

1. Calcolatori meccanici

Paolo Giangrandi

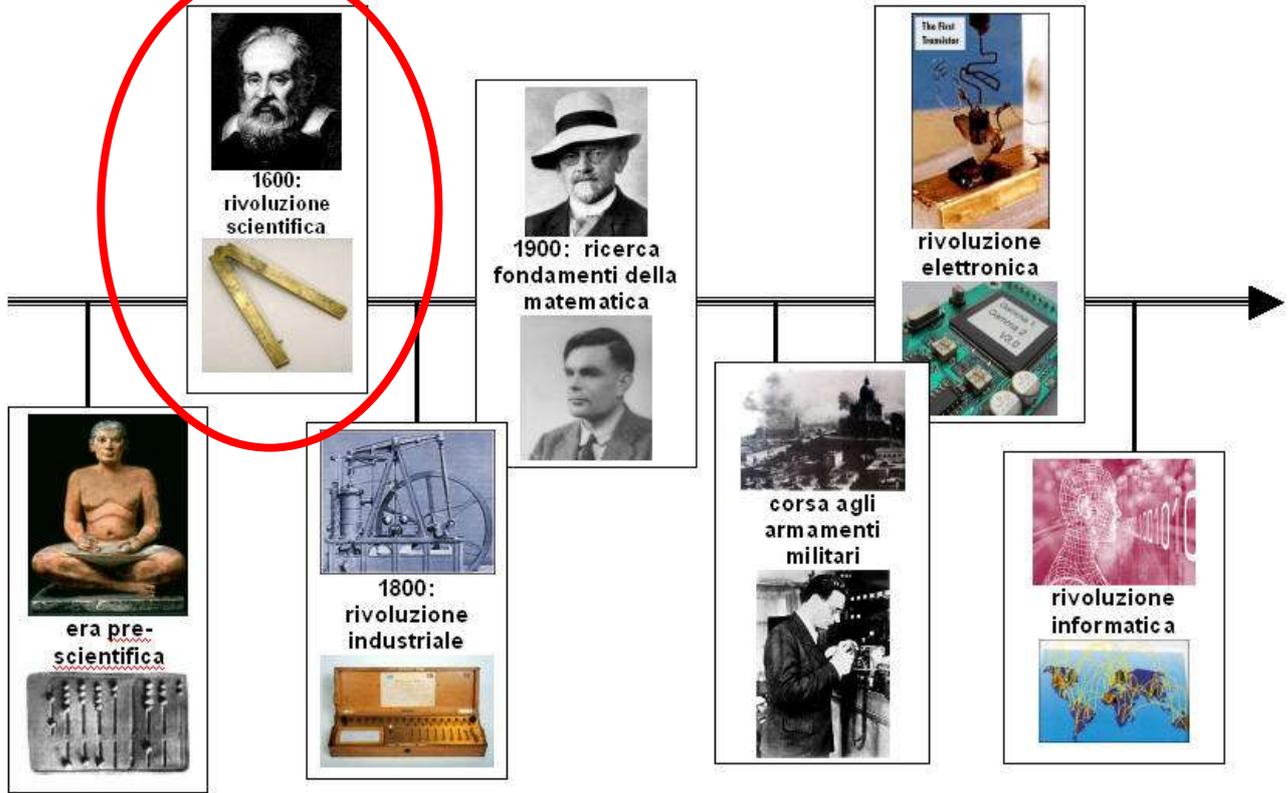
paolo.giangrandi@dimi.uniud.it



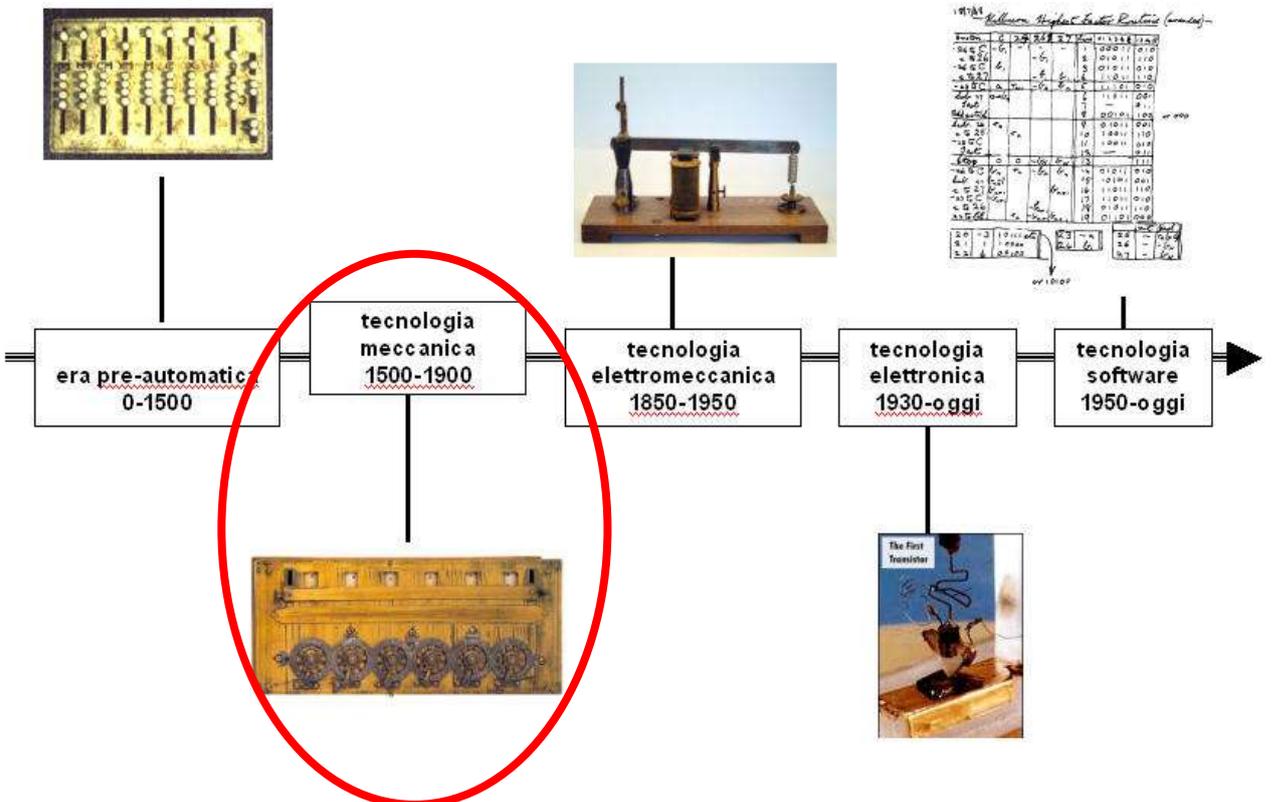
Sommario

1. Calcolatori meccanici.....	1
1.1. Introduzione.....	4
Il contesto storico: Dal Rinascimento alla Rivoluzione Scientifica.....	4
Nuovi strumenti di calcolo	14
Calcolatori analogici vs calcolatori digitali.....	17
1.2. Primi calcolatori meccanici analogici.....	24
Regoli graduati	25
Compasso di Galileo	29
Compasso di proporzione.....	35
Regolo calcolatore logaritmico	38
1.3. Primi calcolatori meccanici digitali	50
La tecnologia dell'orologio meccanico	51
Orologi e calcolatori meccanici.....	53
Ruota dentata e calcolo meccanico	54
Il problema del riporto	57
L'addizionatrice di Schickard	60
L'addizionatrice di Pascal	65
Leibniz e l'automazione della moltiplicazione.....	71
1.4. Macchine calcolatrici nella Rivoluzione Industriale	85
L'Aritmometro	85
La ruota moltiplicatrice di Odhner	88
L'inserimento dei numeri nella calcolatrici.....	91
Calcolatrici meccaniche scriventi.....	95
1.5. Il calcolo scientifico e l'analizzatore differenziale ..	96

1. L'informatica attraverso la storia della scienza e della tecnica

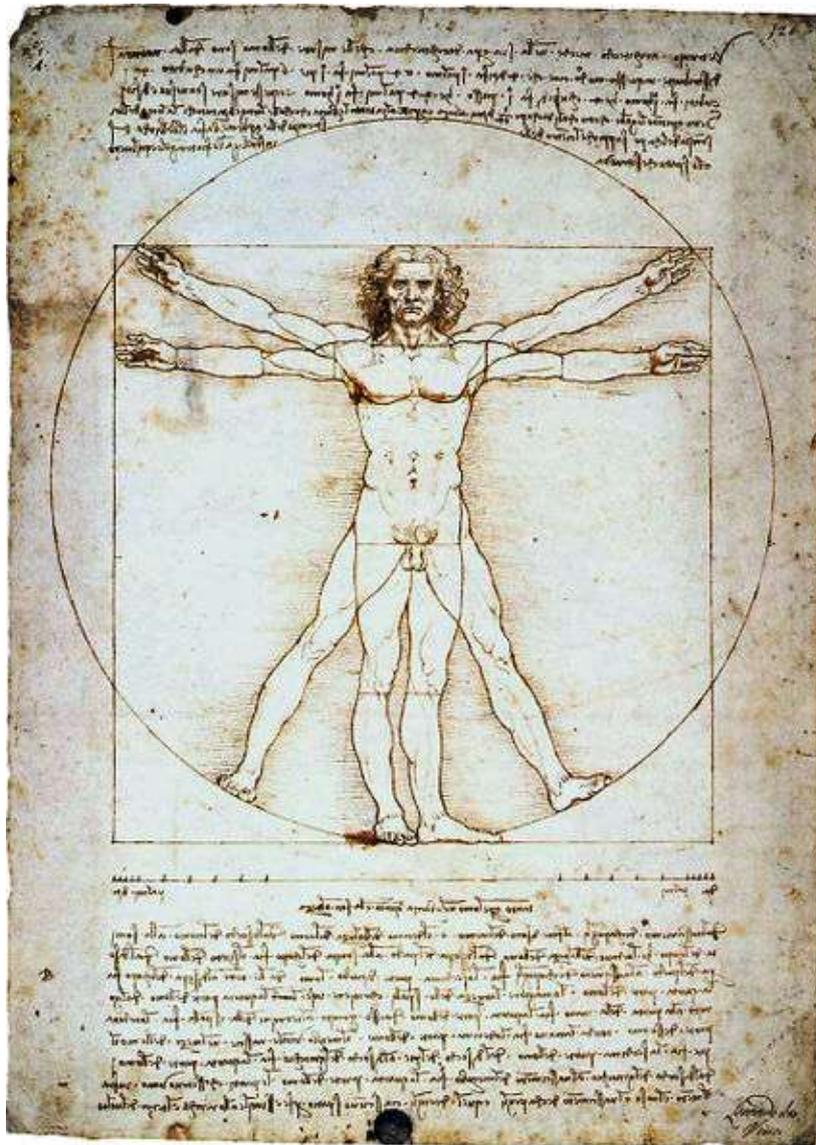


2. Storia dell'informatica: L'evoluzione tecnologica



1.1. Introduzione

Il contesto storico: Dal Rinascimento alla Rivoluzione Scientifica



L'uomo vitruviano di Leonardo da Vinci (1452-1519).

