo adesso un segmento verticale nella parabola e, nella stessa posizione, un segmento nel triangolo.
C
A
B
Dimentichiamo per un momento parabola e triangolo e manteniamo soltanto i due segmenti:
lasciamo quello nel triangolo in posizione e appendiamo quello nella parabola nel punto (c).
C
A
B


SE SOSPENDIAMO IL SISTEMA COSÌ COSTRUITO PER IL PUNTO (A), ESSO SARÀ IN EQUILIBRIO: IL SEGMENTO DELLA PARABOLA CONTROBILANCIA QUELLO DEL TRIANGOLO.
museo galileo
C
A
B


SE RIPETIAMO QUESTA OPERAZIONE PER TUTTI I SEGMENTI DELLA PARABOLA E DEL TRIANGOLO, IL SISTEMA CONTINUA A RIMANERE IN EQUILIBRIO.
museo galileo
C
A
B


SAPPIAMO CHE IL TRIANGOLO ESERCITA IL SUO PESO A UNA DISTANZA DAL PUNTO (A) PARI A UN TERZO DELLA LUNGHEZZA DELLA SUA BASE.
museo galileo
C
A
B


IL TRIANGOLO, RISPETTO ALLA PARABOLA, È DUNQUE SOSPESO A UNA DISTANZA TRE VOLTE PIÙ VICINA AL PUNTO (A).
museo galileo
C
A
B



La bilancia di questo esperimento ideale non è altro che una leva di primo genere (figura 15), di cui Archimede aveva già trovato la legge dell'equilibrio nella sua opera *Sull'equilibrio dei pia-*

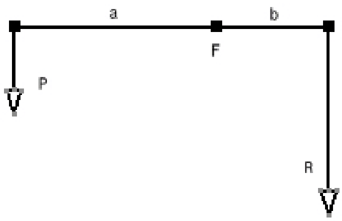


Fig. 15 - Leva di primo genere.

ni.[17] Dalla meccanica è noto che l'effetto delle forze *P* (potenza) e *R* (resistenza), applicate agli estremi della leva-bilancia, è quello di far ruotare la leva attorno al fulcro *F* in versi contrari (antiorario e orario) e che l'entità di tali rotazioni dipende dai loro prodotti per le rispettive distanze dal fulcro: i momenti *Pa* e *Rb* rispetto a *F*. La leva risulta in equilibrio quando tali rotazioni contrarie sono della

[17] La legge sull'equilibrio della leva di primo genere (fulcro compreso fra punti di applicazione della resistenza e della potenza) era già nota prima di Archimede. È enunciata anche in alcuni scritti di Aristotele, che però ne diede una formulazione basata sul principio cinematico aristotelico secondo il quale l'unico moto terrestre naturale doveva essere quello rettilineo. La formulazione della legge secondo Archimede, invece, è basata su principi statici legati a considerazioni di simmetria. Cfr. Carl B. Boyer, *Op. cit.*, p. 144.

stessa "entità" e quindi si "annullano" reciprocamente, il che avviene quando sono uguali i prodotti Pa e Rb:

$$Pa = Rb$$

da cui si ricava la proporzione:

$$\frac{P}{R} = \frac{b}{a}$$

Cioè la leva è in equilibrio quando le due forze applicate ai suoi estremi sono inversamente proporzionali alle loro distanze dal fulcro.

Il filmato, tuttavia, è un esempio di come si possa alterare profondamente il significato di un risultato scientifico quando si voglia semplificare l'esposizione per renderla il più divulgativa possibile.

Esso, infatti, ha senz'altro il pregio di comunicare in maniera visiva e realistica l'idea di equilibrio fra il triangolo e il segmento di parabola ma, oltre a falsare la figura originariamente considerata da Archimede, induce a pensare che effettivamente Archimede abbia eseguito un esperimento meccanico, "affettando" negli *infiniti segmenti* il triangolo e il segmento di parabola, appendendoli poi agli estremi di una bilancia e "verificando" infine che il triangolo e il segmento di parabola sono in equilibrio. Quanto sia irrealizzabile e assurdo questo esperimento è ovvio: un triangolo è una figura geometrica e quindi immateriale e altrettanto lo sono i segmenti che sono oltre tutto anche infiniti! Ma il filmato sembra proprio suggerire l'idea che in base a tale esperimento sia stato possibile per Archimede "verificare" che il triangolo "pesa" tre volte più del segmento parabolico e quindi che, supponendolo materializzato e omogeneo, lo stesso rapporto valga per le aree corrispondenti. Oltre a essere evidentemente assurdo, l'esperimento prospettato nel filmato nasconde il messaggio fondamentale che Archimede voleva dare con questa dimostrazione: illustrare con un esempio il suo metodo per giungere a scoprire proprietà puramente geometriche utilizzando risultati della fisica, in "esperimenti del tutto mentali" perché in realtà impossibili da realizzare, ma logicamente giustificabili: i *Gedankenexperiment* di cui si serviva Einstein per la sua Teoria della Relatività. Il filmato non mette in evidenza che è l'"analogia" con la leva la chiave di volta dell'intero esperimento ideale: essa permette di concludere che il triangolo pesa tre volte il segmento parabolico e non già una impossibile reale verifica sperimentale. Insomma è quella analogia che giustifica e valida l'esperimento ideale.

Come accennato, anche la figura utilizzata da Archimede è quella rappresentata in figura 16 ben diversa da quella del filmato.[18] Il ragionamento di Archimede è, molto brevemente, il seguente.[19] Da proprietà già note - alcune scoperte da Archimede stesso e sulle quali per brevità non mi soffermo - derivano le seguenti proporzioni:

$$MX : OX = AC : AX, \quad AC : AX = KC : KN$$

da cui

$$MX : OX = KC : KN$$

ma poiché K è per costruzione il punto medio di TC, ovvero TK = KC, l'ultima proporzione diventa:

$$MX : OX = TK : KN$$

Inoltre, poiché abbiamo traslato il segmento OX in SH è OX = SH e dunque infine si ha la proporzione:

$$MX : SH = TK : KN$$

[18] Per maggiore precisione, la figura 16 si discosta leggermente, per motivi didattici, da quella originale di Archimede.
[19] Per chi volesse seguirlo in maniera più dettagliata rimando alle pagine 156-163 dell'opera già citata di Reviel Netz e William Noel.

