

Il periodo alessandrino

Alessandria

Intorno al 300 a.C. gli automi escono dal mito ed entrano nella storia. Il primo contesto è quello di Alessandria d'Egitto, fondata nel 331 a.C. da Alessandro Magno – in un Egitto dove «i Greci ammirano la medicina, la matematica e la geometria egiziane»¹ e dove la cultura egiziana è «almeno potenzialmente scientifica»² – e divenuta in poco tempo la più importante e ricca città del mediterraneo, con un grande porto naturale e un faro – costruito sull'isola di Pharos nel 280 a.C.³ – che non solo indicava, fino a cinquanta chilometri di distanza, la rotta alle navi che venivano a prelevare prodotti egiziani di alta tecnologia (farmaci, papiri, oggetti di vetro, metallo, profumi)⁴, ma era esso stesso un prodotto di alta tecnologia, sia per l'altezza (oltre i 130 metri) che per l'ottica utilizzata per la trasmissione a distanza della luce (50 chilometri, con un probabile uso di specchi parabolici)⁵.

*Un'incisione del
Faro di
Alessandria per il
Geographical
Dictionary (1790).*

Ad Alessandria dal 283 a.C. regna Tolomeo II Filadelfo (308-246), che ultima sia il Museo che la Biblioteca, facendo di Alessandria una città unica al





*Tolomeo II
Filadelfo,
Villa dei papiri,
Ercolano,
Museo
Archeologico
di Napoli.*

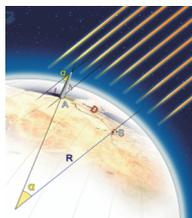
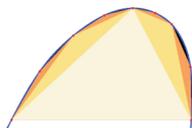
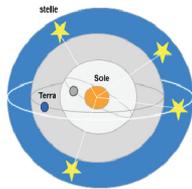
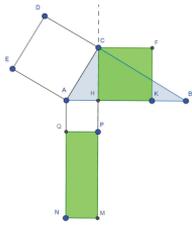
mondo, che diviene il centro culturale dell'epoca: tutti i testi che si trovavano sulle navi in arrivo ad Alessandria dovevano essere lasciati nella biblioteca in cambio di copie (si stima che la biblioteca contenesse circa mezzo milione di papiri). Il museo e la biblioteca di Alessandria attrassero per secoli le migliori forze intellettuali del mondo ellenistico, favorendone la collaborazione e gli scambi, assistendo la nascita del metodo scientifico e determinando nell'area di influenza ellenistica un incremento intenso e condiviso delle scienze e delle tecniche esatte, di cui un esempio è il meccanismo di Antikitera di cui si parlerà più avanti.

Tra il terzo secolo a.C. e il primo d.C., nell'arco di circa quattrocento anni, vissero o studiarono ad Alessandria quattro persone fondamentali per la nostra storia, che diedero un grande contributo alla scienza, non solo dell'epoca: Ctesibio (285-222 circa), Filone (280-220 circa), Archimede (287-212) ed Erone (1° secolo d.C.). Tre di loro vissero nello stesso periodo.

Per avere un'idea più generale del clima culturale e scientifico dell'epoca, sia ad Alessandria che in altre città ellenistiche, durante il regno dei primi Tolomei – tra il 305 e il 145, quando iniziò una forte persecuzione della classe dirigente greca da parte di Tolomeo VIII – vissero o risiedettero scienziati e filosofi come Euclide (323-283), autore degli *Elementi*, uno dei

*Biblioteca di
Alessandria,
ricostruzione.*



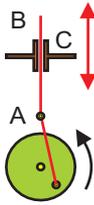


*Dall'alto:
il secondo
teorema
di Euclide,
l'eliocentrismo di
Aristarco di Samo,
la quadratura
della parabola
di Archimede,
il calcolo delle
dimensioni
della terra
di Eratostene.*

più grandi matematici di tutti i tempi; Aristarco di Samo (310-230), a cui si deve la prima teoria eliocentrica dell'antichità; Erasistrato (305-250), fondatore della scuola medica di Alessandria; Crisippo di Soli (281/277-208/204), che definì in logica le regole di inferenza; Conone di Samo (280-220 ca.), astronomo e matematico, cui Archimede dedicò la sua opera sulla quadratura della parabola; Eratostene (276-194), bibliotecario di Alessandria, il matematico che calcolò per primo le dimensioni della terra; Apollonio di Perga (262-190), che introdusse in astronomia le nozioni di epicicli e deferenti per spiegare il moto dei pianeti⁶; Ipparco di Nicea (200-120), astronomo e astrologo, che scoprì la precessione degli equinozi e inventò probabilmente l'astrolabio.

Si può paragonare Alessandria a una grande università moderna con un data center comune, come lo erano la biblioteca e il museo per gli scienziati Alessandrini. Senza forzare troppo la fantasia, possiamo immaginare la mensa della biblioteca o del museo intorno alla metà del II secolo, con Ctesibio, Filone, Archimede, Erasistrato, Crisippo, Conone e il giovane Eratostene seduti allo stesso tavolo, che conversano tra loro e scambiano informazioni "in tempo reale".

Per centosessanta anni circa (305-145 a.C.), la ricerca scientifica e culturale ellenistica visse quindi un periodo aureo, con un declino iniziato nel 212 a.C., data della conquista di Siracusa da parte del console romano Marcello e dell'uccisione di Archimede. L'espansione romana nel Mediterraneo, direttamente o indirettamente – per esempio tramite regnanti alleati come Tolomeo VIII – causò la flessione dell'attività scientifica che usava come codice la lingua greca, senza essere in grado di prenderne in mano e svilupparne l'eredità culturale. Uno degli esempi della differenza tra le due civiltà, riportato da Marcello Cini, è il paragone tra l'interscambio commerciale dei porti di Ostia e di Alessandria: nel porto di Ostia giungono navi cariche di merci provenienti da tutto l'impero, ma non riparte quasi nulla, mentre dal porto di Alessandria ripartono navi, come si è già scritto, cariche di prodotti preziosi⁷. La differenza è tra una società in cui il lavoro a costo zero della schiavitù sostituisce la ricerca di altre soluzioni e una società dove «la schiavitù era essenzialmente limitata all'ambito domestico»⁸ e si studiano in modo sistematico l'anatomia, la fisiologia, la filosofia, la logica, l'ottica, la scenografia, la geodesia, la geografia, la matematica, la meccanica, l'idrostatica, la pneumatica, l'astronomia, la botanica, la zoologia e la chimica e dove Erone, nel I° secolo d.C., può trasmettere nei suoi scritti un metodo e un elenco di invenzioni



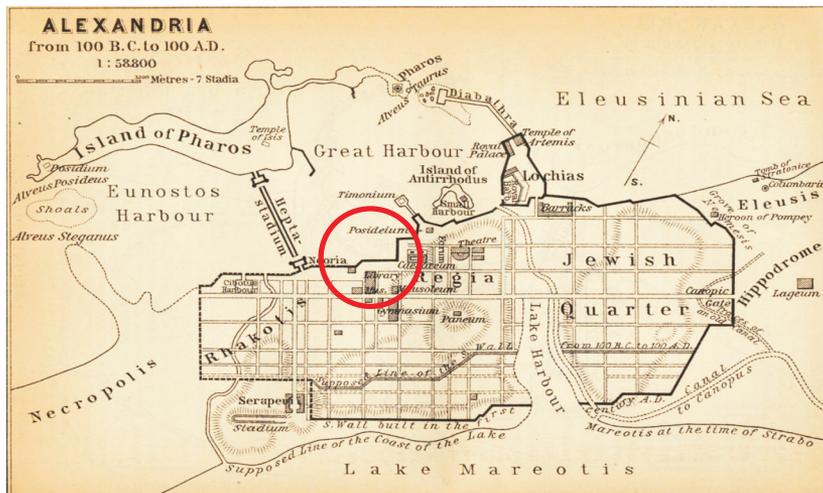
Una possibile ricostruzione del meccanismo del carro di Nysa.

L'automa di Nysa

Una ricostruzione della pianta di Alessandria tra il 100 a.C. e il 100 d.C. con l'indicazione della posizione del Museo e della Biblioteca.

ellenistiche degli anni d'oro che comprendono una quantità di dispositivi meccanici, idraulici, pneumatici come orologi, strumenti per il rilevamento, viti, cremagliere, ingranaggi moltiplicatori, catene di trasmissione, eliche, stantuffi, e utilizzano varie fonti di energia come quelle idraulica ed eolica. Tra il I e il II secolo d.C., la fine delle guerre con Roma permise una parziale ripresa della ricerca scientifica – epoca di Erone, Tolomeo (100-168) e Galeno (129-201) – e Alessandria, nonostante il declino inarrestabile, continuò ad essere il principale centro della residua attività scientifica ancora per un paio di secoli⁹. La cessazione del periodo che aveva come centro scientifico Alessandria «si pone a volte nel 415, anno in cui la matematica (pazia fu linciata ad Alessandria da una folla di fanatici religiosi cristiani)»¹⁰.

Una delle prime tracce di automi in periodo ellenistico è nel racconto di Callixeinos di Rodi, riportato da Ateneo, su una processione in onore di Tolomeo II, avvenuta tra il 280 e il 275 a.C.: «venne un carro a quattro ruote...nel quale era seduta l'immagine di Nysa (nutrice di Dioniso)...che poteva alzarsi automaticamente senza che alcuno vi mettesse mano, e dopo aver versato latte da un'ampolla d'oro si rimetteva seduta»¹¹. Un'ipotesi sul funzionamento potrebbe essere quella di un albero a camme che trasforma il moto rotatorio dell'asse posteriore del carro in un moto rettilineo verticale, con la parte anteriore della statua incernierata alla struttura fissa e la parte posteriore libera di muoversi in alto e in basso¹².