Mentre il pensiero dell'uomo medioevale è esclusivamente rivolto al mondo religioso al cui centro è ovviamente posto Dio, l'uomo rinascimentale si pone pro-

gressivamente al centro dell'universo e come misura di tutte le cose.

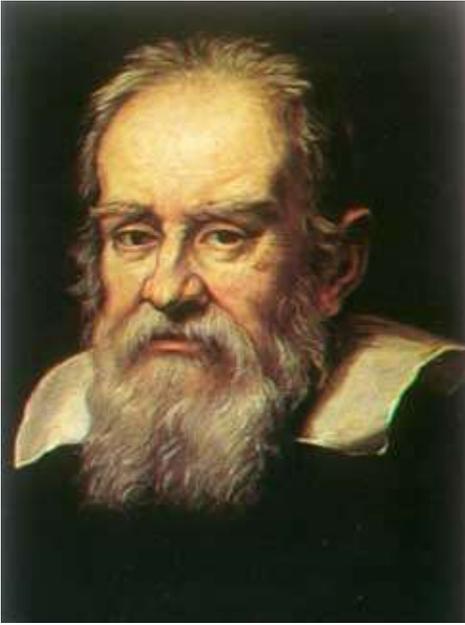
Scienziati e scoperte



Niccolò Copernico (1473 - 1534): sistema eliocentrico

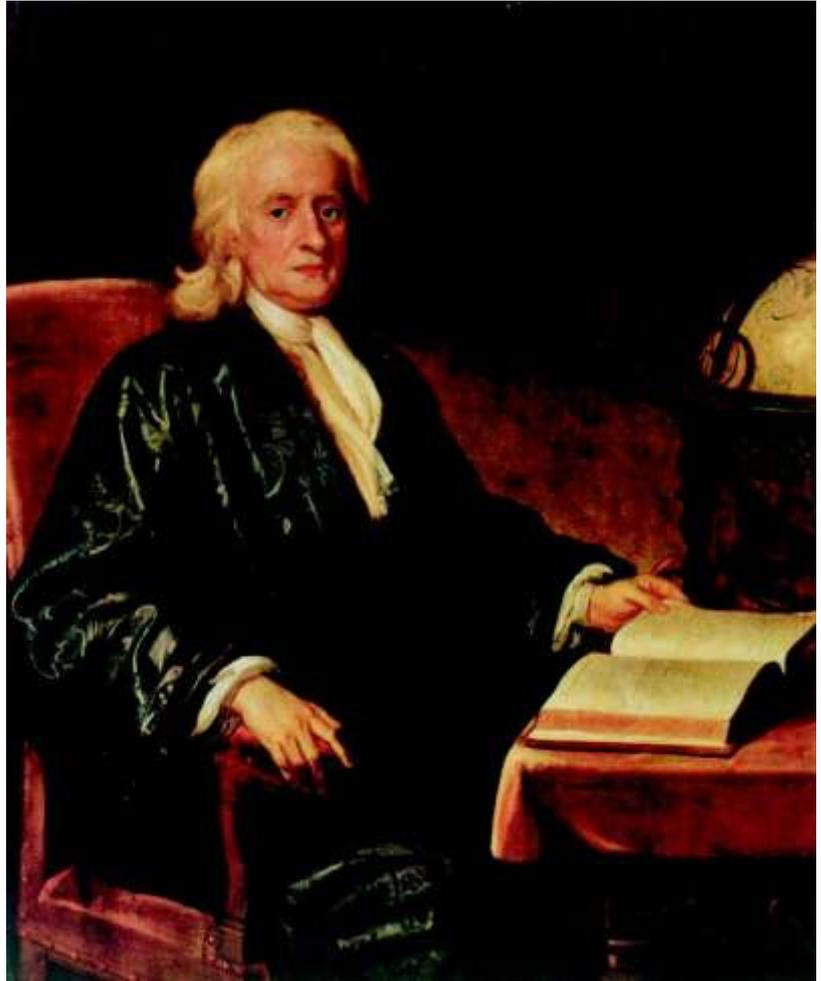


Keplero (1571-1630): le tre leggi dei moti dei pianeti



Galileo Galilei (1564-1642): inizia la scienza moderna di tipo sperimentale.

La filosofia è scritta in questo grandissimo libro che continuamente ci sta aperto innanzi a gli occhi (io dico l'universo), ma non si può intendere se prima non s'impara a intender la lingua e conoscer i caratteri, ne' quali è scritto. Egli è scritto in lingua matematica, e i caratteri son triangoli, cerchi, ed altre figure geometriche, senza i quali mezzi è impossibile a intenderne umanamente parola; senza questi è un aggirarsi vanamente per un oscuro laberinto.
(Galileo Galilei, Il Saggiatore)



Isaac Newton (1642-1727): la gravitazione universale e la prima impostazione sistematica della fisica moderna.

Il rinnovato interesse per il campo scientifico-tecnologico (astronomia, ottica, ecc.) determinò l'esigenza di fare calcoli sempre più complessi.

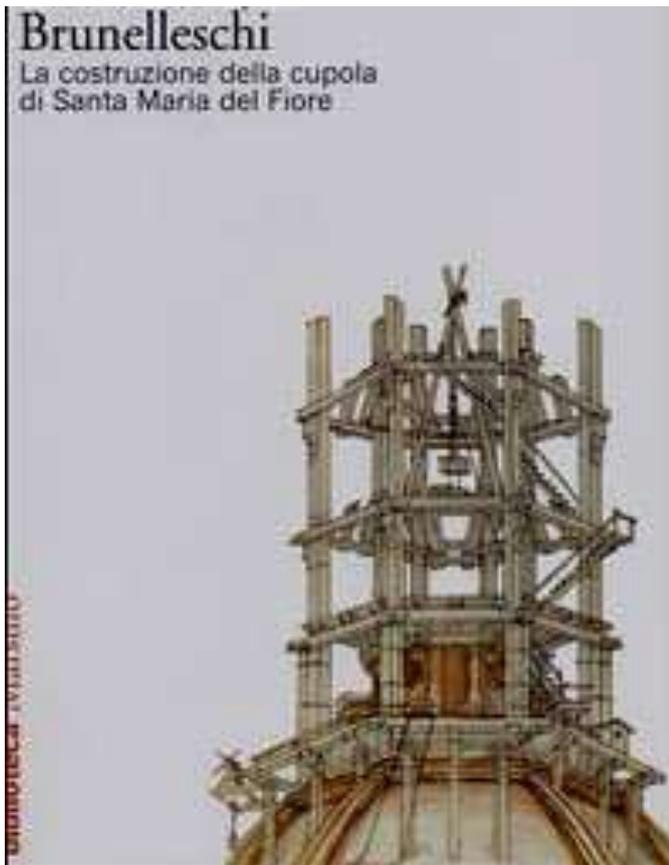


Il telescopio: nel 1609 Galileo Galilei inizia a compiere le prime osservazioni astronomiche con il telescopio.

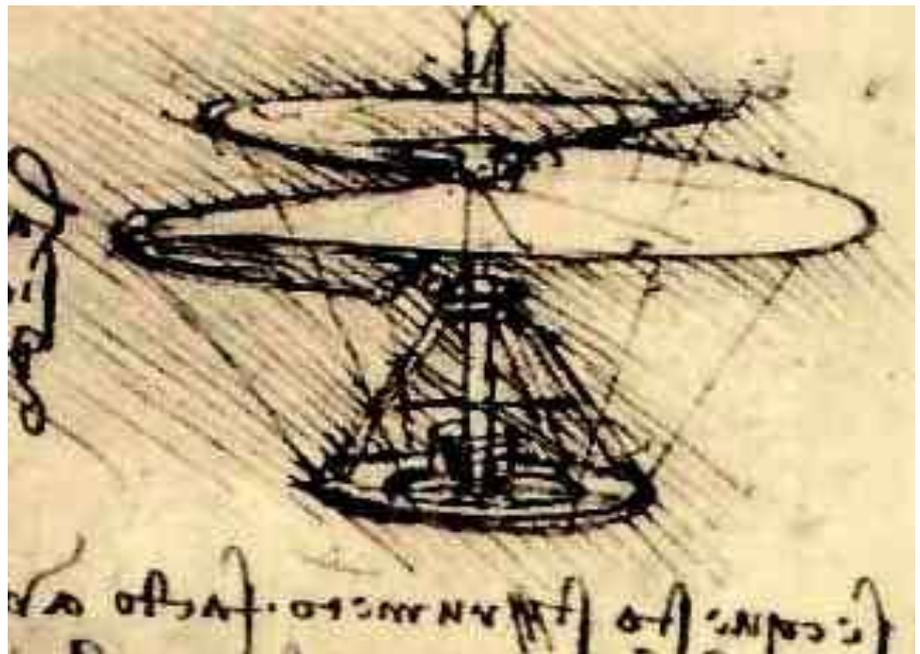


A partire dal 1673 Anton van Leeuwenhoek (1632-1723) inizia ad effettuare le prime osservazioni sistematiche con il microscopio.