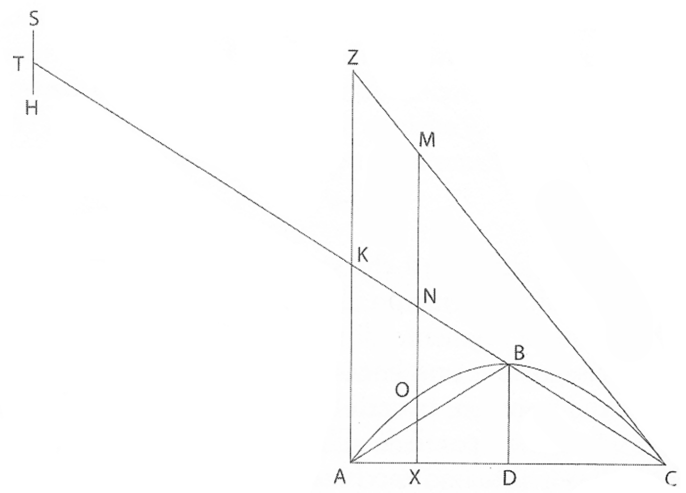


Fig. 16 - Diagramma relativo alla proposizione 1 del trattato Metodo (Netz-Noel, Op. cit., p.158).

È osservando attentamente questa proporzione che ad Archimede viene in mente un'analogia: le lunghezze dei segmenti MX del triangolo ACZ e SH del segmento parabolico sono inversamente proporzionali alle loro distanze KN e TK[20] dal punto K, così come "accadrebbe" in una bilancia in equilibrio che avesse il fulcro nel punto K e i due pesi nei punti T e N. Questa analogia invita ad applicare ai segmenti MX e SH, idealmente materializzati, la stessa legge dell'equilibrio della leva di primo grado che costituisce la bilancia ideale di Archimede: essi sono in equilibrio con i loro pesi ideali, rappresentati dalle loro lunghezze. Insomma

[20] KN e TK non sono in realtà le distanze dei segmenti MX e SH da K (TN non è perpendicolare a MX e SH), come invece figurano nella legge dell'equilibrio della leva di primo grado. Ma da semplici considerazioni geometriche di similitudine di opportuni triangoli rettangoli deriva immediatamente che il rapporto KN : TK è uguale al rapporto fra le effettive distanze da K dei segmenti MX e SH.

è questa analogia che nell'esperimento ideale fa la parte dello sperimentatore che verifica l'equilibrio della bilancia.

Ora il ragionamento di Archimede ricorre all'infinito: poiché i segmenti MX e OX sono stati scelti a caso (ovvero sono una "qualsiasi" coppia di segmenti del triangolo ACZ e del segmento parabolico corrispondenti a una stessa sezione delle due figure), ciò che è stato dimostrato per una coppia deve essere valido per tutte le "infinite" coppie di segmenti ottenuti come MX e OX che assieme formano rispettivamente il triangolo e il segmento parabolico. Ciò equivale, nell'esperimento ideale della bilancia, a riportare idealmente in T gli infiniti segmenti del tipo OX che compongono il segmento di parabola e lasciare il triangolo nella posizione in cui si trova. Il risultato "ideale" è il seguente: il triangolo ACZ e il segmento parabolico "idealmente materializzati" sono in equilibrio su una "bilancia ideale" che ha il fulcro in K. Occorre ora capire dove si trovano i baricentri del segmento parabolico e del triangolo ACZ, perché in essi risulta applicato il peso di ciascuna figura materializzata.

Il baricentro del segmento parabolico è chiaramente in T. Infatti, riportando idealmente in T gli infiniti segmenti OX del segmento parabolico e sovrapponendoli in modo che coincidano i loro punti medi (che sono anche i baricentri dei segmenti), il baricentro dell'intera figura coincide con T. La posizione del triangolo ACZ, invece, non viene alterata nel corso dell'esperimento ideale. L'altro estremo del braccio della bilancia deve ovviamente coincidere con il baricentro del triangolo, dove è applicato il suo peso. Archimede stesso, ancora nella sua opera *Sull'equilibrio dei piani*, aveva dimostrato che il baricentro di un triangolo qualsiasi è il punto d'incontro delle sue tre mediane e si trova su ciascuna mediana a 1/3 dal punto medio del lato cui si riferisce la mediana. Facendo riferimento alla figura 16, quindi, il baricentro del triangolo ACZ si trova sulla mediana CK in un punto situato a una distanza da K pari a 1/3 di CK. Ma poiché TK è uguale a CK risulta che la distanza del baricentro T del segmento parabolico dal fulcro K è tre volte la distanza del baricentro del triangolo dal fulcro K.

Dunque possiamo concludere, applicando la legge dell'equilibrio della leva di primo grado, che il peso del segmento parabolico è un terzo del peso del triangolo ACZ. Considerando omogenei i materiali ideali delle due figure, lo stesso rapporto esiste fra le rispettive aree: l'area del segmento parabolico ABC è un terzo dell'area del triangolo ACZ. Infine poiché, come risulta da facili considerazioni geometriche, l'area del triangolo ACZ è quattro volte quella del triangolo ABC inscritto nella parabola, si conclude, con Archimede, che l'area del segmento parabolico è 4/3 l'area del triangolo inscritto ABC.

Il procedimento ora illustrato, con il quale Archimede trovò per la prima volta, per via "meccanica", il risultato che poi dimostrerà, per via puramente matematica, nell'opera *Quadratura della parabola*, mostra chiaramente come non solo Archimede applicasse la matematica alla fisica ma viceversa utilizzasse la fisica per scoprire proprietà matematiche.