Ctesibio

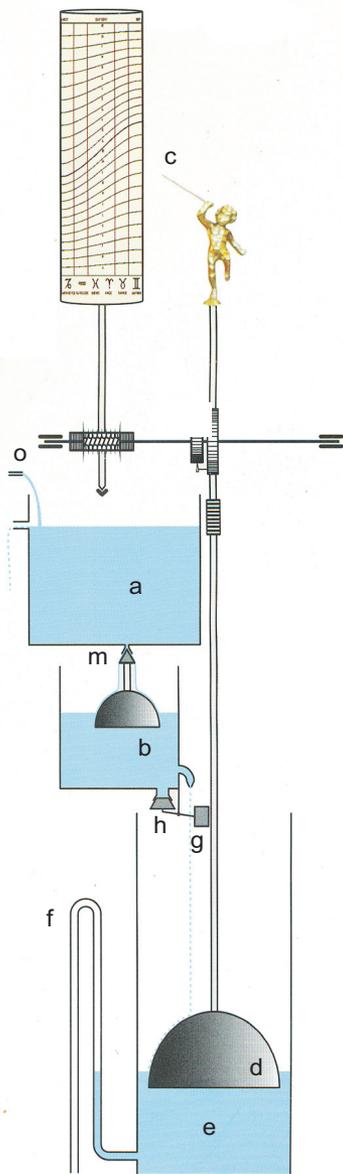
Come già sappiamo, Ctesibio visse ad Alessandria tra il 283 e il 222 a.C., sotto il regno dei Tolomei II e III. Conosciamo i suoi lavori soltanto perché sono stati ripresi da altri autori. Una sua opera, *Memorie*, è citata da Ateneo Meccanico¹³ e da Vitruvio¹⁴ (con il nome di *Commentarii*), e contiene la descrizione di vari apparecchi basati sull'uso della pressione dell'aria e dell'acqua. Secondo Vitruvio si trattava sia di strumenti utili, come orologi e pompe, sia di oggetti ludici, come «invenzioni che, partendo dal principio di un liquido spinto dalla pressione esercitata dall'aria, producono effetti simili a quelli naturali: per esempio, il canto dei merli provocato dal moto dell'acqua, le statuine che bevono e si muovono automaticamente e altri congegni la cui funzione è quella di dilettere piacevolmente la vista e l'udito»¹⁵.

Una delle invenzioni di Ctesibio è la trasformazione in orologio del classico segnatempo ad acqua, che diventa così il primo strumento di precisione per segnare lo scorrere del tempo: prima di Ctesibio i contenitori d'acqua con un piccolo foro sul fondo erano dei semplici timer, che segnalavano l'inizio e la fine di un tempo prefissato. La loro imprecisione era data dal fatto che mentre il contenitore si svuotava la pressione dell'acqua diminuiva, e quindi la velocità di svuotamento del contenitore non era costante¹⁶.

L'orologio di Ctesibio è importante non soltanto perché è uno strumento che misura il tempo in modo molto più preciso dei precedenti, ma perché segna anche altri due punti di svolta: il primo è che l'energia viene utilizzata in modo controllato, fornendo alle possibili applicazioni una forza motrice che eroga la sua potenza costantemente, e il secondo è che l'energia prodotta segue un programma predefinito. In più il funzionamento è ciclico: quando la vasca si svuota il ciclo ricomincia e il programma viene eseguito di nuovo. Adesso ci sembra tutto molto semplice, ma per quei tempi fu una grandissima conquista.

Il meccanismo dell'orologio di Ctesibio è un meccanismo dove il rapporto tra controllo dell'energia e programma/informazione è diretto. È come una leva: se spingo un braccio da un lato, l'altro lato si alza. Se spingo la leva in modo costante verso il basso, l'altro lato si alza in modo altrettanto costante. Potremmo chiamarlo il grado zero del rapporto tra controllo dell'energia e programma: da un lato della leva metto energia, dall'altro ottengo informazione. L'orologio di Ctesibio è un buon esempio del significato della parola analogico: l'informazione che si vede (l'indicazione dell'ora) è ottenuta per analogia con l'informazione prodotta dal

*Pagina accanto:
ricostruzione
dell'orologio
di Ctesibio,
da Kotsanas
[AGT], op. cit.*



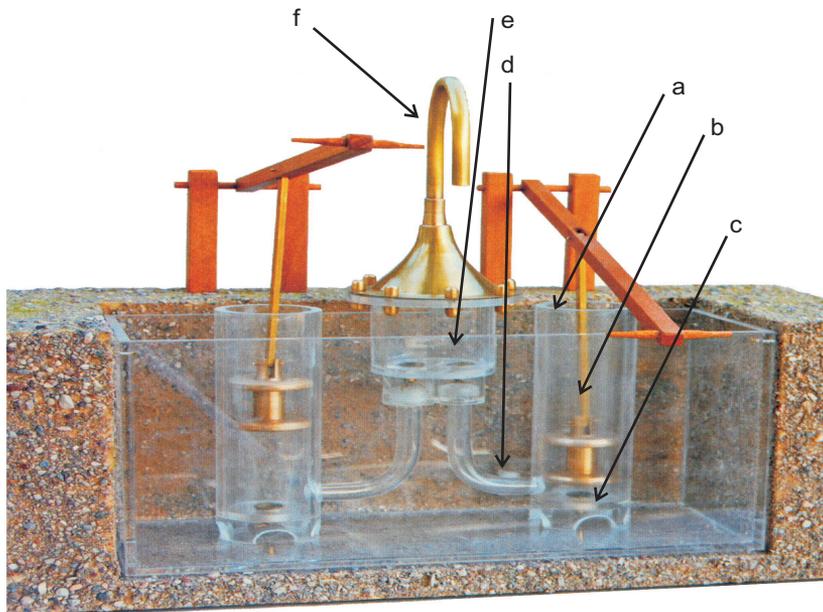
fenomeno fisico (l'acqua che alza l'astrella). Ctesibio trasformò questo apparecchio nel primo strumento di misura del tempo, grazie a vari accorgimenti, che conosciamo per essere stati descritti da Vitruvio nel *De architectura*¹⁷. L'idea essenziale fu quella di rendere costante la pressione presente nel foro di uscita, usando lo schema illustrato in figura, lasciando cioè defluire acqua da un recipiente a) in cui il livello è tenuto costante da un afflusso continuo in o). Questa soluzione tecnica¹⁸ suggerisce che il concetto di pressione idrostatica dipendente dall'altezza del liquido (già presente nel primo postulato *Sui galleggianti* di Archimede), fosse già chiaro a Ctesibio.

Il deflusso d'acqua da a) verso b) dipende dalla pressione, e così è anch'esso costante. b) scarica lentamente nel contenitore e), dove c'è un galleggiante d) che sale. Il tempo viene mostrato da una lancetta c) collegata al galleggiante d) che segue il sollevarsi del livello dell'acqua. Quando il galleggiante è salito fino a fine corsa spinge la leva g), che apre il tappo h): l'acqua riempie velocemente e), che si svuota attraverso il sifone f). In questo modo il galleggiante scende e il ciclo ricomincia. Per evitare corrosioni e calcare sui fori d'uscita, Ctesibio suggerisce di realizzarli in oro o in gemma. Gli orologi potevano includere altri meccanismi, come suonerie o automi che entravano in azione a tempi prefissati. Nel disegno dell'orologio ad acqua di Ctesibio¹⁹ è contenuto un particolare importante (che viene attribuito ad Archimede, contemporaneo di Ctesibio, in un testo arabo anonimo, tradotto in inglese da Ronald Hill²⁰). Il particolare è il galleggiante semisferico della seconda vasca, che porta in alto una valvola m) conica galleggiante. Quando b) è pieno la valvola m) chiude il foro, interrompendo il flusso d'acqua tra il recipiente a) e il recipiente b), per riaprirlo non appena una piccola quantità d'acqua passa da b) ad e), svuotando b) e abbassando il galleggiante. In questo modo il recipiente b) è sempre pieno o quasi completamente pieno.

La valvola galleggiante è uno dei primi esempi di meccanismo a retroazione, capace quindi di tenere conto dello stato dinamico di un sistema e di riportarlo alle sue condizioni iniziali. Gli orologi ad acqua di Ctesibio e di Archimede²¹, segnano una svolta nel concetto di tempo, che diventa una variabile indipendente, utilizzabile nei calcoli, con circa milleottocento anni di anticipo rispetto a Galileo, cui viene classicamente attribuito il merito di aver considerato il tempo come una grandezza matematica rappresentabile in forma geometrica, anche se egli stesso aveva studiato il trattato di Archimede *Sulle Spirali*, dove «l'asse dei tempi» è considerato uno degli enti geometrici fondamentali²².

Ctesibio inventò anche la pompa idraulica premente a doppio stantuffo e a fasi alterne, che utilizzava un meccanismo di precisione composto da cilindri, pistoni e liquidi lubrificanti – simile a quello che oggi usiamo nelle nostre automobili a combustibili fossili – per comprimere e spingere l'acqua all'interno di una tubazione²³. La pompa di Ctesibio è resa possibile dall'introduzione della valvola monodirezionale. L'acqua entra nel cilindro a), aspirata dal pistone in salita b), attraverso la valvola monodirezionale c). Quando il pistone b) scende, c) si chiude e si apre la valvola d), che fa entrare

Ricostruzione della pompa di Ctesibio, da Kotsanas [AGT], op. cit.

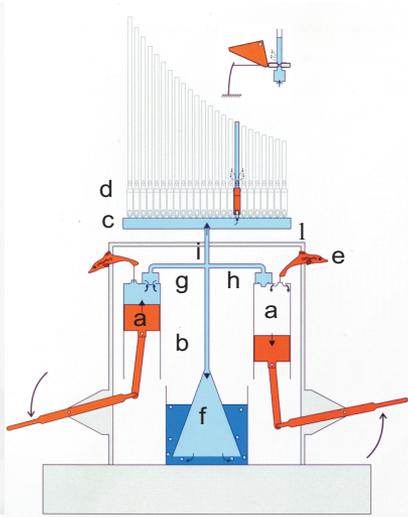


La ricostruzione dell'organo di Ctesibio secondo Kostas Kotsanas, "The musical instruments of the ancient greeks". L'organo è il precursore dell'attuale organo da chiesa e continuò a essere costruito, senza grandi innovazioni, in epoca imperiale e bizantina. Dopo mille anni, Costantino Copronimo (718-775 d.C.) regalò nel 757 uno strumento simile al re dei Franchi Pipino il Breve²⁴.

l'acqua in e) da cui uscirà attraverso f). Con due pistoni in moto alternato il flusso è continuo.