Applicare la scienza al mondo

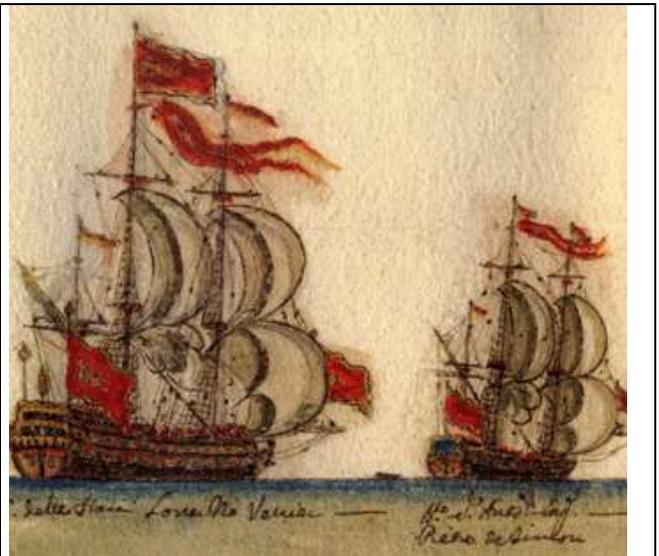


La cupola del Filippo Brunelleschi (1377-1446): a partire dal Rinascimento le opere ingegneristiche e architettoniche diventano sempre più ardite.

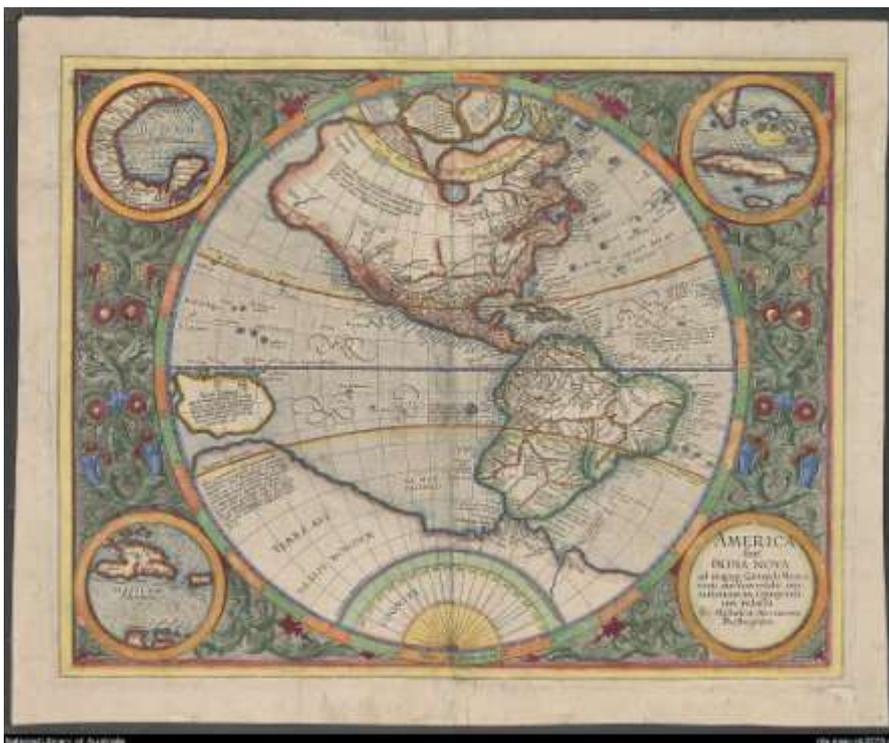


Le macchine di Leonardo da Vinci (1452-1519)

Navigare per il mondo

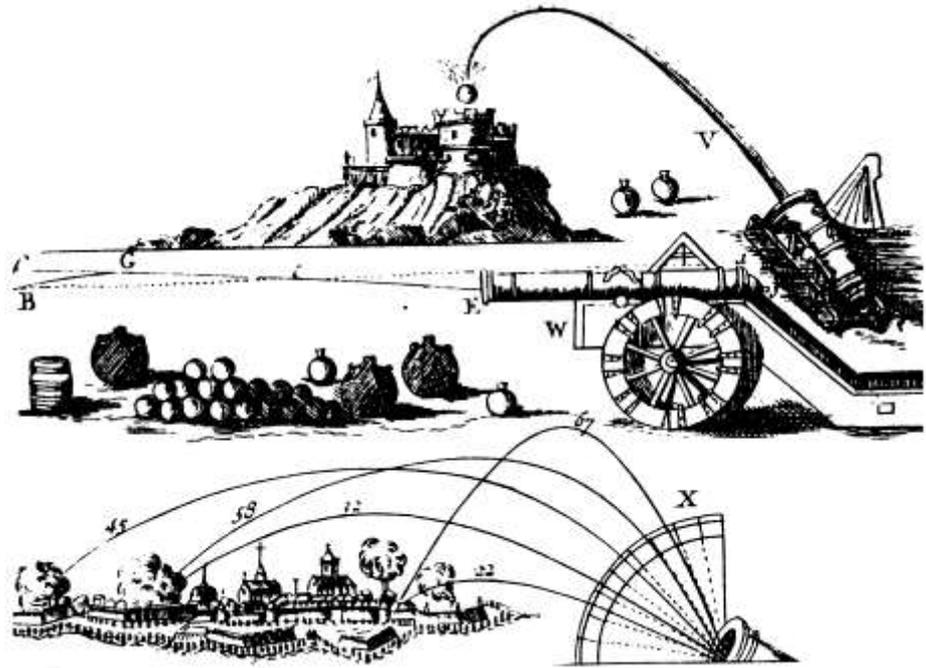


Esplorazioni geografiche: Cristoforo Colombo, 1492.



Cartografia: Mercatore (1512-1594) introduce nuove tecniche per realizzare carte geografiche

I settori della **navigazione** e del commercio subirono in Europa una forte accelerazione ponendo problemi di calcolo di nuove rotte.



Traiettorie dei cannoni: la diffusione della polvere da sparo in Europa (XV secolo) richiede di studiare in modo più preciso la dinamica delle armi da fuoco.

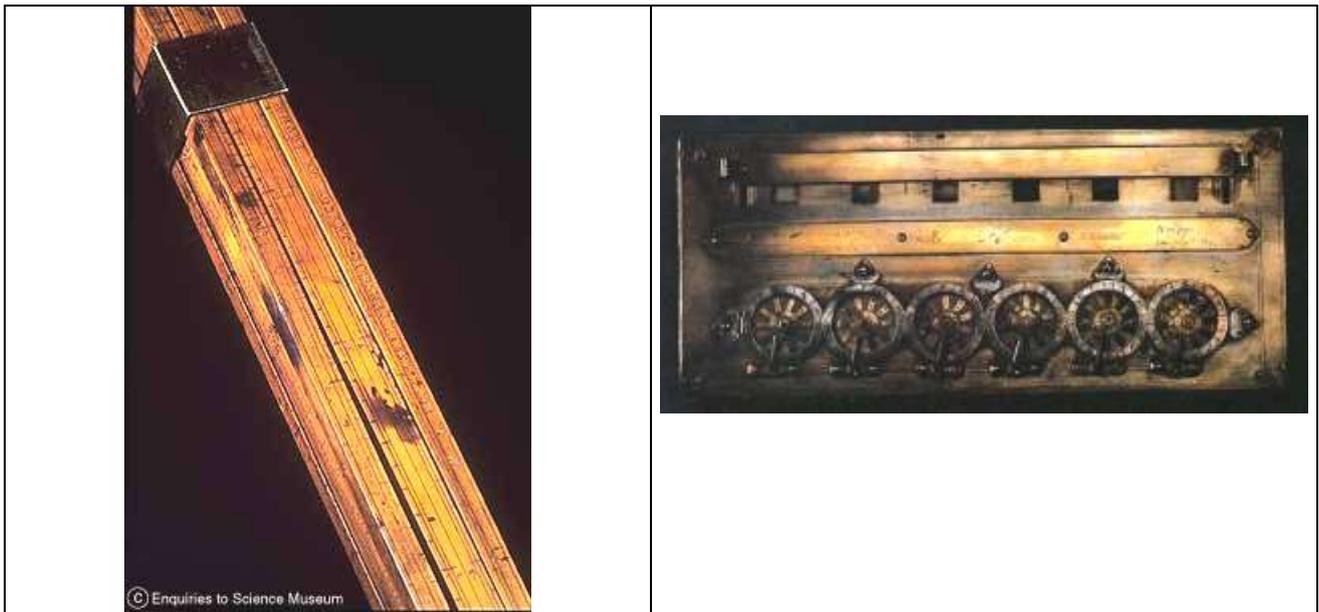
L'introduzione delle **armi da fuoco** diede un importante impulso alle tecniche di calcolo indispensabili per l'**ingegneria militare**.



Lo sviluppo della contabilità necessaria per le attività commerciali e finanziarie resero sempre più comuni operazioni di tipo aritmetico.

Nuovi strumenti di calcolo

Il secolo della svolta per i primi veri calcolatori fu il **1600**, sebbene già in precedenza fossero stati introdotti alcuni strumenti di calcolo molto semplici.