Questo suo percorso euristico viene da lui esplicitamente confidato a Eratostene nella lettera di dedica della sua opera forse più sorprendente ed enigmatica, il *Metodo*:

> *Archimede a Eratostene salute*
>
> *Ti ho precedentemente inviato [alcuni] dei teoremi [da me] trovati, scrivendo di essi gli enunciati e invitandoti a trovare le dimostrazioni, che non avevo ancora indicate. Gli enunciati dei teoremi inviati erano i seguenti: del primo: se in un prisma retto avente per base un parallelogrammo* (= un quadrato) *si inscrive un cilindro avente le basi [inscritte] nei parallelogrammi opposti, e i lati sui* (= tangenti ai) *rimanenti piani* (= facce) *del prisma , e se per il centro del cerchio che è base del cilindro e per un solo lato del quadrato sul piano* (= faccia) *opposto si conduce un piano, il piano condotto stacca dal cilindro un segmento* (= una parte) *che è compreso da due piani e dalla superficie del cilindro, vale a dire da uno [dei piani]: quello che è stato condotto, e dall'altro [quello] nel quale è la base del cilindro, e inoltre dalla superficie compresa tra i piani suddetti: il segmento tagliato dal cilindro è la sesta parte di tutto il prisma.*
>
> *Di un altro teorema l'enunciato era: se in un cubo si inserisce un cilindro avente le basi sui* [piani dei] *parallelogrammi opposti e la superficie [laterale] tangente agli altri quattro piani* (= facce)*, e se si inscrive*

anche un altro cilindro nello stesso cubo, avente le basi su [i piani di] altri [due] parallelogrammi e la superficie [laterale] tangente agli altri quattro piani, la figura compresa tra le superficie dei cilindri, la quale è comune ad ambedue i cilindri, è due terzi dell'intero cubo.

Accade poi che questi teoremi differiscano da quelli prima trovati: confrontammo infatti quelle figure, i conoidi, gli sferoidi e le [loro] parti con coni e cilindri: non si trovò nessuna di esse uguale ad una figura solida compresa da piani; mentre di queste figure comprese da due piani e da superficie di cilindri s'è trovato che ciascuna di esse è uguale a figure solide comprese da piani. Di questi teoremi ti mando le dimostrazioni, avendole scritte in questo libro.

Vedendoti poi, come ho detto, diligente ed egregio maestro di filosofia, e tale da apprezzare anche nelle matematiche la teoria che [ti] accada [di considerare], decisi di scriverti e di esporti nello stesso libro le caratteristiche di un certo metodo, mediante il quale ti sarà data la possibilità di considerare questioni matematiche per mezzo della meccanica. E sono persuaso che questo [metodo] sia non meno utile anche per la dimostrazione degli stessi teoremi. E infatti alcune delle [proprietà] che a me dapprima si sono presentate per via meccanica sono state più tardi [da me] dimostrate per via geometrica, poiché la ricerca [compiuta] per mezzo di questo metodo non è una [vera] dimostrazione: è poi più facile, avendo già ottenuto con questo [metodo] qualche conoscenza delle cose ricercate, compiere la dimostrazione, piuttosto che ricercare senza alcuna nozione preventiva. Perciò anche di questi teoremi, dei quali Eudosso trovò per primo la dimostrazione, intorno al cono e alla piramide, [cioè] che il cono è la terza parte del cilindro e la piramide [è la terza parte] del prisma avente la stessa base e altezza uguale, non piccola parte [del merito] va attribuita a Democrito, che per primo fece conoscere questa proprietà della figura suddetta, senza dimostrazione.

A noi accade poi che anche il ritrovamento del teorema ora pubblicato è avvenuto similmente a quelli prima [detti]; ho voluto quindi, avendolo scritto, pubblicare quel metodo, sia perché ne avevo già prima parlato (sicché non sembri che abbia fatto un vuoto discorso) sia perché son convinto che porterà non piccola utilità nella matematica: confido infatti che alcuni matematici attuali o futuri, essendo stato loro mostrato questo metodo, ritroveranno anche altri teoremi da noi ancora non escogitati.

Scriviamo dunque come primo teorema quello che pure per la prima volta ci apparve per mezzo della meccanica: che ogni segmento di sezione di cono rettangolo è uguale ai quattro terzi del triangolo avente la stessa base e uguale altezza;[21] *dopo di ciò ciascuno dei teoremi veduti con lo stes-*

[21] È il teorema sulla quadratura della parabola.

> *so metodo: alla fine del libro scriviamo le dimostrazioni geometriche di quei teoremi dei quali ti mandammo prima gli enunciati.*[22]

Anche in questa occasione Archimede sembra voler mettere alla prova i colleghi matematici "invitandoli" a fornire le loro dimostrazioni di teoremi già da lui enunciati. Inviti però che sembrano vere e proprie sfide matematiche: «*Ti ho precedentemente inviato [alcuni] dei teoremi [da me] trovati, scrivendo di essi gli enunciati e invitandoti a trovare le dimostrazioni, che non avevo ancora indicate*».

Dal tono della lettera («*Vedendoti poi, come ho detto, diligente ed egregio maestro di filosofia, e tale da apprezzare anche nelle matematiche la teoria...*») traspare quasi una certa "sufficienza" di Archimede nei confronti di Eratostene, cui però si rivolgeva essendo lo studioso più noto e autorevole del tempo ma che probabilmente considerava un matematico dilettante (rispetto a lui certamente...). Probabilmente Archimede inviò a Eratostene la sua nuova opera anche per il suo contenuto squisitamente filosofico, in quanto metodologico, essendo Eratostene molto noto come filosofo («...*diligente ed egregio maestro di filosofia,...*»). Nel *Metodo* Archimede non espone dimostrazioni geometriche rigorose ma mette in vetrina il percorso euristico che lo ha condotto a molte delle sue più celebri scoperte matematiche, dimostrate successivamente con il suo ineccepibile rigore in altre sue opere («*E infatti alcune delle [proprietà] che a me dapprima si sono presentate per via meccanica sono state più tardi [da me] dimostrate per via geometrica, poiché la ricerca [compiuta] per mezzo di questo metodo non è una [vera] dimostrazione...*»). Dice bene Hieronymus Georg Zeuthen[23] a proposito del *Metodo*: «...in questo scritto Archimede ... ci fa guardar dentro la sua officina matematica».[24] Archimede illustra il suo metodo meccanico non con argomentazioni teoriche, ma attraverso esempi di teoremi da lui scoperti con quel metodo. E comincia proprio con la quadratura della