Un'altra invenzione di Ctesibio fu l'organo idraulico, il primo strumento musicale a tastiera della storia. Ha un meccanismo simile alla pompa, ma invece che acqua spinge aria, che arriva alle canne d'organo a pressione costante attraverso un sistema di stabilizzazione. L'organo di Ctesibio è composto da: a) due pompe che forniscono l'aria compressa, b) il «pnigeus» per la regolarizzazione della pressione dell'aria, c) la tastiera e d) le canne d'organo²⁵.

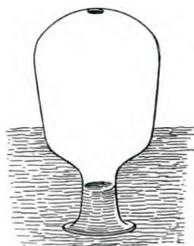
Le pompe sono poste su entrambi i lati del «pnigeus» b) e su di esse vi sono due valvole di non ritorno controllate automaticamente da due delfini di bronzo e). I pistoni sono messi in movimento alternato con l'ausilio di due leve. Il «pnigeus» è costituito da un contenitore cilindrico pieno d'acqua al cui interno c'è un imbuto affondato a forma di cono rovesciato f), montato su supporti ad una piccola distanza dal fondo. Due tubi di alimentazione dell'aria g, h) convergono nella parte superiore dell'imbuto verso un altro tubo d'aria i) che va verso il collettore della tastiera l). La stabilità della pressione dell'aria è ottenuta grazie alla fuga dell'aria dal fondo dell'imbuto, spinta dall'acqua. La tastiera è composta da ventiquattro tasti che controllano altrettante valvole di bronzo di alimentazione dell'aria poste su ventiquattro canne d'organo di lunghezza diversa, che producono due ottave complete.



Filone

Il vaso per gli esperimenti sul vuoto e l'automa servitrice di Filone da Bisanzio.

Da Carrà de Vaux, "Le livre des appareils pneumatiques de Philon de Byzance", Paris, Imprimerie Nationale, 1902.



Di Filone da Bisanzio (280 - 220 ca.) sappiamo che era allievo e successore di Ctesibio, che da Bisanzio si trasferì ad Alessandria e che nel libro *Mechanikà* descrisse macchine da guerra, la teoria delle leve, la pneumatica e molti automi. *Mechanikà* era un trattato in nove libri. Ne restano alcuni ma non il sesto, *Automatopoeica* che era interamente dedicato alla costruzione di automi meccanici.

Un suo frammento molto interessante è però trasmesso dall'opera dello stesso titolo di Erone d'Alessandria: in esso si descrivono due teatri meccanici che saranno illustrati più avanti. Nei teatri di Filone, ripresi da Erone, troveremo una delle prime soluzioni al secondo dei problemi ai quali abbiamo accennato parlando di Ctesibio: come utilizzare l'energia prodotta secondo un programma predefinito che possa essere variato. Ne parleremo più avanti raccontando l'opera di Erone.

Nel quinto libro, *Pneumatica*²⁶ – di cui rimangono sessantacinque capitoli in un testo arabo conservato a Costantinopoli²⁷, 43 fogli in un testo arabo conservato ad Oxford²⁸ e alcuni manoscritti latini²⁹ – Filone, che riprende in parte il lavoro di Ctesibio³⁰, senza citarlo, studia il vuoto e l'aria come un fluido³¹ e descrive ruote idrauliche, sifoni, macchine per il sollevamento dell'acqua, un meccanismo di sospensione cardanica³² e opere di carattere ludico. Il libro descrive vari esperimenti per dimostrare l'assenza del vuoto e la consistenza dell'aria³³: «Un vaso che sembra vuoto non lo è realmente, perché è pieno d'aria...Prendiamo un vaso vuoto con un foro sul fondo chiuso a cera, e immergiamolo in acqua, dopo averlo capovolto...Poi togliamo la cera che chiude il foro, e subito l'uscita dell'aria attraverso il foro è percepibile ai sensi»³⁴.

Tra le opere di carattere ludico, un automa umanoide, con l'aspetto di una servitrice³⁵, che tiene con la mano destra una caraffa di vino³⁶, nella cui progettazione sono presenti i concetti di valvola, pressione, sottovuoto, leva, fulcro. L'automa è messo in movimento da un ospite, nel momento in cui poggia una coppa sul palmo della mano sinistra della servitrice. La servitrice tiene nella mano destra una caraffa, e da questa mesce inizialmente del vino in modo automatico, per poi mescolarlo con acqua nella misura desiderata. La descrizione della servitrice di Filone è riportata integralmente più avanti, da pagina 161³⁷.

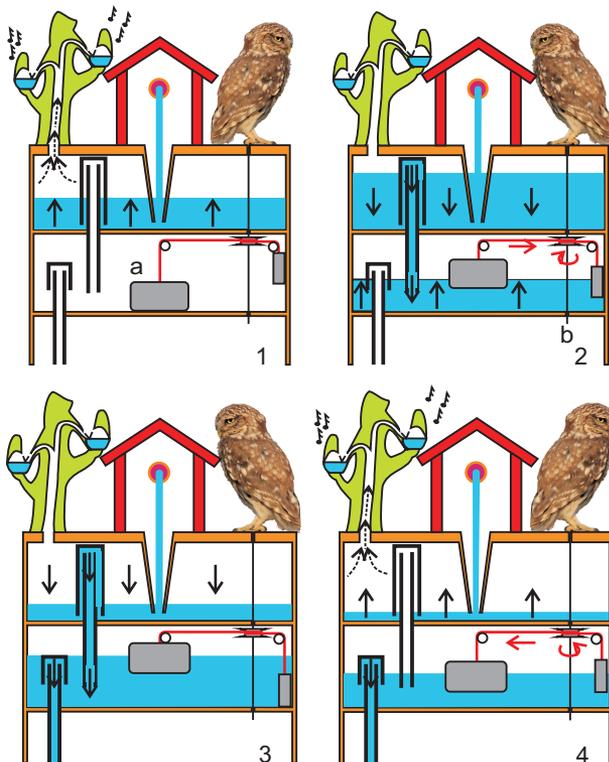
In un altro automata idraulico di Filone, ripreso da Erone³⁸, detto della Civetta, è presente anche un sifone: quando la civetta è girata di spalle gli uccelli

Pagina precedente, in basso: "La servitrice di Filone" in un'immagine da Kotsanas [AGT].

"L'automata della Civetta" di Filone da Bisanzio.

cinguettano, ma appena la civetta si gira verso di loro gli uccelli smettono di cinguettare, impauriti.

Come funziona: la sorgente d'acqua riempie la prima vasca, comprimendo l'aria che esce attraverso il cinguetto degli uccelli. Quando l'acqua raggiunge il livello del sifone, la prima vasca si svuota rapidamente nella vasca più bassa, il galleggiante a) sale e fa ruotare l'asse verticale b) che regge la civetta. Quando anche questa vasca si svuota attraverso il secondo sifone, tutto ritorna nelle condizioni iniziali e l'automata riparte. Questo automa è ciclico e richiede un apporto costante di energia, come l'orologio di Ctesibio, ma il programma che viene eseguito è più complesso: diventa una sequenza di ben sei movimenti – ognuno dei quali messo in azione dal precedente – che presuppongono conoscenze sulla pressione dei fluidi, sui sifoni, sulla meccanica. Il rapporto tra programma e richiesta di energia è aumentato rispetto al grado zero dell'orologio di Ctesibio.



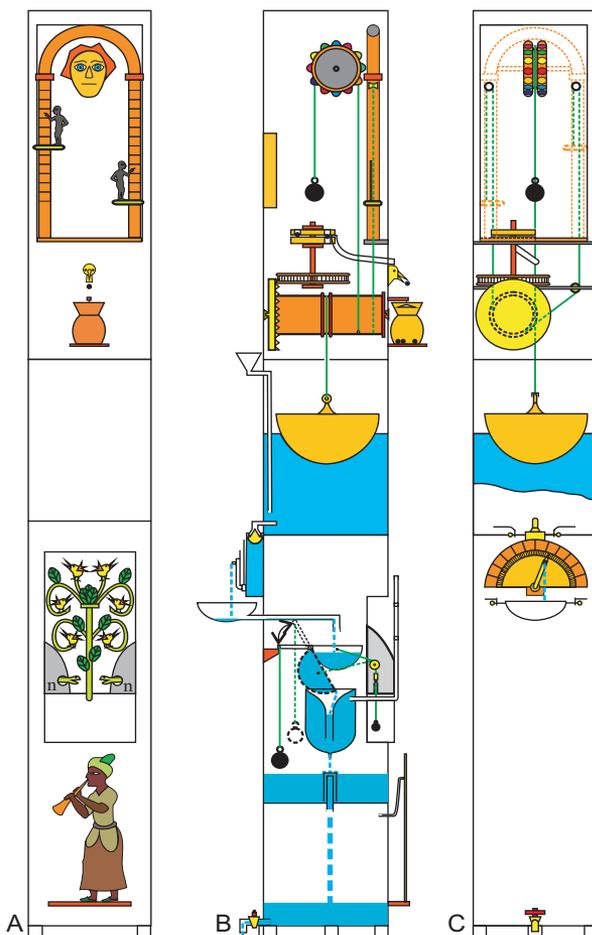
Archimede
(287ca.–212)