Due furono le scoperte scientifiche che maggiormente contribuirono ad aprire la strada al calcolo automatico:

- l'invenzione dei **logaritmi** e la scoperta delle loro proprietà aprirono la strada all'invenzione del regolo calcolatore (logaritmico), uno degli strumenti più versatili ed apprezzati;
- l'invenzione degli **orologi (a pendolo)** con il conseguente progresso della meccanica di precisione aprirono la strada alla costruzione delle prime calcolatrici meccaniche.

Il regolo calcolatore e la calcolatrice meccanica, inventati quasi negli stessi anni, sono anche rappresentativi dei due paradigmi alternativi che hanno caratterizzato l'invenzione dei primi calcolatori:

- **le macchine a rappresentazione analogica e**
- **le macchine a rappresentazione numerica (o digitale).**

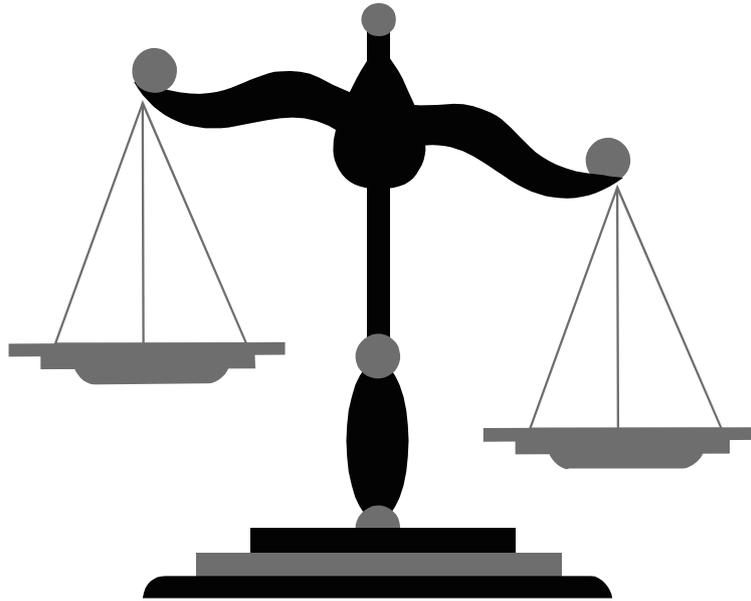
Attenzione! Questa distinzione non vale solo per calcolatori meccanici, ma in generale può essere applicata anche per macchine realizzate con altre tecnologie (elettronica, ecc.)

Il dominio dei calcolatori meccanici è durato tre secoli e ha visto l'impiego di molteplici soluzioni ingegnose per realizzare operazioni matematiche sempre più complesse.

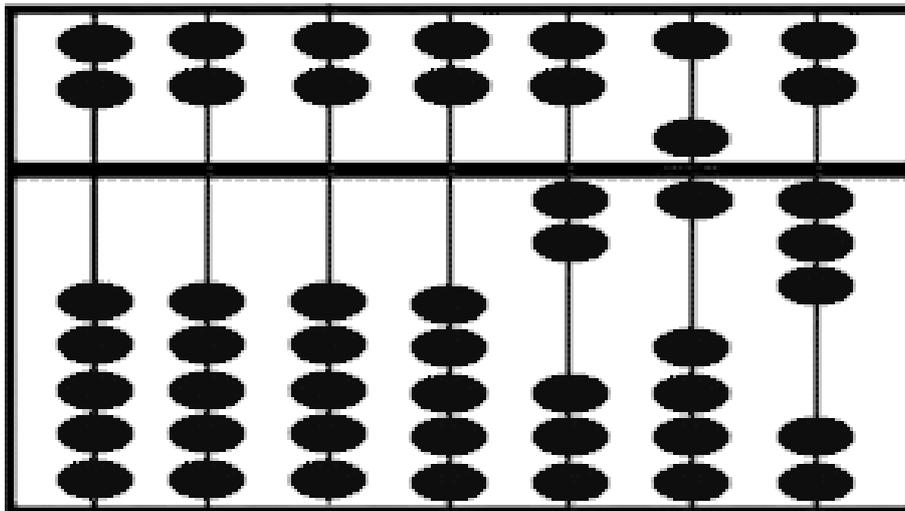
In questo lungo percorso possiamo distinguere tre grandi momenti:

- il primo periodo (1600-1700), corrispondente alla **Rivoluzione Scientifica**, vede da un lato lo sviluppo di diversi strumenti di regoli e compassi di calcolo ad uso di ingegneri ed architetti e, dall'altro lato, le prime applicazioni della ruota dentata al calcolo;
- il secondo periodo (1800), corrispondente alla **Rivoluzione Industriale**, vede la produzione in larga scala di calcolatrici meccaniche affidabili e di facile uso; infine,
- il terzo periodo (1920-30) vede l'**entrata del calcolo automatico nel mondo della ricerca scientifica** con lo studio di macchine progettate appositamente per il calcolo scientifico.

Calcolatori analogici vs calcolatori digitali



(a) bilancia



(b) abaco

Esempi di strumenti con rappresentazione analogica (bilancia) e digitale (abaco).

La ***rappresentazione analogica*** si appoggia al concetto di grandezza fisica continua (ad esempio, la lunghezza o il peso) e rappresenta ogni numero come il risultato della misurazione di tale grandezza su un oggetto specifico (ad esempio, un regolo).

Nella ***rappresentazione numerica (o digitale)***, il numero viene rappresentato in modo discreto come un insieme composto da unità elementari considerate indivisibili (ad esempio, in una taglia ogni singola tacca o in un abaco ogni singolo sassolino).

- Gli strumenti di misura come, ad esempio la bilancia, il calibro, ecc. sono strumenti basati su una rappresentazione di tipo analogico.
- L'abaco invece rappresenta uno strumento di calcolo di tipo digitale: ogni sassolino è indivisibile e, inoltre, a seconda della fila in cui si trova ha un diverso significato (ad esempio, unità, o decina, o centinaia, ecc.).

Nell'**approccio analogico** il calcolo avviene sfruttando due aspetti:

- le quantità numeriche sono rappresentate mediante una qualche **grandezza fisica continua**,
- l'**operazione matematica viene simulata con un fenomeno avente un comportamento (cioè una legge fisica) "analogo" all'operazione da effettuare.**

Esempio:

il peso è una grandezza *additiva*: il peso che risulta dall'unione di due corpi è pari alla somma dei pesi dei due corpi. Un fenomeno come l'unione di due sostanze può essere quindi utilizzato per effettuare l'operazione di somma (e anche la sottrazione).

Il fenomeno fisico utilizzato per svolgere un certo calcolo può essere anche molto semplice.

Spesso con fenomeni anche molto semplici si possono realizzare calcoli "interessanti": questo è il motivo per cui in passato i calcolatori analogici sono stati molto utilizzati.

I calcolatori analogici sono adatti a molte applicazioni, ma poiché lavorano con grandezze fisiche, **essi sono soggetti ad una perdita inevitabile di precisione.** Infatti, il limite più grave dei calcolatori analogici è legato proprio alla precisione.

Questo problema si ripercuote anche sulla riproducibilità dei calcoli: la medesima operazione eseguita in momenti diversi può fornire risultati leggermente diversi per le imprecisioni derivanti dalle misurazioni.

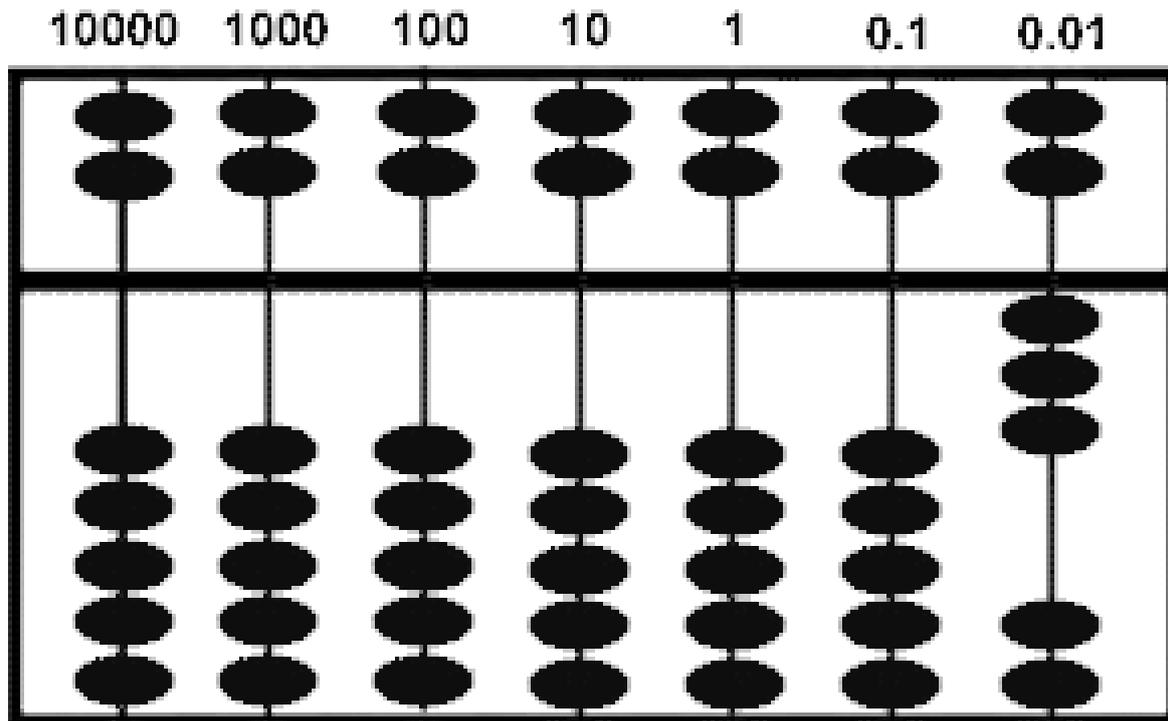
Questi aspetti risultano ancora più evidenti quando per risolvere un problema è necessario eseguire una lunga sequenza di operazioni matematiche.