[22] Da Attilio Frajese, *Opere di Archimede*, op. cit., pp. 570-573.
[23] Matematico danese (1839– 920), particolarmente noto per i suoi lavori sulle sezioni coniche, sulle superfici algebriche e sulla storia della matematica.
[24] Hieronymus Georg Zeuthen, «Bibl. Math.» 1906-07, 3, Folge, 7 Bd, p. 362.

parabola: «*Scriviamo dunque come primo teorema quello che pure per la prima volta ci apparve per mezzo della meccanica: che ogni segmento di sezione di cono rettangolo è uguale ai quattro terzi del triangolo avente la stessa base e uguale altezza*». Dalla lettera a Eratostene risulta esplicitamente come la fase della dimostrazione rigorosa fosse in Archimede preceduta da una fase meno rigorosa, ma più fluida e creativa perché porta a nuova conoscenza: quella della ricerca per mezzo di concetti (meccanici) al di fuori della matematica ma ad essa collegati da una analogia («*... confido infatti che alcuni matematici attuali o futuri, essendo stato loro mostrato questo metodo, ritroveranno anche altri teoremi da noi ancora non escogitati.*»). Dunque, un profeta e "fusionista" *ante litteram*, in piena sintonia con quanto ventitre secoli dopo predicherà il grande matematico Bruno de Finetti. Il succedersi di queste due fasi, l'una creativa e l'altra dimostrativa, sono due "momenti" diversi e complementari non solo dell'attività dello stesso scienziato (come in Archimede stesso) ma anche dello sviluppo della scienza. Archimede è molto chiaro in proposito: nella lettera a Eratostene cita il caso dei teoremi sul volume del cono e della piramide, scoperti ma non dimostrati rigorosamente da Democrito come, invece, sarà fatto dopo da Eudosso di Cnido con il suo celebre metodo di esaustione.

9. Dai poliedri di Platone ai poliedri di Archimede

Il matematico Pappo fu probabilmente un insegnante, vissuto ad Alessandria d'Egitto nel IV secolo. Scrisse diverse opere - oltre che matematiche anche di musica e di idrostatica - ma a noi ne è pervenuta soltanto una: *Synagoge*, nota anche come *Collectiones mathematicae*, un compendio di matematica composto da otto volumi, di cui il primo e parti del secondo sono stati perduti, che tratta argomenti di geometria, matematica ricreativa, duplicazione del cubo, poligoni e poliedri. È preziosa, perché fornisce molte notizie su opere dell'antichità andate poi perdute.

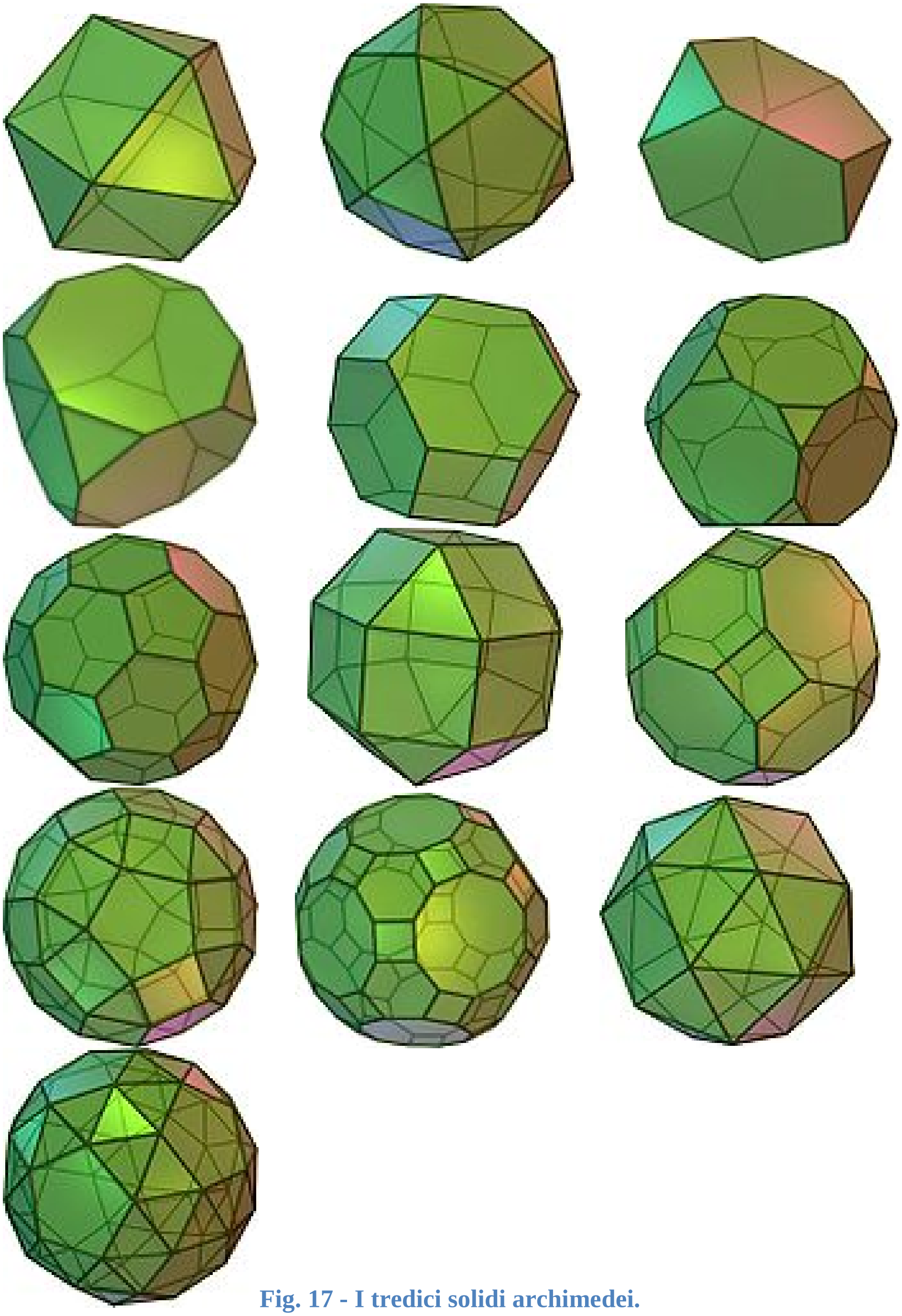


Fig. 17 - I tredici solidi archimedei.