Archimede era contemporaneo di Ctesibio e di Filone. Visse a Siracusa e, secondo Diodoro Siculo³⁹, visitò Alessandria, dove conobbe studiosi con i quali rimase in contatto epistolare anche da Siracusa (Archimede indirizzò al matematico alessandrino Dositteo le sue opere *De Sphoera...*, *De Conoidibus...*, *De lineis spiralis*). Lucio Russo scrive che in Archimede «il salto qualitativo essenziale, dalla filosofia naturale alla scienza, è già compiuto»⁴⁰. Plutarco racconta che «Archimede scrisse una volta al Re Gierone, amico e parente suo, che, con una data forza, possibile è di smuovere qualsiasi dato peso: e millantandosi sulla sicurezza della dimostrazione, s'avanzò a dire che, s'egli avesse un'altra terra, passando esso in quella, gli darebbe l'animo di smuovere questa. Meravigliatosi di ciò Gierone, il pregò di far vedere in opera un sì fatto problema, e di mostrare mossa da una piccola forza una gran mole. Per lo che Archimede, comperata una grossa nave da carico e fattala trarre a terra con gran fatica e a forza di mano, e caricatala di peso e di molti uomini, sedendo egli in disparte e movendo non già con violenza, ma agiatamente colla propria mano un principio di argano a molte funi, la fece scorrere per terra con tutta placidezza e senza rimbalzi, non altrimenti che se fosse andata per acqua»⁴¹. Aristotele⁴², al contrario, aveva scritto che, data una forza che muove un peso dato in un tempo dato, non è vero che metà della stessa forza sarà capace di muovere metà dello stesso peso nello stesso tempo, perché se così fosse, «un uomo solo muoverebbe una nave...»⁴³. Da queste due opposti modi di vedere, Russo ricava «il salto di qualità della scienza ellenistica rispetto alla filosofia naturale aristotelica»⁴⁴: Aristotele deduce «affermazioni quantitative su particolari fenomeni fisici direttamente da principi filosofici generali», e «non può usare né il metodo dimostrativo né l'esperimento, perché non ha, né vuole costruire, una teoria scientifica», mentre Archimede «avrebbe progettato, all'interno della sua teoria della meccanica, un congegno (con vantaggio meccanico elevato) che... usava proprio quella divisione della forza che Aristotele aveva giudicato impossibile». La macchina di Archimede «era un modo chiarissimo di dimostrare la superiorità del metodo "scientifico"... sulla filosofia naturale... il salto di qualità permesso dalla scienza consiste nel fatto che si calcola teoricamente il vantaggio meccanico e si ha quindi, per la prima volta, una progettazione teorica di macchine»⁴⁵. E infine: «...in quell'epoca, forse grazie ad Archimede stesso, fu introdotto per la prima volta l'elemento tecnologico che ancora oggi usiamo per risolvere problemi simili: la ruota dentata»⁴⁶.

L'orologio ad acqua di Archimede.

Ad Archimede è attribuito un orologio ad acqua basato su un ciclo di dodici ore. Vari oggetti vengono messi in movimento automaticamente: ogni ora gli occhi della testa ruotano, cambiando colore; due figure, che indicano le ore già passate e le ore restanti, salgono e scendono lungo le colonne poste ai lati della testa; una sfera metallica passa per il becco di un corvo e cade in un recipiente, producendo un suono; due serpentelli escono ed entrano da una montagna spaventando alcuni uccelli posti su un albero, che cinguettano impauriti; un flautista suona il suo strumento.

L'orologio ad acqua di Archimede:
 A: vista anteriore
 B: sezione laterale
 C: in alto: vista interna posteriore, in basso: vista esterna posteriore (L'orologio è descritto nel dettaglio nel riquadro più avanti).
 Questa immagine dell'orologio di Archimede è stata ridisegnata per una maggiore chiarezza di esposizione partendo dai disegni riportati da D. R. Hill in Hill [CWC].

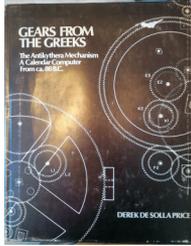


Il meccanismo di Anticitera

Cosa succede alla scienza alessandrina dopo il 145 a.C., anno in cui Roma manda avanti la sua politica di espansione nel mediterraneo e iniziano le persecuzioni dei greci? C'è un ritrovamento archeologico importante che, insieme alle macchine di Ctesibio, Filone ed Erone, cambia la visione tradizionale del periodo ellenistico, che tramandava l'idea che scienza e tecnologia avessero fatto in quel periodo un brusco passo indietro. Un giorno del 1900 alcuni pescatori di spugne, costretti – a causa di una tempesta – a rifugiarsi a ridosso dell'isola greca di Anticitera, scoprirono, al largo dell'isola, il relitto di una nave, risalente al I sec. a.C. e naufragata intorno al 60 a.C. La nave trasportava statue, gioielli, contenitori in vetro, anfore e ceramiche, oggetti perfettamente riconducibili al periodo storico a cui la nave apparteneva, ma nel 1902 un parlamentare greco, Spyridon Stais, notò tra i reperti anche un oggetto ricoperto da calcificazioni, delle dimensioni di una scatola da scarpe, che inglobava un meccanismo complesso. Gli archeologi che lo esaminarono – in accordo con il pensiero dell'epoca – ritennero impossibile che fosse di periodo ellenistico, come le statue trovate all'interno della nave: all'inizio del '900 l'idea che l'ellenismo potesse aver sviluppato una tecnologia complessa era impraticabile. Per 50 anni, fino al 1951, il meccanismo di Anticitera restò un'anomalia irrisolta: nessuno studioso riusciva a datarlo, e i più pensavano che fosse parte di un complesso astrolabio, o di un planetario, finito lì per qualche strano motivo⁴⁸.

Meccanismo di Anticitera, Museo archeologico nazionale, Atene.



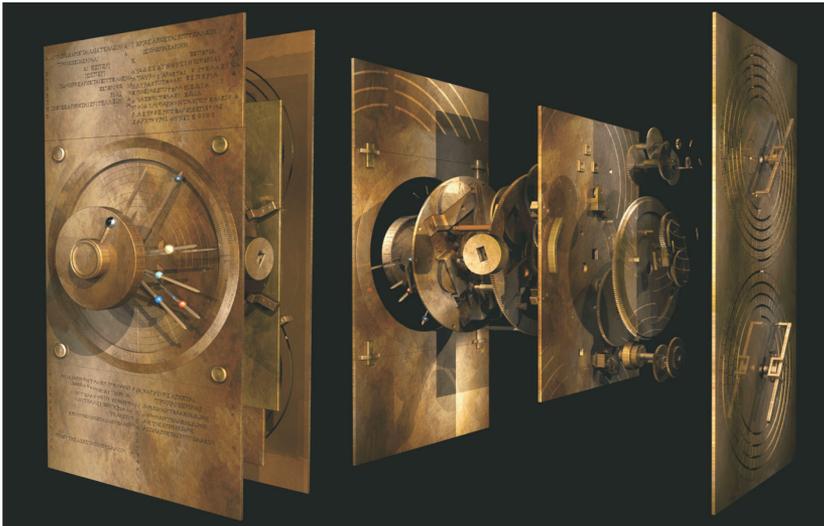


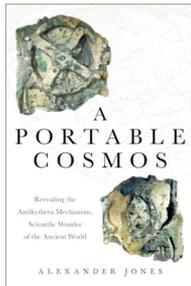
“Gears from the Greeks”, pubblicato da Derek de Solla Price nel 1974.

Meccanismo di Anticitera, ricostruzione virtuale.

Nel 1951 Derek de Solla Price, uno storico della scienza dell'Institute of Advanced Study di Princeton, iniziò a studiare il meccanismo e nel 1974 pubblicò uno studio in cui descrisse gli ingranaggi ed il numero preciso dei denti delle 27 ruote dentate. Partendo dal conteggio dei denti per capire cosa veniva calcolato dal meccanismo, l'ipotesi di Price fu che potesse trattarsi di un calendario lunare metonico basato su un ciclo di 19 anni o quasi 235 mesi lunari. Il calendario prende il nome dall'astronomo Ateniese del V° secolo Metone, ed è usato ancora oggi per determinare la data del capodanno ebraico (Rosh Hashanah). Price scoprì sulla superficie del meccanismo una serie di iscrizioni che non riuscì a decifrare, e ipotizzò che il meccanismo usasse un differenziale, cuscinetti a sfera e ingranaggi epicicloidali, il cui nome deriva dal fatto che il loro movimento è simile a quello che si supponeva avessero i pianeti del sistema solare nello schema attribuito ad Apollonio di Perga (290-190) e ripreso dal sistema tolemaico, in cui si congetturava l'esistenza di percorsi epiciclici. Non ci sono esempi di differenziali, ingranaggi epicicloidali o di cuscinetti a sfera nella tecnologia occidentale per almeno 1500 anni dopo il meccanismo di Anticitera.

Nel 2005 l'astrofisico Mike Edmunds e il matematico Tony Freeth iniziarono ad occuparsi di Anticitera proponendo nuove indagini, l'utilizzo di tecnologie come il *microfocus X-ray* e il *digital imaging RTI* e creando un



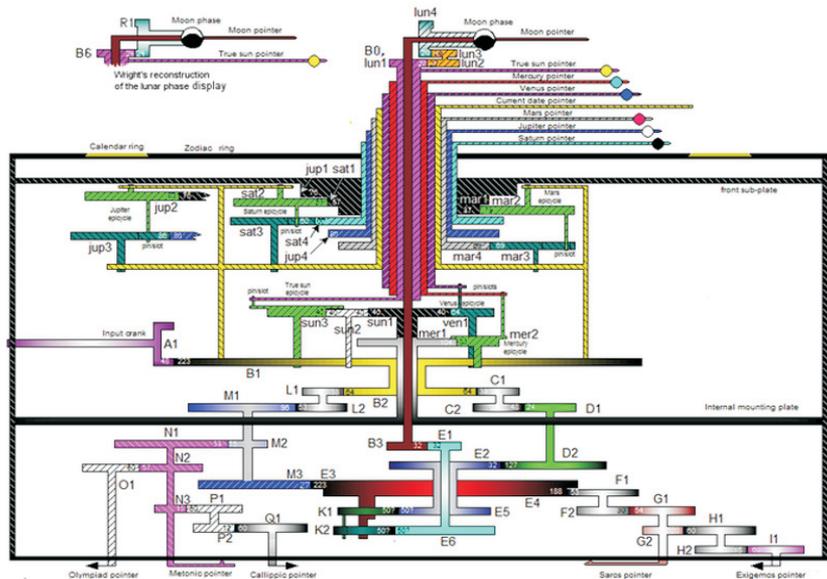


Alexander Jones, "A portable cosmos", Oxford University Press, 2017.