La **precisione matematica della rappresentazione analogica** risulta legata alla precisione con cui è possibile effettuare le misurazioni della grandezza considerata.

Accrescere la precisione dei calcolatori analogici è difficile e costosissimo. Si pensi alle comuni calcolatrici tascabile in grado di operare con dieci cifre: misurare una grandezza con la precisione di dieci cifre esatte significa lavorare al limite delle possibilità di misurazione dei migliori laboratori scientifici!

La costruzione di **calcolatori digitali** in grado di procedere automaticamente ha sempre posto numerosi problemi costruttivi dal momento che il calcolo non si basa su un qualche fenomeno fisico preesistente, ma occorre combinare insieme una serie di congegni (ingranaggi, leve, molle, scappamenti, ecc.) in modo che il funzionamento complessivo realizzi tutti i passi del processo di calcolo desiderato, cioè di realizzare una sorta di codifica di algoritmi di calcolo.

Un vantaggio dei calcolatori digitali consiste nella correttezza con cui vengono rappresentate le informazioni numeriche, correttezza che non dipende dalla precisione con cui si possono effettuare le misurazione di un grandezza fisica come accade nei calcolatori analogici.



Interpretando le ultime due colonne dell'abaco come potenze negative del 10 (cioè 10^{-1} e 10^{-2}) possiamo rappresentare anche valori non interi, come ad esempio il numero 0,03.

Il fatto di utilizzare elementi discreti non significa che non sia possibile rappresentare numeri non interi. Infatti, gli elementi discreti opportunamente interpretati possono rappresentare anche valori frazionari.

Il calcolatore digitale può raggiungere agevolmente una precisione pari a quella dei calcolatori analogici. Inoltre, la precisione può essere facilmente aumentata, se necessario, aggiungendo altri elementi discreti.

Infine, un ulteriore svantaggio dei calcolatori analogici è emerso con i computer moderni programmabili (presentati più avanti), il cui comportamento può essere modificato (cioè "programmato") per eseguire compiti diversi. In un calcolatore analogico tale modificabilità è molto più difficile poiché richiederebbe la possibilità di utilizzare diversi fenomeni fisici a seconda del tipo di operazione matematica da simulare.

1.2. Primi calcolatori meccanici analogici

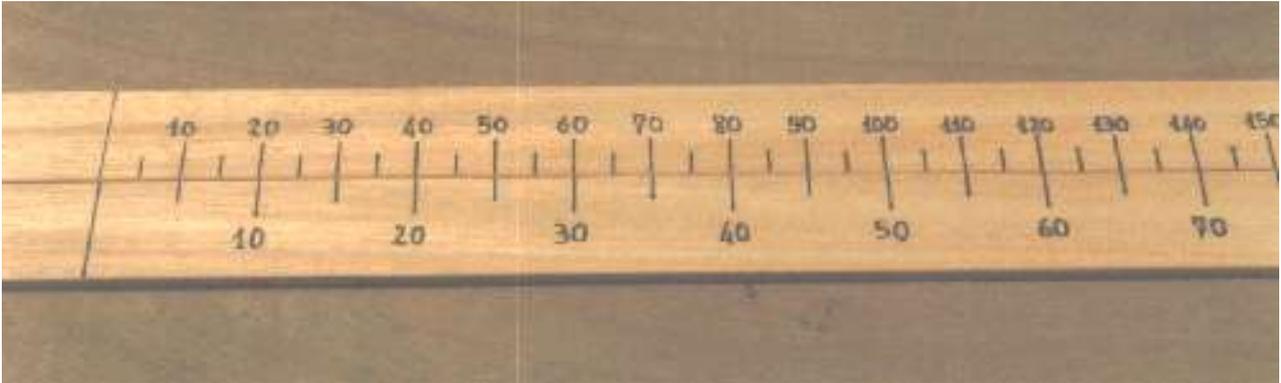


Compasso di proporzione, uno degli strumenti analogici più classici.

In un certo senso, possiamo dire che **i precursori della rappresentazione analogica furono gli antichi matematici Greci**. Come sappiamo, essi rappresentavano i numeri con segmenti e le loro costruzioni mediante riga e compasso (o altri strumenti geometrici) possono essere interpretate anche come procedure di tipo analogico per eseguire operazioni matematiche più o meno complesse.

Nel passato, **la grandezza fisica più comunemente utilizzata negli strumenti di tipo analogico è stata la lunghezza** per la relativa facilità e rapidità con cui si possono fare misurazioni abbastanza precise, sebbene sia possibile usare altre grandezze, come il peso, la rotazione, il tempo, la tensione elettrica, ecc.

Regoli graduati



Regoli di duplicazione.

Una coppia di regoli dotati di opportune scale permette di effettuare diversi tipi di calcoli. In particolare, possiamo:

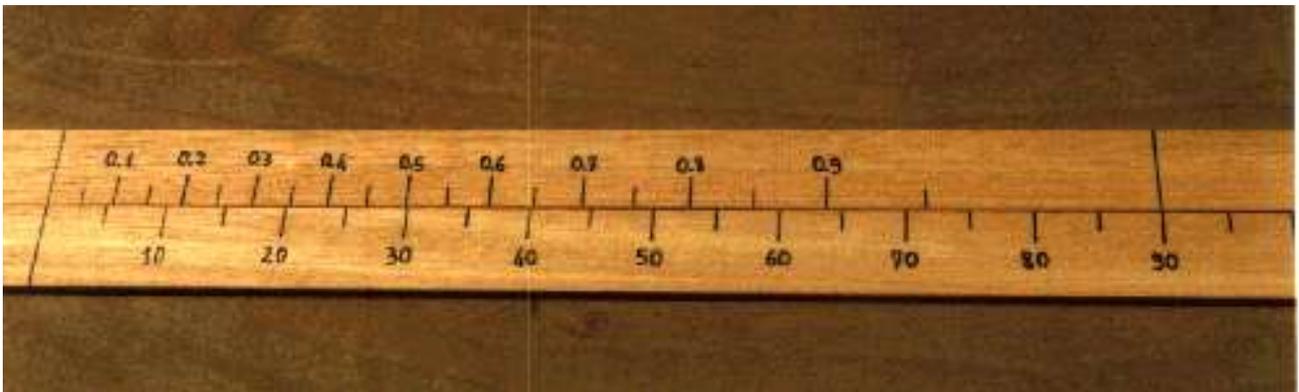
- fare il raffronto di due scale vicine fisse;
- muovere un righello rispetto all'altro.

Questi sono principi basilari per la costruzione di diversi strumenti analogici impiegati nel passato.

Moltiplicare e dividere

Consideriamo una coppia di regoli fissi le cui scale siano una doppia dell'altra: in questo caso è possibile moltiplicare o dividere per due un dato numero.

Questo principio è ancora oggi alla base degli **scali-metri**.

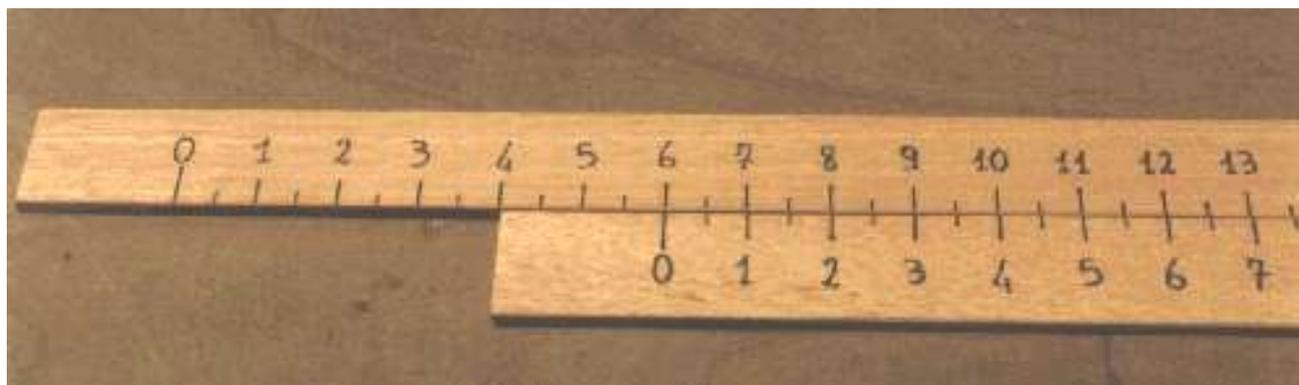


Regoli per calcolare la funzione seno.

Con una coppia di regoli fissi dove una scala contiene valori della funzione *seno* e l'altra contiene la misura degli angoli è possibile calcolare il seno di un angolo oppure calcolare la funzione inversa arcoseno.

Il limite di questo approccio è quello di essere utilizzabile unicamente per funzioni matematiche ad un solo argomento. Si deve notare che con questo strumento il calcolo di una funzione (ad esempio, il quadrato di un numero) e della funzione inversa (ad esempio, la radice quadrata) comporta lo stesso grado di difficoltà.