Fra queste, Pappo attribuisce ad Archimede la scoperta di tredici tipi di poliedri, che si aggiungevano quindi ai cinque già noti dell'Antichità classica, detti platonici in quanto menzionati da Platone nei suoi dialoghi *Timeo* e *Fedone*.[25]

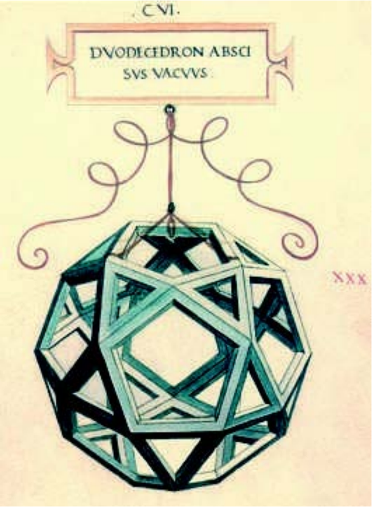


Fig. 18- *Duodecedron abscissus vacuus* di Leonardo da Vinci (1498), dal trattato *De divina porportione* di Luca Pacioli.

Sono poliedri convessi aventi per facce poligoni regolari uguali (o meglio congruenti, cioè sovrapponibili esattamente). Un poligono è regolare se ha tutti i lati e gli angoli congruenti. I solidi platonici sono il tetraedro (4 facce), il cubo o esaedro (6 facce), l'ottaedro (8 facce), il dodecaedro (12 facce) e l'icosaedro (20 facce). Nel concepire i suoi poliedri, Archimede dimostra molta più fantasia, realizzando una commistione di gusto artistico e rigore matematico. Infatti le condizioni che pone per i suoi poliedri sono meno restrittive di quelle dei solidi platonici: le facce devono essere ancora poligoni regolari ma possono essere di due o più tipi; le facce convergenti in un vertice si presentano nello stesso ordine (vertici isometrici); gli spigoli sono congruenti. La grande varietà di forme di questi solidi (figura 17) e il loro senso artistico, quasi moderno, ha colpito l'attenzione di molti artisti, dal Rinascimento a oggi: Leonardo da Vinci (figura 18), Piero della Francesca, grandi incisori e orafi, come Fra' Giovanni da Verona (figura 19), Lorenzo e Cristoforo da Lendinara,

[25] Platone nel *Timeo* associa il tetraedro al fuoco, l'esaedro (cubo) alla terra, l'ottaedro all'aria e l'icosaedro all'acqua, mentre nel *Fedone* associa il dodecaedro all'Universo.

Wenzel Jamnitzer, e nel XX secolo Maurits Cornelis Escher (in figura 20 anche altri poliedri non archimedei).

10. Archimede gioca

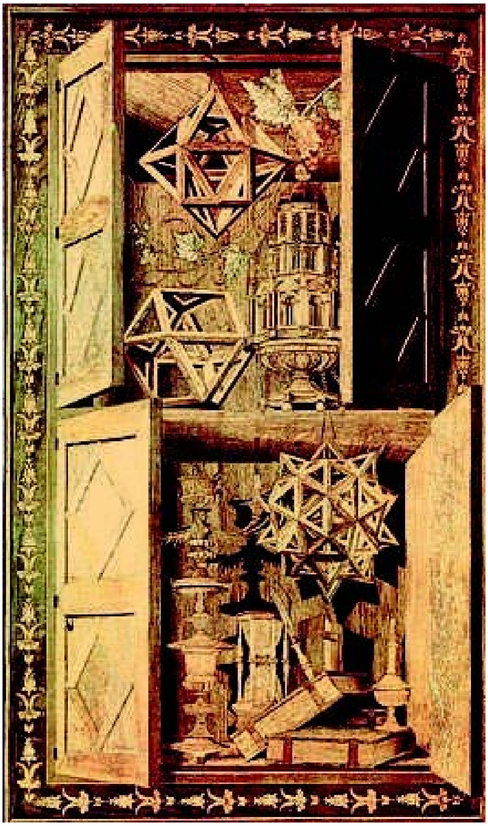


Fig. 18 - *Tarsia lignea* di Fra' Giovanni da Verona (1494) nella Chiesa di S. Maria in Organo a Verona.

Un certo carattere giocoso, ma anche un'ulteriore luce sui metodi euristici di Archimede, sembra emergere dai rarefatti resti della sua opera *Stomachion*, che chiude il codice C. Si tratta di un gioco molto difficile, che consisteva nell'assemblare 14 tessere in modo da formare un quadrato.[26] Anche se spesso la sua invenzione viene attribuita ad Archimede, era probabilmente già noto ma Archimede, nello *Stomachion,* lo tratta dal punto di vista matematico. Purtroppo, quest'opera, trovandosi alla fine del palinsesto, risulta molto danneggiata e soltanto con il recente restauro di Netz e Noel è stato possibile leggerne qualche parte prima illeggibile.

[26] Da Wikipedia: «La parola stomachion deriva dal greco στόμαχος *stòmachos* (irritazione) e dal latino "stomachari" (irritarsi). Il vero nome dello stomachion potrebbe però essere ὀστομάχιον *ostomàchion* cioè "battaglia degli ossi", perché anticamente lo stomachion veniva costruito con degli ossicini che venivano intagliati nelle 14 forme dello stomachion.»

Pertanto non si è potuto capire bene i motivi per cui Archimede trattasse di questo gioco e sono state fatte soltanto varie illazioni. In ogni caso emerge ancora una volta l'incredibile modernità di Archimede, che utilizza un gioco per sviluppare considerazioni matematiche, anticipando di 22 secoli aspetti della didattica contemporanea: un Martin Gardner *ante litteram*![27]

L'ipotesi più accreditata sul significato dello *Stomachion* è quella avanzata da Netz, secondo la quale sarebbe un'applicazione del calcolo combinatorio. Se confermata, costituirebbe una nuova straordinaria scoperta sulla figura di Archimede scienziato: sarebbe stato il primo in assoluto a occuparsi di calcolo combinatorio.