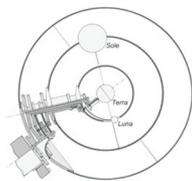
Schema del meccanismo di Anticitera, Freeth e Jones, 2012.

gruppo di ricerca dedicato, l'AMRP (Anticitera Mechanism Research Project). AMRP esaminò il meccanismo, eseguendo elaborazioni 3D a raggi X con una serie di scansioni TAC. Con questi mezzi le iscrizioni vennero decifrate, rivelandosi essere un manuale di istruzioni inciso sulle tavole esterne, e tutti i piani del meccanismo furono evidenziati, così da rendere possibile l'osservazione dei dettagli di ogni ruota. Il risultato è che il meccanismo di Anticitera calcola con precisione sia il moto lunare, in base alla teoria astronomica più avanzata del II secolo a.C., attribuita a Ipparco di Rodi, che i cicli solari, le eclissi lunari e solari e, probabilmente, il moto dei pianeti conosciuti all'epoca: Mercurio, Venere, Marte, Giove e Saturno. Le iscrizioni nascoste tra i meccanismi indicano i mesi con nomi che suggeriscono una origine corinzia (Corinto fu distrutta nel 146 a.C. dai Romani) e quindi lo datano e suggeriscono che forse fu costruito per essere usato in una delle colonie Greche.

In una delle colonie Greche, Siracusa, visse Archimede, ucciso alla fine dell'assedio del 212 a.C. Il generale romano che sconfisse Siracusa, Marcello, portò con sé come proprio bottino un solo oggetto, così prezioso da essere preferito a tutto il tradizionale bottino di guerra: un planetario⁴⁹. Non era il meccanismo di Anticitera, che fu costruito decenni dopo la morte di



Schema di planetario



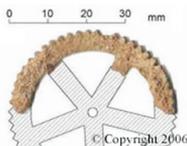
Archimede, ma quest'oggetto suggerisce l'idea di una tradizione manifatturiera di strumenti meccanici di alta precisione cui forse prese parte Archimede stesso.

Il ritrovamento di un oggetto reale come il meccanismo di Anticitera non lascia dubbi sull'esistenza di una tecnologia di alto livello nella Grecia di 2.300 anni fa, ed è una scoperta che rivoluziona la storia: non c'è traccia del raggiungimento di questo livello tecnologico nei ritrovamenti del periodo ellenistico precedenti la scoperta. Eugenio Lo Sardo scrive, nell'introduzione a *Eureka, il genio degli antichi*: «è un oggetto talmente raffinato e complesso che non può essere unico, né la creazione di un singolo. Dietro quei meccanismi si cela un universo di sapienti meccanici, di arti, di tecniche, di matematici e di astronomi che lavorano gomito a gomito»⁵⁰.

Il cambio del modo di pensare all'ellenismo dovuto al ritrovamento di Anticitera è anche un buon esempio di trasformazione Kuhniana di un paradigma, nel senso ampio di trasformazione dell'insieme di credenze condivise da un gruppo di scienziati in un certo periodo della loro storia: il paradigma con cui si guardava all'ellenismo nel 1901, "*ellenismo non ha prodotto scienza e tecnologia*", incontra un'anomalia (il meccanismo di Anticitera) che viene rigettata da tutti i membri del gruppo di osservatori qualificati come un evento impossibile da registrare all'interno del sistema di credenze condivise. Si apre quindi una fase pre-paradigmatica (in cui alcuni scienziati fanno varie ipotesi sulla natura dell'anomalia) finché non si arriva a una nuova visione delle cose, al nuovo paradigma, "*ellenismo ha prodotto scienza e tecnologia*", che in questo caso è antitetico rispetto al paradigma precedente)^{51,52}.

La ruota dentata di Olbia

*In basso:
frammento
di meccanismo
ritrovato ad Olbia.*
© G. Pastore.



Un secondo piccolissimo oggetto retrodata la disponibilità di tecnologia che è stata resa visibile dal meccanismo di Anticitera. Nel luglio del 2006 viene ritrovato ad Olbia, durante uno scavo di materiale databile al 150 a. C., un frammento di una ruota dentata di ottone, paragonabile alle ruote del meccanismo di Anticitera e che si pensa dovesse essere parte di un oggetto analogo.

Il profilo dei denti ha una curvatura particolare, che rende l'ingranaggio tecnicamente perfetto. Gli stessi denti, ricostruiti al computer, mostrano una precisione altissima (intorno ai tre centesimi di millimetro) e un profilo curvo identico a quello dei denti moderni, che sono disegnati partendo da una funzione matematica che rende l'ingranamento molto fluido, come se chi ha realizzato questo profilo avesse delle conoscenze mate-

matiche che sono state messe a punto da Eulero nel 1700, ben venti secoli dopo.

Un secondo aspetto notevole della ruota dentata di Olbia è la lega metallica: non di bronzo come nel meccanismo di Anticitera ma di ottone. Più adatto del bronzo per un meccanismo, ma di più difficile realizzazione, sarebbe la testimonianza di un rapido decadere delle capacità tecnologiche greche: tra il periodo in cui fu realizzata la ruota dentata ritrovata ad Olbia e il meccanismo di Anticitera⁵³.

Erone
d'Alessandria

Erone d'Alessandria è l'ultimo costruttore di automi Alessandrino di cui è rimasta traccia. Il secolo in cui visse (I° d.C.) è stato individuato datando al 13 marzo del 62 d.C. un'eclissi di Luna da lui osservata. Era un matematico e un ingegnere meccanico greco, insegnante di materie tecniche nel prestigioso Museo di Alessandria. Il periodo in cui visse è quello del tardo ellenismo, dopo la conquista romana, durante il quale la Biblioteca di Alessandria sopravviveva alle persecuzioni iniziate nel 145 a.C., circa duecento anni prima.

Erone ebbe a disposizione i testi originali di Ctesibio, Filone, Euclide, Archimede e degli altri scienziati Alessandrini, che per noi sono invece in gran parte perduti. Ha un grande valore come scienziato e un eccezionale valore come fonte, perché le sue opere gli sono in gran parte sopravvissute, sono state riprese dal mondo arabo e sono state una delle basi principali della rivoluzione tecnologica europea: di Erone sono rimasti vari testi, tra cui la *Metrica*, la *Mechanica*, la *Pneumatica*⁵⁴ e l'opera *Sulla costruzione di automi*^{55,56}.

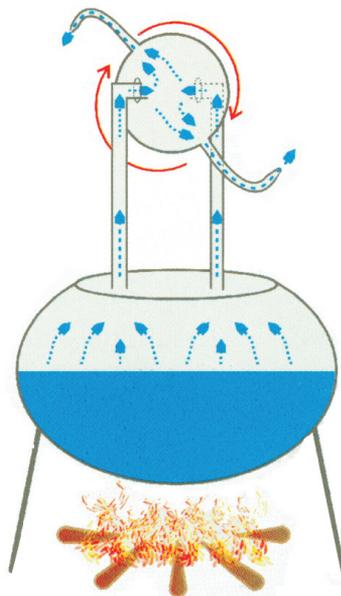
La convinzione diffusa nella cultura europea dell'originalità della tecnologia di Erone, se fosse vera, darebbe la «conseguenza che la civiltà europea moderna, per sviluppare la propria tecnologia, non abbia saputo far di meglio, per secoli, che continuare ad attingere idee dal lavoro isolato di un antico costruttore di giocattoli»⁵⁷. Più verosimilmente, Erone è riuscito a trasmettere a una distanza di milleottocento anni sia le conoscenze scientifiche create ad Alessandria tre secoli prima di lui che le proprie ricerche e invenzioni, in una forma ludica e stupefacente che probabilmente è stata una delle chiavi che hanno permesso ai suoi testi di superare indenni secoli difficili. La traduzione e la scoperta delle opere di Erone nel mondo europeo di millecinquecento anni dopo ha comunque portato alla paradossale considerazione che «la conoscenza di molti elementi tecnologici abbia preceduto qualsiasi loro applicazione utile»⁵⁸.

Nella geometria, Erone espone brillanti soluzioni a problemi di misurazione, come calcolare superfici e volumi di oggetti diversi, o come misurare le distanze avvalendosi di uno strumento, l'odometro, che equivale al nostro moderno contachilometri⁵⁹.

Nella pneumatica descrive numerosi dispositivi azionati dalla pressione dell'acqua, del vapore e dell'aria compressa. Il più famoso di questi, l'eolipila, mostra come trasformare l'energia da termica in meccanica sfruttando la pressione derivante dal riscaldamento di acqua all'interno di un contenitore metallico (moto a reazione). La sfera può ruotare attorno ad un asse orizzontale. Riempito di acqua, lo si riscalda e, quando il liquido raggiunge una temperatura elevata, il getto del vapore entra all'interno della sfera ed esce dai fori posti all'estremità dei tubicini laterali, ponendo in rotazione la sfera stessa. Il verso del moto è naturalmente opposto a quello dei getti. E' la prima macchina a vapore di cui si abbia notizia⁶⁰.

Uno dei suoi libri più famosi è *Il trattato di meccanica*, pervenutoci in traduzione araba, dove Erone sistema gli aspetti teorici e pratici della materia, riconducendola alle cinque macchine semplici: leva, argano, carrucola, vite e cuneo.

L'eolipila di Erone. Immagini da Kostas Kotsanas, "Ancient Greek technology", op. cit.