Addizionare e sottrarre



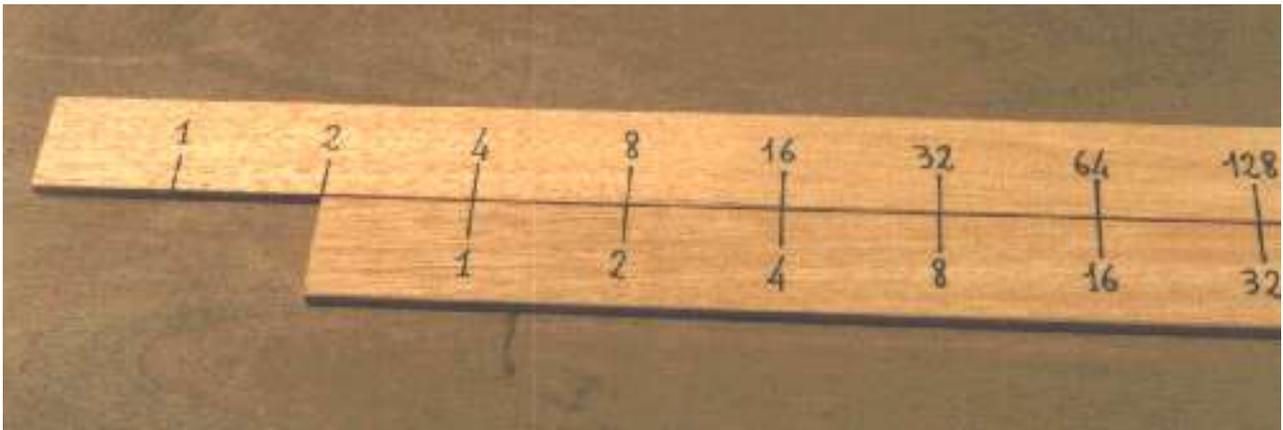
Regoli addizionatori.

Utilizzando due scale metriche uguali incise su due righelli liberi di scorrere l'uno rispetto all'altro, è possibile invece realizzare un semplicissimo strumento per effettuare somme e sottrazioni.

Ad esempio, dovendo sommare 6,0 con 5,5, si sposta il righello mobile in modo che lo zero della sua scala coincida con il valore 6,0 nella scala del righello fisso; quindi, sempre nella scala del righello mobile si cerca il valore 5,5; infine, il risultato della somma (cioè 11,5) può essere letto sulla scala del righello fisso in corrispondenza del numero 5,5.

Con un metodo inverso a quello descritto è possibile effettuare l'operazione di differenza.

Moltiplicare e dividere con scale non lineari



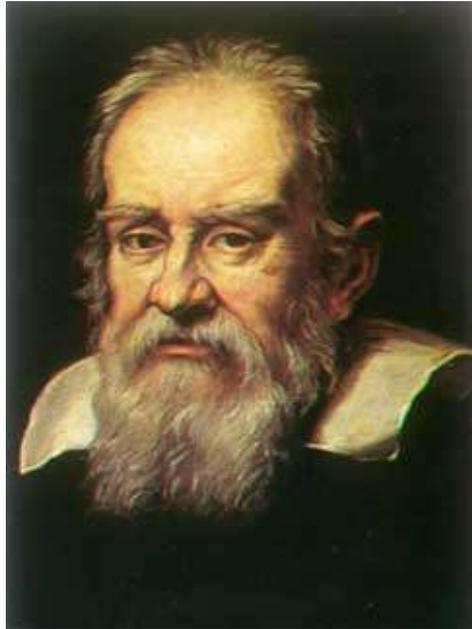
Regoli moltiplicatori.

I due righelli riportano le **potenze di due**: spostando un righello rispetto all'altro è possibile ricavare il prodotto di una coppia di potenze (di 2). Nella figura possiamo moltiplicare il numero 4 per un'altra potenza di 2.

Usando un altro tipo di scala è **possibile eseguire anche le moltiplicazioni**. Il principio che permette di fare la moltiplicazione in questo caso è riconducibile alle proprietà delle potenze e, in particolare, all'additività degli esponenti con potenze con la stessa base.

Questo principio opportunamente raffinato ha trovato larga diffusione nell'ambito dei regoli calcolatori, dove utilizzando scale di tipo logaritmico, si riesce ad eseguire operazioni più complesse dell'addizione della sottrazione.

Compasso di Galileo

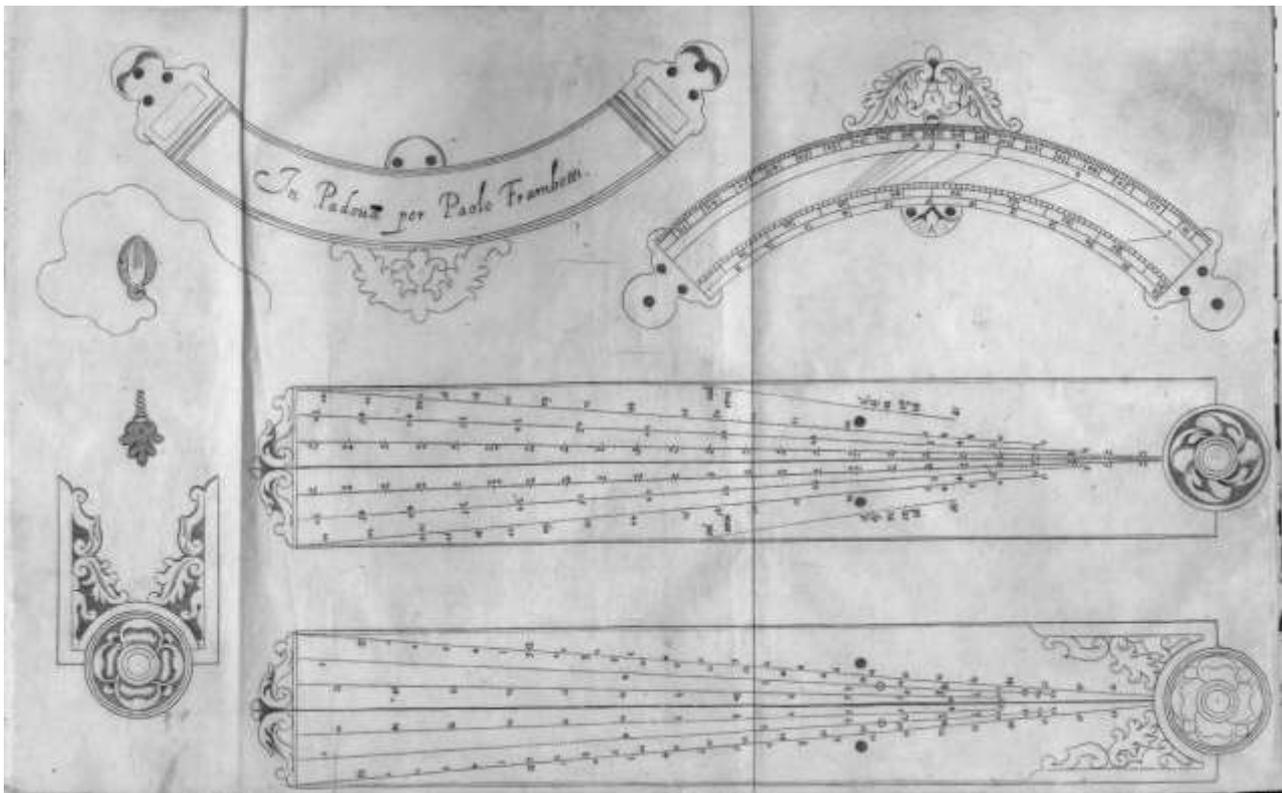


I **primi compassi geometrici** per il calcolo cominciarono ad apparire tra il 1500 e il 1600.



Compasso di Galileo in ottone (lung. 256 mm, largh. aperto 360 mm). Museo delle Scienze di Firenze.

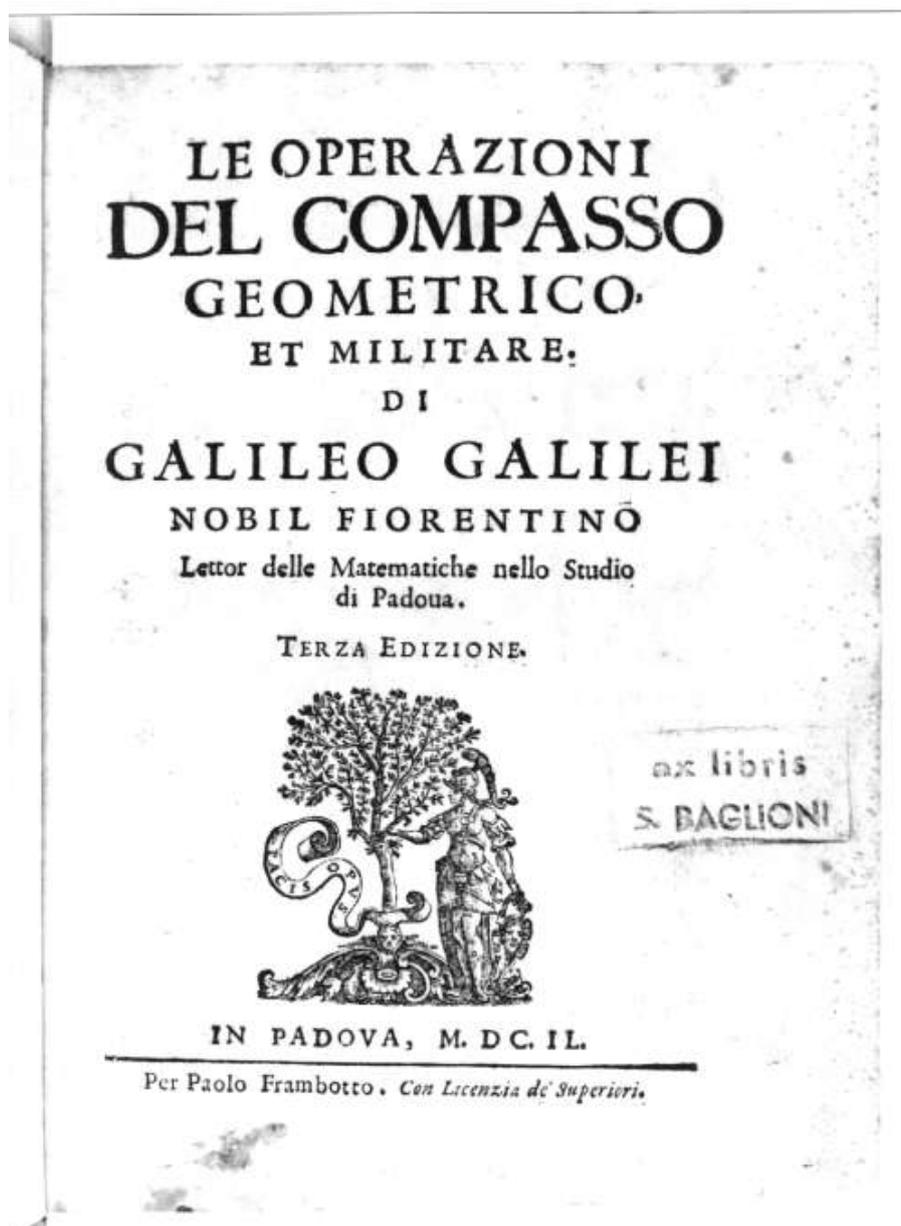
In Italia, uno dei primi ad introdurre questo tipo di strumento fu **Galileo Galilei** (1564-1642) a Padova nel 1597. In Europa (specialmente in Gran Bretagna), altri inventori costruirono all'incirca negli stessi anni strumenti simili a quello di Galileo.