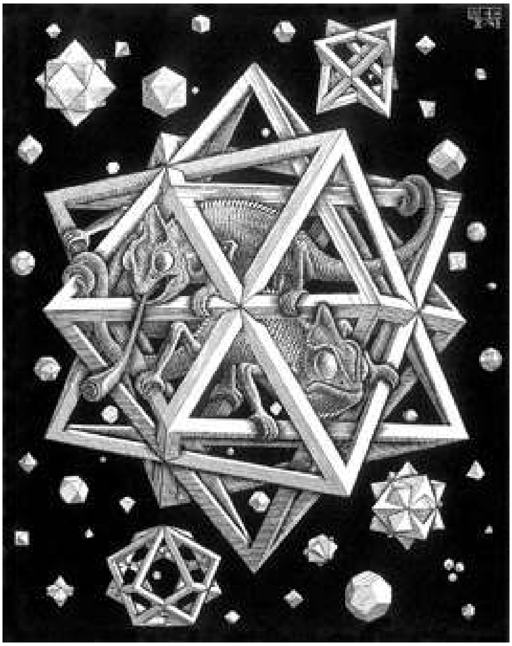


Fig. 20 - M. C. Escher, Stelle (1948).

Oggi si è calcolato, con l'odierno calcolo combinatorio, che le 14 tessere dello *Stomachion* si possono assemblare per formare un quadrato in ben 17152 modi differenti!

[27] Famosa è l'opera di Martin Gardner, *Enigmi e giochi matematici*.

Fig. 21 - Pagina del Codice O di Archimede: traduzione in latino delle opere di Archimede dai codici in greco originale A , B compiuta da Guglielmo di Moerbeke nel 1269 presso la corte papale di Viterbo (Città del Vaticano, Biblioteca Apostolica Vaticana).

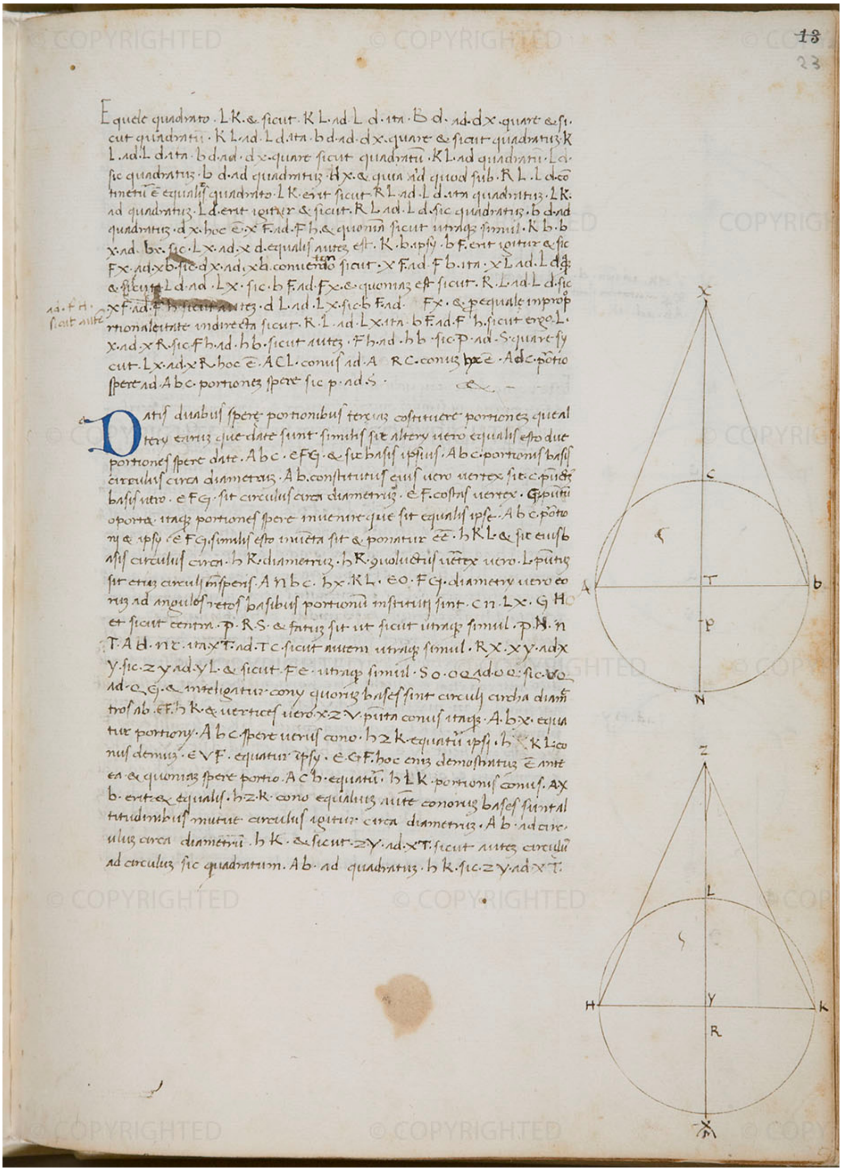


Fig. 22- Copia del codice A di Archimede realizzata da Piero della Francesca, che riporta la traduzione latina fatta da Jacopo da Cremona su incarico di papa Niccolò V intorno al 1450. Firenze (Biblioteca Riccardiana Ricc. 106).