Nella sua opera *Sulla costruzione di automi* illustra due teatri meccanici: un teatro “statico” e un teatro “mobile” (I due teatri sono descritti in dettaglio più avanti). Le macchine erano programmabili, e il “motore” era un peso che scendeva a ritmo costante dentro una clessidra a sabbia. I due teatri venivano messi in movimento tirando un semplice filo. Negli automi di Erone la programmazione fa un salto in avanti: in questi automi non ci sono ruote dentate, che costringerebbero ad un movimento ciclico, mentre il sistema adottato, di fili collegati da un lato al peso-motore e dall'altro ad assi di legno ruotanti, permette, come si può vedere nella pagina che segue, una programmazione libera. Il vantaggio è poter scegliere tempi e movimenti, cosa impensabile in un meccanismo ciclico, mentre lo svantaggio è il dover ricaricare tutto il sistema ad ogni rappresentazione.

Il teatro statico di Erone. Immagini da Kostas Kotsanas, “Ancient Greek technology”, op. cit.

Nel teatro statico, in cinque quadri, le scene in movimento rappresentavano la storia della vendetta di Atena e di Nauplio contro gli Achei per la morte di Palamede. Lo spettacolo, automatizzato, durava una decina di minuti. In sequenza: gli Achei riparano le navi (si sente il rumore degli strumenti), mettono le navi in acqua, affrontano il mare grosso e un gruppo di delfini esce dal mare; Nauplio manda falsi segnali di fuoco agli Achei, le loro navi naufragano e Aiace Telamonio nuota, mentre Atena appare, attraversa la scena e sparisce.

Il teatro mobile, su ruote, si muoveva autonomamente, fermandosi davanti agli spettatori e mettendo in scena una festa dedicata a Bacco: si accendono i fuochi sugli altari, Bacco versa del vino, le Baccanti iniziano a danzare attorno al tempio al suono di cimbali e tamburi, mentre dallo spazio tra le colonne portanti escono festoni, e la statua di Bacco gira su se stessa insieme alla Vittoria alata posta sulla cima del tempio.

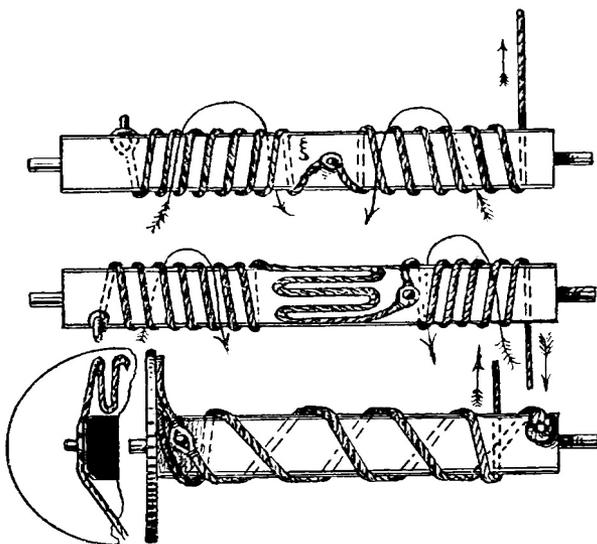


Il teatro mobile di Erone. Immagine da Kostas Kotsanas, op. cit.



L'asta orizzontale cilindrica programmabile di Erone applicata al movimento delle ruote del teatro mobile. In questo caso permette di programmare il movimento avanti-indietro e di decidere i tempi tra i due movimenti. L'asta di Erone è l'antenata dei rulli programmabili del Rinascimento.

Nei teatri descritti da Erone è contenuto un contributo fondamentale per la storia della programmazione. Nel teatro statico, tra un atto e l'altro le porte si chiudono e si riaprono, e i personaggi si muovono raccontando una storia. Filone ne parla come uno dei tanti teatrini di quel periodo, simili per lo schema meccanico. Come si è detto, il motore è per entrambi i teatri un peso che scende all'interno di un tubo pieno di sabbia, con un piccolo foro sul fondo, come una grande clessidra. La velocità di discesa è costante e la dimensione del foro regola la velocità stessa. La parte più interessante è la programmazione: il cavo che è legato al contrappeso è avvolto intorno a un'asta orizzontale cilindrica, dove sono inseriti dei pioli. Avvolgendo il cavo intorno a un piolo e poi girandolo nel verso opposto sul piolo successivo, e lasciando una lunghezza di cavo variabile tra un piolo e l'altro, l'asta orizzontale girerà in un senso o nell'altro, con tempi diversi in funzione della lunghezza di corda lasciata tra i pioli. Erone riesce così ad aprire e chiudere le porte, a cambiare scenografia, a muovere i personaggi e a produrre effetti speciali sorprendenti. L'asta orizzontale di Erone è di grande importanza per la storia della programmazione: è il primo programmatore di una sequenza on-off, e unisce un'estrema semplicità di funzionamento con una grande efficacia nella possibilità di programmare. L'asta è la matrice del tamburo programmabile che verrà usato da Leonardo e rappresenta anche la

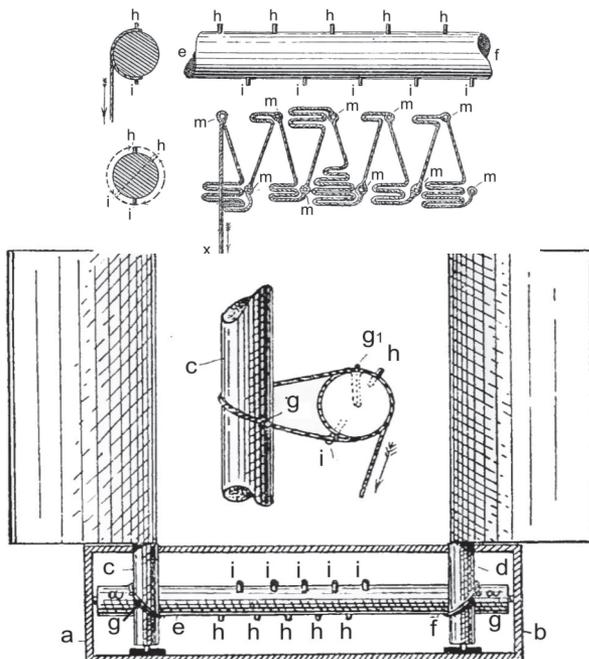


differenza tra il sapere empirico e quello scientifico, tra un prodotto che risolve un determinato problema eseguendo una sola istruzione, frutto di un'abilità artigiana, e un prodotto che permette a chiunque di programmare qualsiasi movimento. Mentre il meccanismo di Anticitera è un prodotto straordinario ma non ha generato simili, non conteneva un programmatore e pochi erano capaci di replicarlo, l'asta di Erone ci ha permesso di arrivare ai computer. Nata nel 250 a.C., l'asta programmabile si trasforma nel 1500 nel tamburo meccanico di Leonardo, diventa nel 1600 il programmatore della tastiera musicale di Salomon de Caus, nel 1700 il motore dell'automata flautista di Vaucanson, nel 1800 il programmatore dei telai meccanici di Jacquard e poi il lettore delle schede perforate dei pianoforti automatici e della macchina analitica di Babbage, cioè di uno dei primi computer⁶¹.

Il periodo che abbiamo descritto nelle pagine precedenti, che va da Ctesibio ad Erone, passando per Filone, Archimede e per una serie di altri scienziati, tecnici del sapere pratico e artigiani – che sappiamo essere stati numerosi e di cui abbiamo alcuni prodotti, ma non il nome, come nel caso del meccanismo di Anticitera o

Il metodo scientifico

L'asta orizzontale cilindrica programmabile di Erone applicata al movimento di apertura delle porte del teatro statico. In questo caso permette di programmare il movimento di apertura e chiusura attraverso una catena legata ai due assi e di decidere i tempi di apertura e chiusura tra i due movimenti. Immagine da Wilhelm Schmidt, op. cit.



della ruota dentata di Olbia – è il periodo alessandrino della storia degli automi. Per fare il punto, quali sono gli strumenti e le tecniche di cui il mondo dei “meccanici” costruttori di automi può disporre, alla fine di questo periodo che copre quattro secoli, dal 300 a.C. al 100 d.C. circa? Il primo è l'uso di un metodo, il metodo scientifico, e a seguire una serie di teorie scientifiche, di tecniche e pratiche progettuali, di modalità comportamentali (progettare da principi primi, usare il metodo deduttivo, prevedere e verificare il risultato, scandire e misurare il tempo e lo spazio, utilizzare meccanismi di temporizzazione e di retroazione, conoscere il comportamento dei materiali e di alcune leghe, lavorare in gruppo, pubblicare e scambiare informazioni in modo trasversale), di tecniche meccaniche (le ruote dentate, gli alberi a gomito, i cilindri, i pistoni e la loro lubrificazione, gli ingranaggi epicicloidali, i cuscinetti a sfera etc.), idrauliche e pneumatiche (le pompe alternate, il sifone, la valvola a pressione, la trasformazione dell'energia termica in meccanica, la capacità di trasformare il peso di una colonna d'acqua in energia meccanica etc.), di un supporto fisico valido come il papiro per la trasmissione delle informazioni (la matematica mesopotamica, che aveva a disposizione soltanto tavolette di argilla, dove era difficile che la punta del compasso restasse ferma, dovette basarsi su metodi numerici e non geometrici, a differenza di quella alessandrina)⁶² e per finire la possibilità di attingere e scambiare informazioni tra tutte le discipline che si sviluppavano nello stesso periodo, utilizzando gli stessi codici nello stesso contesto, sia direttamente che attraverso i testi: i papiri di medicina, fisica, ottica, filosofia, logica, matematica, astronomia, geodesia, geografia, musica, meccanica, idrostatica, pneumatica erano scritti in greco e disponibili nella stessa sede dove lavoravano o avevano lavorato i loro autori.