Disegni dal manuale del compasso di Galileo.

Questo strumento, denominato da Galileo "**compasso geometrico et militare**", poteva essere impiegato anche in topografia, agrimensura, balistica grazie alle diverse scale dedicate a tali ambiti.

Sebbene il grado di precisione fosse limitato, il compasso di Galileo ebbe molto successo tra gli ingegneri militari e altri tecnici, proprio per la grande necessità esistente in quei tempi di un ausilio per fare calcoli. Infatti, questi strumenti furono privilegiati da geometri, architetti, navigatori, cartografi, ecc. e il loro uso durò sino alla prima metà dell'800, quando furono rimpiazzati dall'uso del regolo calcolatore.



Prima pagina del testo Le operazioni del compasso geometrico e militare.

Il successo dello strumento spinse Galileo a divulgare ulteriormente la sua invenzione.



Set di un compasso di proporzione del IXX secolo.

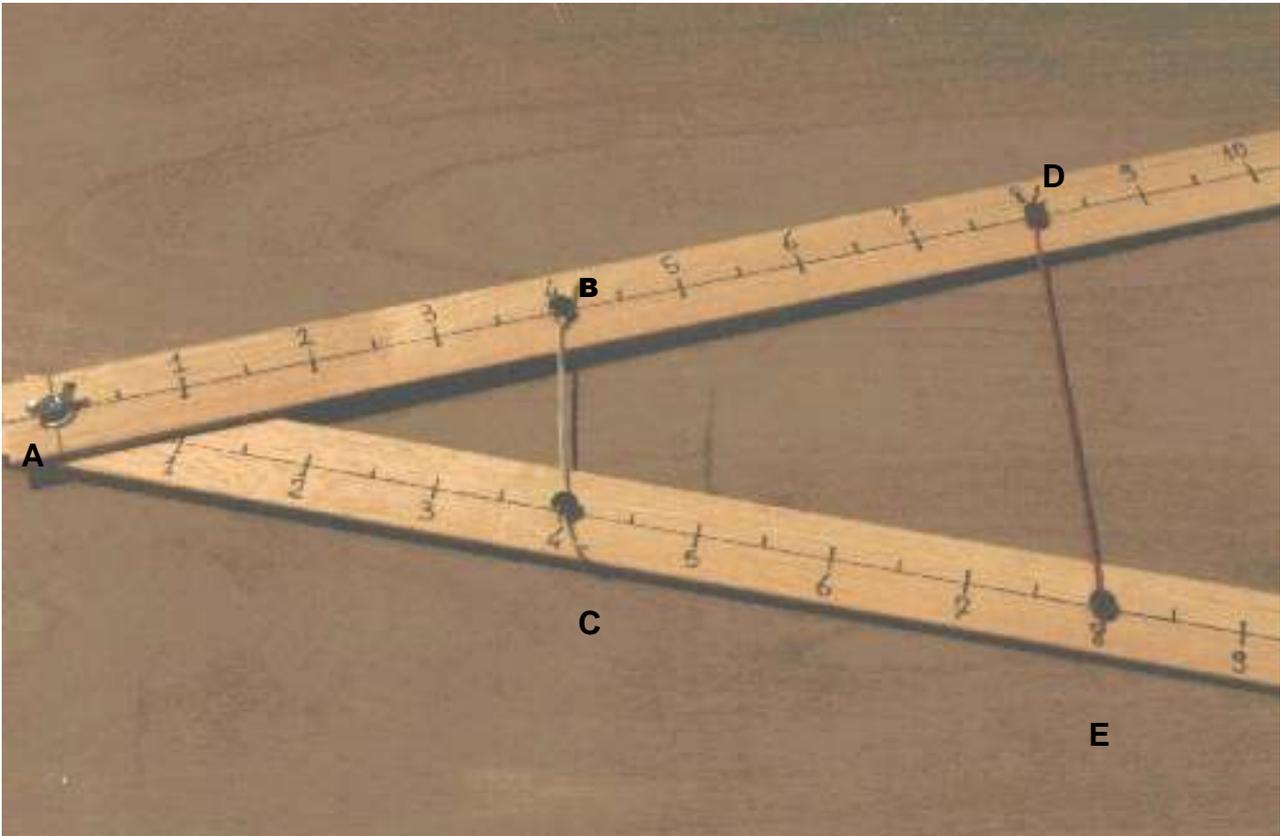
Nel corso del XIX secolo, il compasso di proporzione fu gradualmente sostituito dalla diffusione di raffinatissimi regoli calcolatori che sopravvissero negli studi tecnici degli ingegneri, degli architetti e dei geometri fino all'avvento recente del computer.

Il compasso galileano è composto da due aste graduate e incernierate, con il quale si possono eseguire moltiplicazioni e divisioni.



Le sette linee proporzionali tracciate sulle gambe del compasso e le quattro scale segnate sul quadrante, consentivano di effettuare con estrema facilità ogni sorta di operazione aritmetica e geometrica: dalla moltiplicazione all'estrazione delle radici quadrate e cubiche, dal disegno dei poligoni al calcolo di aree e volumi alla misura dei calibri dei cannoni, ecc.

Il principio di funzionamento su cui si basa questo dispositivo per eseguire moltiplicazioni e divisioni è molto elementare e, in particolare, sfrutta le proporzionalità esistenti tra i lati di triangoli simili.



Ricostruzione delle scale lineari del compasso di Galileo.

Qui possiamo vedere una ricostruzione del compasso di Galileo con le scale lineari per moltiplicare e dividere un segmento. Il segmento DE è il doppio del segmento BC poiché il triangolo ABC è simile al triangolo DA-E. Altre scale consentono di eseguire altre operazioni di utilità.

Compasso di proporzione

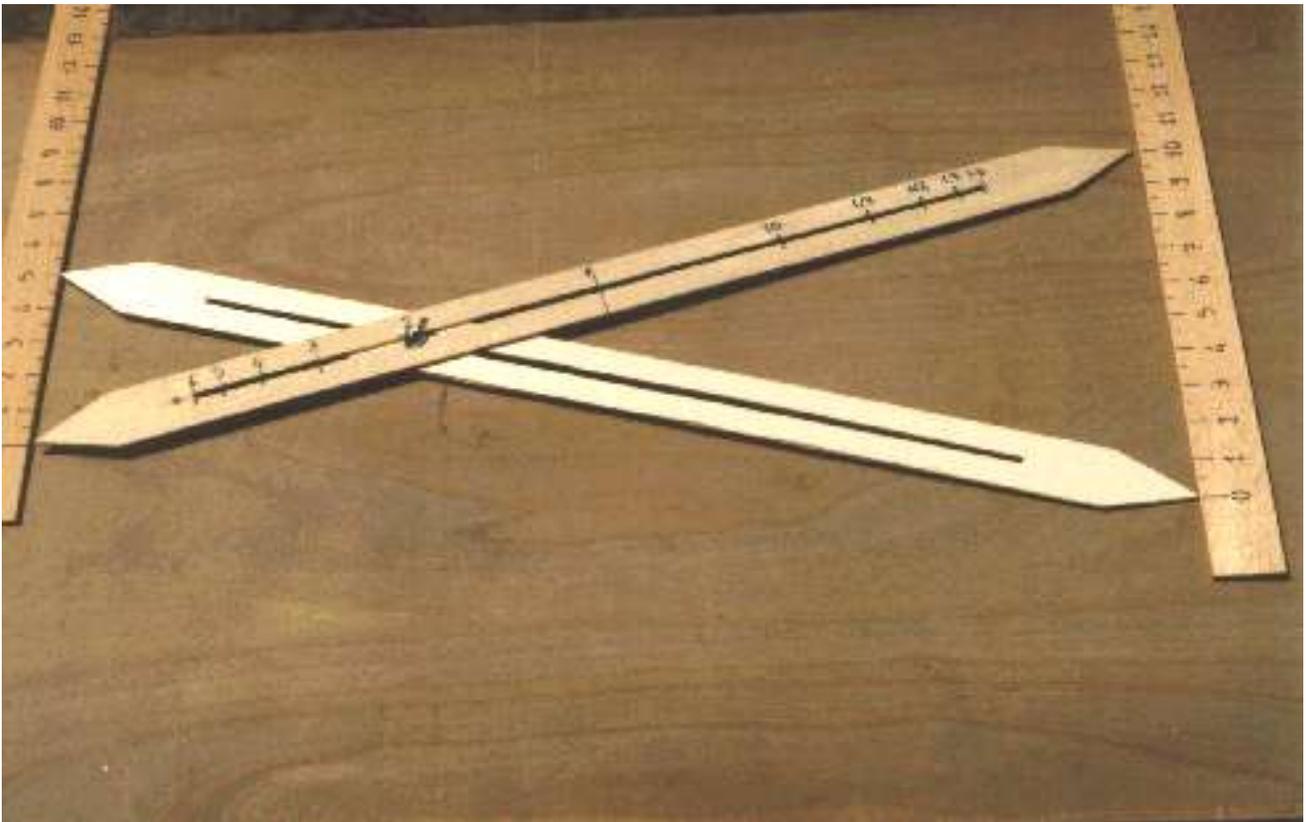
Una variante del compasso di Galileo è rappresentata dal compasso di proporzione, che si diffuse a partire dal 1600.