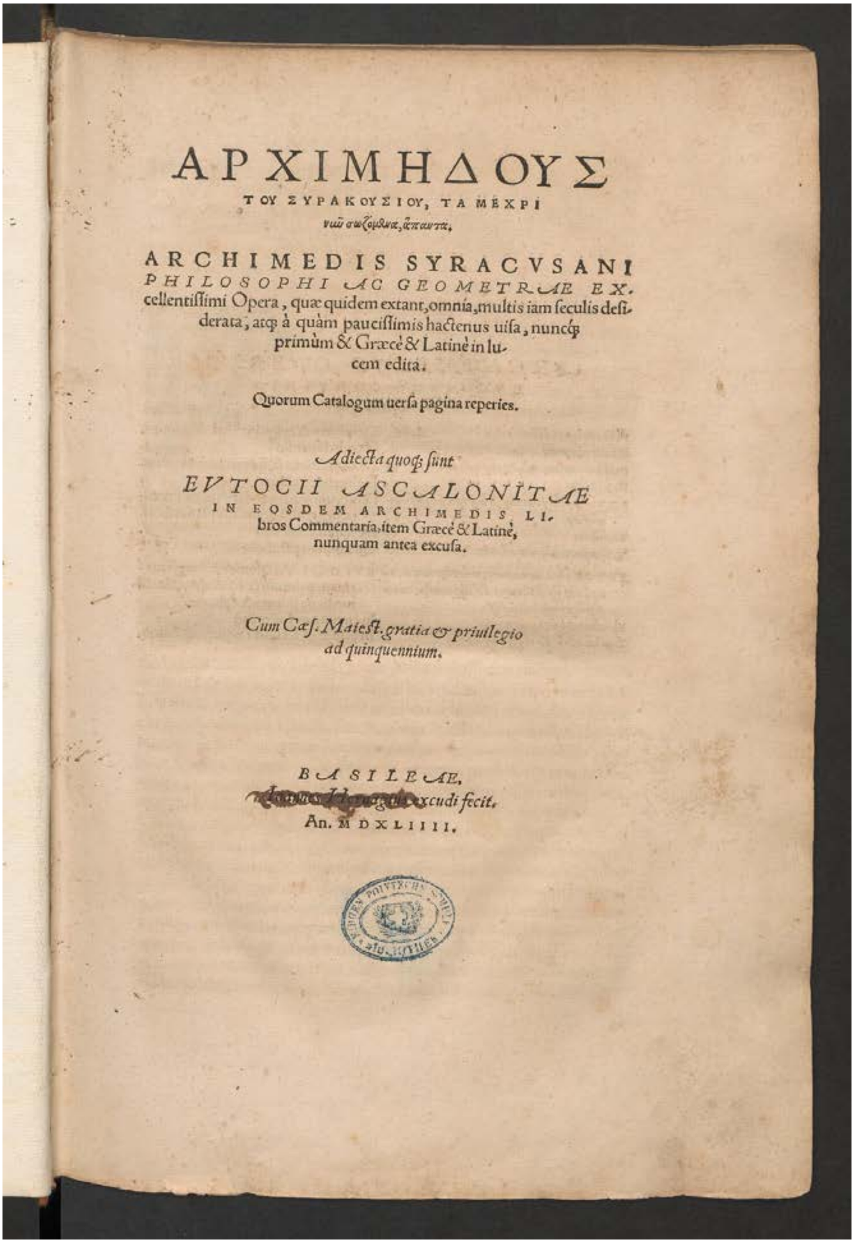


Fig. 23 - La prima edizione stampata di tutte le opere di Archimede (*editio princeps*), uscita a Basilea nel 1544, fu redatta in base al codice A ancora esistente a quell'epoca.

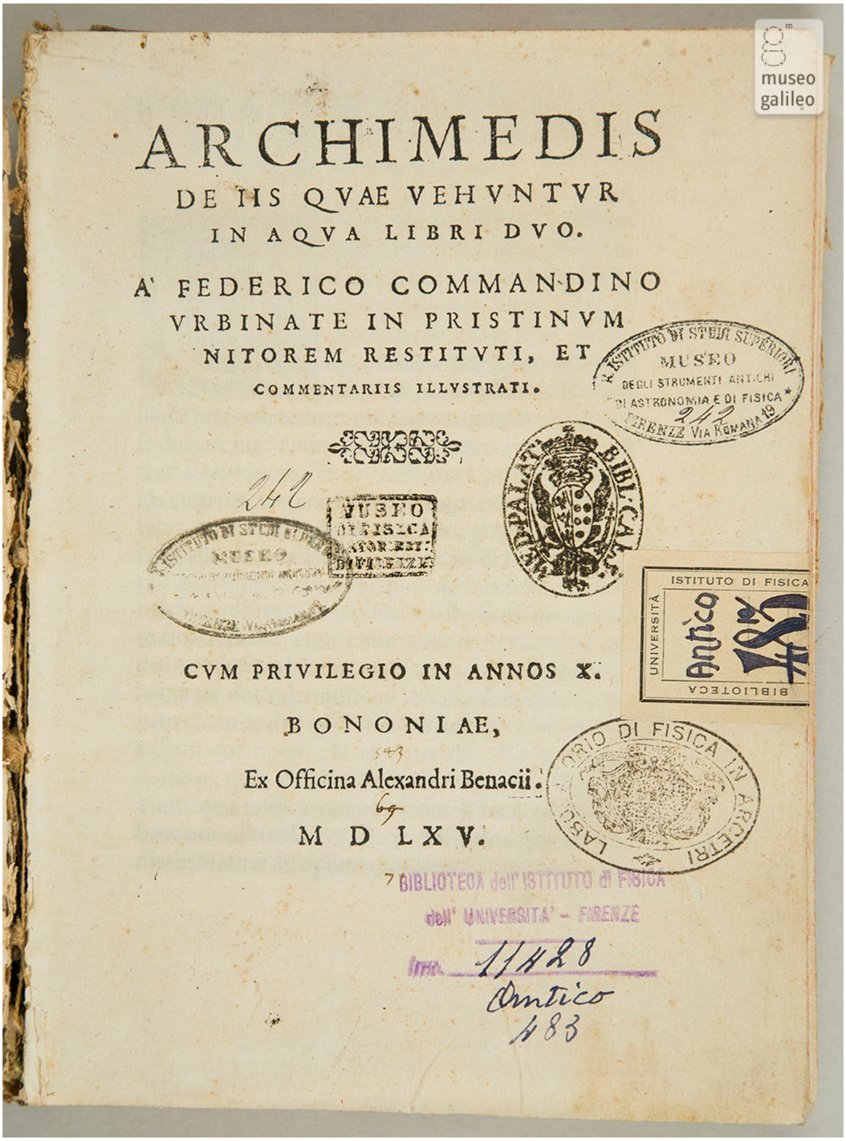
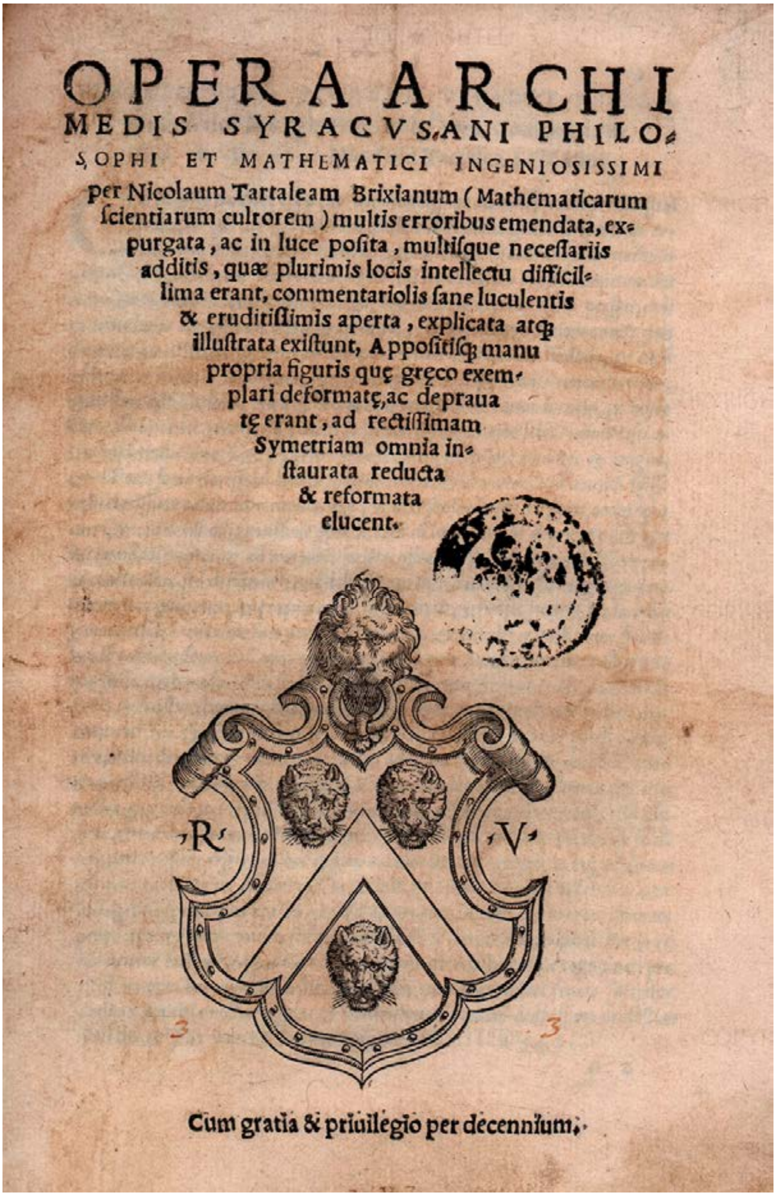