Cosa significa usare un “metodo scientifico”? Significa mettere a punto un metodo generale, cioè non applicabile soltanto a un singolo problema, avendo come oggetto su cui il metodo lavora enti astratti (per esempio i concetti di punto, linea e superficie o di forza massa e accelerazione), con una teoria che abbia degli assiomi di base che riguardano gli enti (per esempio i postulati di Euclide o le leggi di Newton), da cui, usando un metodo deduttivo (dimostrazione e calcolo) e utilizzando come procedura di controllo il metodo sperimentale per verificare l'applicabilità della teoria, si possono eseguire un numero illimitato di esercizi, si possono cioè risolvere innumerevoli problemi concreti. Diversa è la sapienza empirica, che trova in molti casi soluzioni simili (più o

meno approssimate) agli stessi problemi, ma con metodi che possono essere applicati solo in quella circostanza e per quel problema e da quella persona, per esempio usando il metodo delle approssimazioni successive «senza che le regole usate vengano giustificate» e dove «la correttezza delle soluzioni aveva come unico fondamento l'esperienza e la tradizione»⁶⁴.

Sembra innegabile che ciò che è successo nel periodo ellenistico è l'inizio della costruzione di tutti gli elementi necessari per un paradigma scientifico forte, talmente forte che, nonostante i testi ellenistici siano stati ridotti in gran parte a brandelli (letteralmente, alcuni papiri sono stati rinvenuti in sepolture usati come carta straccia), o bruciati, nonostante l'incompetenza e gli errori materiali degli amanuensi (spesso incompetenti in materia) sui manoscritti conservati, nonostante siano stati tramandati più facilmente testi scritti in un «linguaggio ancora comprensibile nella tarda antichità e nel medioevo, quando la civiltà era regredita al livello prescientifico»⁶³, nonostante i reperti archeologici siano pochissimi e in pessime condizioni, nonostante siano passati secoli tra il momento della scrittura e il momento della riscoperta, il corpus di conoscenze che ha avuto come centro Alessandria ha resistito, divenendo la base dello sviluppo tecnologico europeo. Una domanda che è facile trovare in molti testi che si sono occupati di ricostruire la storia degli automi e che sembrerebbe mettere in luce la presenza di un'anomalia è: «perché, pur avendo sviluppato un metodo scientifico e una tecnologia raffinata, i greci del periodo ellenistico hanno utilizzato molte di quelle conoscenze per creare una serie di macchine inutili, come gli automi?». Scrive Salvatore Settis: «Le conoscenze scientifiche non bastano da sole a produrre sviluppo tecnologico e a innestarlo sui processi produttivi, a meno che non intervengano stimoli e incentivi socialmente legittimati. L'introduzione di innovazioni tecnologiche nel mondo antico fu di norma occasionale e fragile, anche perché non vi si diffuse mai l'idea (per noi scontata) che l'uso intensivo di tecnologia produca ricchezza. La mancanza di una chiara legittimazione sociale delle innovazioni tecnologiche, e cioè di un quadro istituzionale e professionale che assicurasse la comunicazione e la diffusione della tecnologia (e cioè di uno "snodo" fra scienziati e società) spiega la lentezza con cui le innovazioni circolavano al di fuori del contesto in cui erano nate. Forse dunque dovremo studiare su tavoli separati da un lato la storia delle speculazioni meccaniche e tecnologiche e dei loro successi, e dall'altro quella dei freni che ne impedirono la diffusione capillare»⁶⁵.

Per analogia, se tra duemila anni qualcuno dovesse ricostruire la storia del nostro uso del software, che impieghiamo in gran parte per realizzare giochi e prodotti industriali di largo consumo più o meno utili, potrebbe chiedersi, in un futuro ipotetico contesto in cui le guerre siano bandite da un millennio e l'obiettivo sociale più importante sia divenuto la ricerca della felicità umana e non la ricerca finalizzata alla produzione industriale e all'accumulazione di denaro, come mai, nonostante oggi si disponga di tanto metodo e di tanta tecnologia, nella nostra epoca si siano prodotte un'infinità di cose "inutili" o addirittura "dannose", come per esempio i missili balistici o ennesime generazioni di telefonini, invece che usare tutta la potenza metodologica e di calcolo per raggiungere condizioni di vita più serene su tutto il pianeta.

Per capire le finalità e le ragioni degli antichi greci mi sembra sia quindi necessario girare lo sguardo e osservare con attenzione le differenze tra il nostro attuale sistema di valori portanti e quello completamente diverso di duemila anni fa.

Se quindi l'osservazione dell'anomalia della creazione di "macchine inutili" ha come risultato la consapevolezza di un cambio di paradigma tra il modo in cui si guardava alla tecnologia nel mondo ellenistico e il modo in cui si guardava e si guarda alla tecnologia nel mondo occidentale post-medievale, scoprendo due sistemi di valori personali, economici e sociali completamente diversi, sembra che la domanda: "perché i greci hanno prodotto macchine inutili" perda senso e andrebbe piuttosto cambiata piuttosto con la domanda: "qual'è la differenza tra i valori portanti del nostro e del loro sistema culturale, economico e sociale". Si potrebbe, per esempio, provare a chiedersi il perché dell'affermazione di Plutarco «la meccanica...tenuta fu lungo tempo in dispregio dalla filosofia»⁶⁶.

I Romani

Alessandria venne conquistata dai Romani nel 31 a.C. e poi dagli Arabi nel 640 d.C. In questo periodo la biblioteca prese probabilmente fuoco più volte, e la città visse una serie di lotte intestine tra i suoi abitanti, che erano sempre stati di varia provenienza e cultura. Questi fatti portarono a un declino della grande vivacità culturale dei primi secoli dopo la fondazione, in un contesto dove, per fortuna, i testi dei classici greci erano stati fissati dai filologi Alessandrini.

Come vennero usate dai Romani le conoscenze Alessandrine? Lucio Russo scrive che «per descrivere il livello dell'interesse romano per il metodo scientifico potrebbe essere sufficiente ricordare che non abbiamo

notizia di tentativi di tradurre gli Elementi di Euclide prima del VI secolo d.C.»⁶⁷, mentre «Plinio, che dedica molte pagine della sua opera a una descrizione della vita delle api, avendo evidentemente letto qualcosa sul motivo della forma esagonale delle celle dei favi, sostituisce le complesse argomentazioni scientifiche con la spiegazione seguente, che gli appare certo più semplice: "Ogni cella è esagonale, perché ognuna delle sei zampe dell'ape ha fatto un lato"⁶⁸ e ancora «nell'opera di Vitruvio l'idrostatica di Archimede viene ridotta alla scoperta che, immergendo un corpo in una vasca piena, ne trabocca una quantità di liquido eguale al corpo immerso»⁶⁹. Per Seneca invece: «il vino colpito dal fulmine si congela, tornando allo stato liquido dopo tre giorni, dopo di che uccide o rende pazzo chi lo beve»⁷⁰, mentre Varrone, considerando gli scritti di Teofrasto (sull'agricoltura), dice che essi erano «non tam idonei iis qui agrum colere volunt quam qui scholas philosophorum»⁷¹. «Perché i libri di Teofrasto, che esponevano tra l'altro i principi in base ai quali era stata riformata la viticoltura in tutto il mondo ellenistico⁷², vengono considerati da Varrone libri filosofici privi di utilità pratica? Evidentemente perché Teofrasto espone teorie. Varrone, che è stato probabilmente il maggiore degli eruditi romani, è respinto da tali opere, che non capisce, e ne inquadra il contenuto nell'ambito dell'unica teoria di cui conosce l'esistenza: la filosofia. Varrone è un esponente di una cultura prescientifica, del tutto estranea alla scienza». Scrive ancora Russo: «Non si tratta naturalmente di limiti personali, ma di una conseguenza inevitabile dell'assenza del concetto di modello teorico»⁷³.

Riprendendo l'uso del concetto di paradigma in senso ampio, come lo usava Kuhn, è come se i Romani si fossero trovati davanti al mondo ellenistico come davanti a una gigantesca anomalia e, non sapendo comprenderla e integrarla, l'avessero, con forza e disinvoltamente, rimossa.

Note:

- 1) Herod. II, 109; Diod. Sic. I, 8, in S. Donadoni, *Il retaggio egizio*, p. 49, in Eureka, il genio..., Electa, Napoli, 2005.
- 2) Donadoni, *Ibidem*, p. 48.
- 3) Un'intervista all'archeologo J. Y. Empereur, direttore del Centre d'études alexandrines, sui reperti del faro di Alessandria: www.youtube.com/watch?v=_IcyNHS-uPg
- 4) Marcello Cini, *Prefazione a Lucio Russo, La rivoluzione dimenticata*, Feltrinelli, Milano, 2009, p. 10.
- 5) Misura di Ibn al-Saoj, da Filippo Coarelli, *Il Faro di Alessandria*, in *Eureka...*, op. cit., p. 88.
- 6) Il moto epicicloidale dei pianeti in un video: www.youtube.com/watch?v=LrsMOMekWAK
- 7) Marcello Cini, *Ivi*.
- 8) Marcello Cini, *Ivi*.
- 9) Lucio Russo, *La rivoluzione dimenticata*, Feltrinelli, Milano, (V^a), 2009, 30.
- 10) *Ivi*.
- 11) Ateneo, V, 198 f. da M. Pugliara, *Il mirabile e l'artificio*, L'erma di Bretschneider, Roma, 2003, p. 43
- 12) «L'albero a camme (ossia un meccanismo che, mediante un eccentrico, permette di trasformare un moto circolare in un moto lineare alternato) è usato da Erone, per esempio nell'organo a vento... (Erone, *Pneumatica*, I, xliii). Esso è stato tuttavia a lungo attribuito al medioevo europeo o alla Cina». Lucio Russo, op. cit., p. 157 n. 124.
- 13) Ateneo, *De Machinis*, 29, 10.
- 14) «Reliqua, ..., qui cupidores erunt eius subtilitates, ex ipsius Ctesibii commentariis poterunt invenire ». Vitruvio, *De architectura*, X, vii, 5.
- 15) Vitruvio, *De architectura*, X, xii, trad. it. di L. Migotto, Studio Tesi, Roma, 1990, pp. 491-492.
- 16) Un video sull'orologio ad acqua di Ctesibio, realizzato dal Museum of Ancient Greek Technology di Pyrgos, Grecia: www.youtube.com/watch?v=s9i5ny9NBOU.
- 17) Vitruvio, *De architectura*, IX, ix. <https://archive.org/stream/dellarchitettura02vitr#page/276/mode/2up>
- 18) Lucio Russo [Russo RD], p. 129.
- 19) Ricostruito da Kostas Kotsanas, *Ancient Greek Technology*, Kotsanas, Pyrgos, 2011, p. 21.
- 20) «Then a float is made...(and) in the center of its surface is a sort of swelling like a knob ». Donald R. Hill, *On the construction of water-clocks*, p. 13, Turner & Devereux, London, 1976. Vitruvio invece attribuisce a Ctesibio la regolazione del flusso d'acqua con queste parole: «si predispongano due coni, uno pieno e l'altro cavo, lavorati al tornio in modo che possano entrare l'uno nell'altro combaciando perfettamente cosicché, facen-