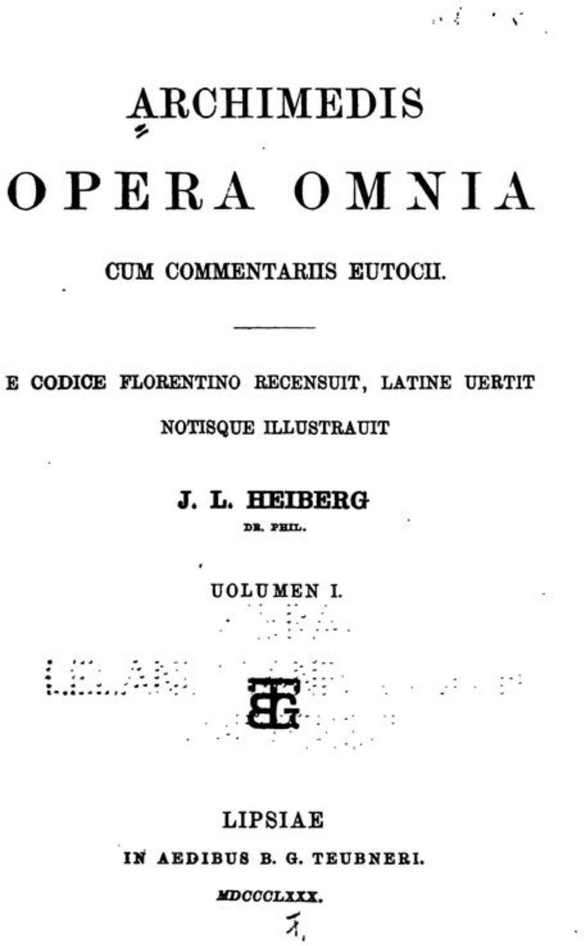
Fig. 24 - La traduzione delle opere di Archimede nell'edizione di Federico Commandino (1565).


OPERA ARCHI
MEDIS SYRACVSANI PHILO-
SOPHI ET MATHEMATICI INGENIOSISSIMI
per Nicolaum Tartaleam Brixianum (Mathematicarum
ſcientiarum cultorem) multis erroribus emendata, ex-
purgata, ac in luce poſita, multiſque neceſſariis
additis, quæ plurimis locis intellectu difficil-
lima erant, commentariolis ſane luculentis
& eruditiſſimis aperta, explicata atq;
illuſtrata exiſtunt, Appoſitiſq; manu
propria figuris quę gręco exem-
plari deformatę, ac deprauà
tę erant, ad rectiſſimam
Symetriam omnia in-
ſtaurata reducta
& reformata
elucent.

R V

Cum gratia & priuilegio per decennium.

Fig. 25 - La traduzione di alcune opere di Archimede nell'edizione di Niccolò Tartaglia (1543).



ARCHIMEDIS

OPERA OMNIA

CUM COMMENTARIIS EUTOCII.

E CODICE FLORENTINO RECENSUIT, LATINE UERTIT

NOTISQUE ILLUSTRAUIT

J. L. HEIBERG

DR. PHIL.

UOLUMEN I.

LIPSIAE

IN AEDIBUS B. G. TEUBNERI.

MDCCCLXXX.

Fig. 26 - La prima edizione critica delle opere di Archimede, compiuta dal filologo danese Johan Ludvig Heiberg nel 1880.

Ringraziamenti

L'autore ringrazia il prof. Pietro Nastasi per la revisione del testo e i suoi preziosi suggerimenti.