Mosaico rinvenuto nel 1852 nella villa romana di Nennig, in Germania, con scene di musica, caccia e lotta tra gladiatori. Una moneta di Commodus (coniata nel 192) trovata sotto il mosaico durante il restauro, ha permesso di datare la costruzione della villa tra la fine del II e l'inizio del III sec d.C.

doli aderire o lasciandoli alzati sia possibile regolare con maggiore o minor veemenza il flusso dell'acqua nel vaso». Vitruvio, *De architectura*, IX, viii, 6, trad. it. di L. Migotto, Studio Tesi, Roma, 1990, pp. 491-492. Il meccanismo di Ctesibio descritto da Vitruvio sembra una valvola che una volta regolata rimanga fissa, mentre il meccanismo di Archimede riportato da Donald Hill è una valvola galleggiante autoregolantesi.

21) Donald R. Hill, [CWC].

22) Lucio Russo [Russo RD], pp. 130-131.

23) «Insequitur nunc de Ctesibica machina, quae in altitudinem aquam educit, monstrare...» Vitruvio, *De architectura*, X, vii, 1-3.

24) Moretti, *L'organo italiano*, Musicale Eco, 1997, p. 43.

25) Erone, *Pneumatica*, I, 42, in W. Schmidt, *Herons von Alexandria, Druckwerke und automatentheater*, Leipzig 1899, pag. 193; Vitruvio, *De Architectura*, X, viii.

26) Carra de Vaux, *Le livre des appareils pneumatiques et de machine Hydrauliques par Philon de Byzance*, Paris, 1902. Il libro si fonda sul manoscritto arabo 3713 della Biblioteca di Santa Sofia di Costantinopoli.

27) Biblioteca di Santa Sofia di Costantinopoli, *Libro di Filone sugli apparecchi pneumatici*, ms arabo 3713 (65 capitoli). Nella stessa biblioteca, l'ms arabo 2755 con-



*Il mosaico
dell'organista
e del suonatore
di corno
testimonia
di una tradizione
costruttiva
che ai tempi
della
realizzazione
del mosaico
si protraeva
da più
di 400 anni.*

tiene, oltre a una copia della *Pneumatica* di Filone, il testo della *Meccanica* di Erone di Alessandria.

28) Biblioteca Bodleiana dell'Università di Oxford (in arabo, n° 954, Marsh 669, fol. da 49 a 92).

29) Valentin Rose pubblica il documento in latino *Liber Philonis de ingeniis spiritualibus* nel suo *Anecdota graeca et graeco-latina*, vol II, Berlino, 1870.

30) Carra de Vaux sintetizza così i lavori di Ctesibio, Filone ed Erone: «nel complesso, secondo i documenti arabi, questo è ciò che sembra essere: una vasta sintassi meccanica, di cui Ctesibio aveva posto le basi, e che fu sviluppata con maggior successo da Filone da Bisanzio. Il lavoro di Filone avrà poi avuto diverse riscritture critiche, la principale delle quali appartiene alla scuola di Erone».

31) In quegli anni Erasistrato di Ceo fonda la scuola medica Alessandrina. Ritiene che gli atomi, costituenti essenziali del corpo, siano resi vitali dall'aria (pneuma) capace di circolare nelle arterie.

32) Che verrà ignorato da Erone e dagli scrittori di meccanica successivi e attribuito al matematico Girolamo Cardano (1501-1576). Carra de Vaux, [AP], p. 12 e meccanismo 56.

33) «Molti termini tecnici del libro non sono di origine



araba: molti sono di origine aramaica, altri persiani, ed un piccolo numero di origine greca: sembra che la meccanica greca sia passata attraverso il territorio persiano prima di approdare in quello arabo...e che la versione araba del libro di Filone risalga all'inizio del movimento scientifico che ebbe luogo sotto il califfo al-Mamun». Carra de Vaux, [AP], p. 16.

34) Carra de Vaux, [AP], p. 99.

35) Fontana della servitrice, cap. 30 del manoscritto 27-55 di Santa Sofia (5° del Filone di Oxford).

36) Una ricostruzione di questo automa è in Kotsanas [AGT], pp. 52-53.

37) Il testo di Filone è in Carra De Vaux, op. cit., pp. 135-137.

38) Erone di Alessandria, *Spirituali, tradotti in lingua volgare da Alessandro Giorgi di Urbino*, Urbino, 1592.

39) G. Compagnoni, *Biblioteca storica di Diodoro Siculo*, Tomo secondo, Libro V°, Cap.XV, p. 355, Sonzogno, Milano, 1820; «ed è singolarmente ammirabile il modo, con cui quelle ridondanti acque s'estraggono adoperando le chiocciole, che chiamansi egizie; e che Archimede inventò nel viaggio, ch'egli fece in Egitto».

40) Lucio Russo [LRD], p. 45.

41) Plutarco, *Vite degli uomini illustri*, Tomo II, Sonzogno, Milano, 1824, p. 456.

42) Aristotele, *Physica*, VII, 5, 250a.

43) Lucio Russo [LRD] p. 42.

44) *Ibidem*, pp. 43-44.

45) *Ibidem*, p. 97.

46) *Ibidem*, p. 98.

47) Un video sull'orologio ad acqua di Archimede, realizzato dal Museum of Ancient Greek Technology di Pyrgos, Grecia: [youtube.com/watch?v=L8Keq2eOGEo](https://www.youtube.com/watch?v=L8Keq2eOGEo)

48) Un video sul meccanismo di Anticitera realizzato da N. Kurmar, 2016, per Ancient Greek Inventions: <https://m.youtube.com/watch?v=JiZtZgjcbyE>

49) Cicerone, *De re publica*, I, XIV.

50) Eugenio Lo Sardo, [EG], p. 13.

51) Thomas Kuhn, [SRS].

52) Guido Accascina [TS], p. 12.

53) Fonte: Geasar e Soprintendenza per i beni archeologici delle provincie di Sassari e Nuoro.

54) Nel 1575 il trattato di Erone sulla *Pneumatica* fu tradotto in Latino da F. Commandino (Heronis Alex. *Spiritium liber*, Urbino, 1575). Nel 1589 fu pubblicato in traduzione italiana da G. B. Aleotti (*Gli artificiosi et curiosi moti spiritali di Herrone*, Ferrara, 1589). Nel 1592 *Gli spiritali* di Herone Alessandrino furono tradotti anche da Alessandro Giorgi (Urbino, 1592).

- 55) B. Baldi, *Di Herone Alessandrino De gli automati, ovvero machine semoventi*. Gir.mo Porro, Venezia, 1589.
- 56) Wilhelm Schmidt, *Herons von Alexandria, Druckwerke und Automatentheater*, Teubner, Lipsia, 1899
- 57) Lucio Russo, [RD], p.164.
- 58) Lucio Russo, [RD], p.164.
- 59) <http://redi.imss.fi.it/invenzioni/index.php/Odometro>
- 60) Cfr. anche Bennet Woodcroft, *The pneumatics of Hero of Alexandria*, Taylor Walton and Maberly, London, 1851, section 50, *The steam engine*.
- 61) L'asta e i meccanismi a srotolamento dei teatri di Erone sono letti da alcuni storici come una regressione rispetto al meccanismo di Anticitera, che era complesso e ricco di ingranaggi ma che non era programmabile: scrive per esempio Lucio Russo, nel libro *La rivoluzione dimenticata*: «Quando Erone, nella sua opera *Sulla costruzione di automi*, deve trasferire il moto da una ruota all'altra, non usa mai ingranaggi, ma esclusivamente dispositivi a frizione». Continua Russo: «La cosa diventa facilmente comprensibile se si suppone che alla sua epoca fosse difficile procurarsi non solo viti metalliche, ma anche ruote dentate». L'asta di Erone è in realtà sia un programmatore che un esecutore, invece che esclusivamente un esecutore, com'è una ruota dentata, mentre i "meccanismi a frizione" sono meccanismi a srotolamento, il cui moto – a differenza delle ruote dentate – si interrompe in modo programmato quando il cavo di traino viene interamente srotolato. Erone stesso descrive i teatri come esempi di una tipologia di macchine programmabili: «con gli stessi principi si otterranno risultati applicabili anche in altre circostanze...» (v. p. 204).
- 62) Lucio Russo, [LRD], pp. 65-66.
- 63) Lucio Russo, *ibidem*, p. 25.
- 64) Lucio Russo, [LRD], p. 51.
- 65) Salvatore Settis, *Archeologia delle macchine*, in *Eureka!... op. cit.*, p. 36.
- 66) Plutarco, *Vite degli uomini illustri*, Tomo II, Sonzogno, Milano, 1824, p. 456.
- 67) Russo, [LRD], pp. 271 segg.
- 68) Plinio, *Naturalis historia*, XI, § 29.
- 69) Vitruvio, *De architectura*, IX, §§ 9-12.
- 70) Seneca, *Naturales quaestiones*, II, xxxi, § 1 e liii, § 1.
- 71) «Questi libri sono più utili per coloro che frequentano le scuole dei filosofi che per chi vuole coltivare la terra». Varrone, *De re rustica*, I, V, §§1-2.
- 72) Teofrasto, *De causis plantarum*, III, 11.1-16.4.
- 73) Russo, [RD]. pp. 271 segg.