Il compasso di proporzione (o compasso di riduzione) è costituito da una coppia di aste fissate a metà con delle cerniere, e con le punte su entrambe le estremità di ciascuna asta.

Questo tipo di strumento veniva utilizzato soprattutto dai disegnatori che **se ne servivano per ridurre o ingrandire i disegni secondo una data proporzione**

e ciò, in termini matematici, corrisponde alle operazioni di moltiplicazione e di divisione.



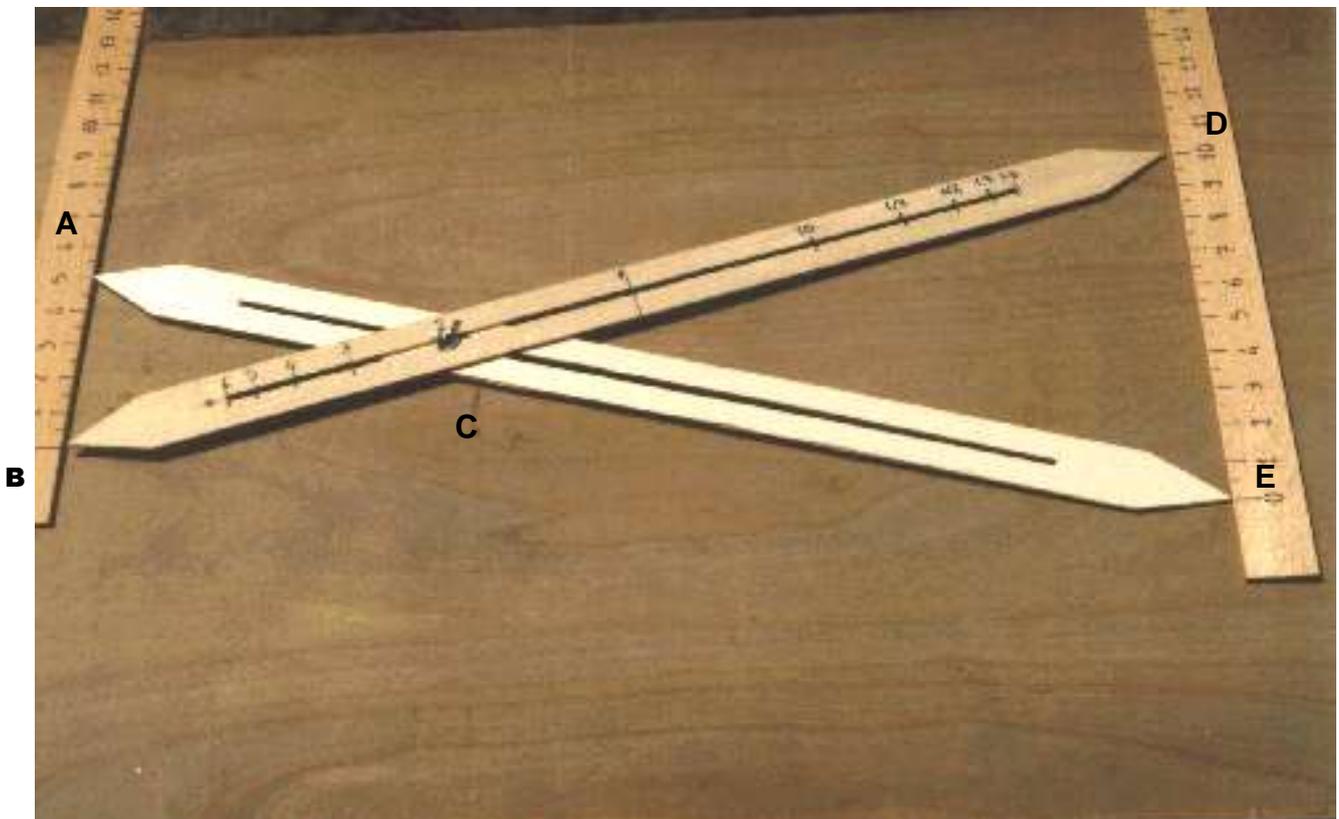
Ricostruzione di un compasso di proporzione.

Nella seguente ricostruzione il perno è fissato sul valore 2: le aste a destra del perno hanno lunghezza doppia di quelle a sinistra del perno. Ogni misura rilevata con le aste più lunghe risulta pari al doppio di quella indicata dalle aste più corte.

Il principio meccanico che consente a questo strumento di svolgere queste funzioni sta nel punto di intersezione delle due aste (cioè, il perno di articolazione) che, essendo regolabile, permette di muovere il perno verso l'alto o verso il basso divi-

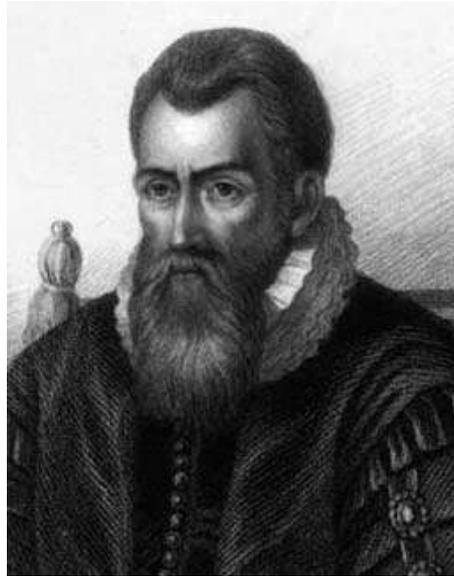
dendo le due aste in parti secondo diverse proporzioni.

Su entrambe i lati delle aste sono incise diverse scale che vengono utilizzate per la regolazione del perno di articolazione. Le scale presenti in questi strumenti erano diverse. La scala lineare, la più semplice, permetteva di ingrandire o ridurre i disegni secondo proporzioni diverse.



Arricchendo lo strumento con altre scale è possibile eseguire altre operazioni matematiche: suddividere i cerchi in un certo numero di parti, determinare radici quadrate e cubiche, ecc.

Regolo calcolatore logaritmico



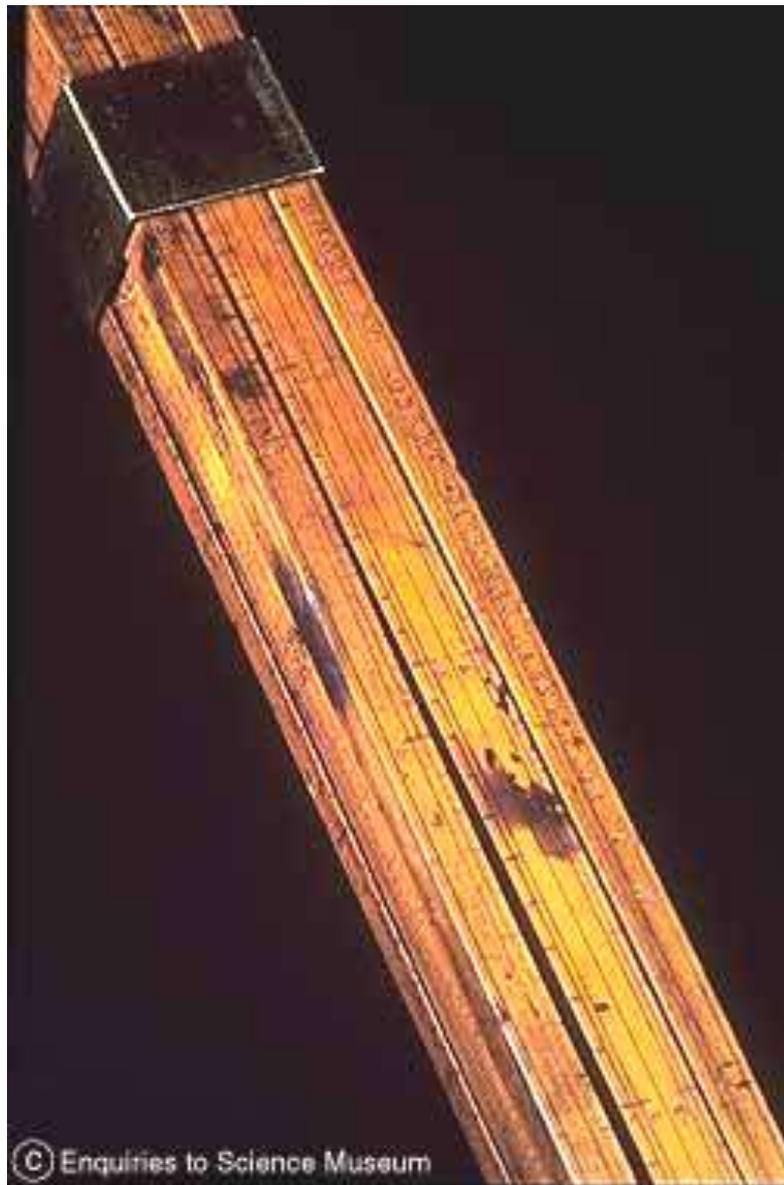
John Napier.

Tra i diversi tipi di calcolatori analogici quello che ha raggiunto la maggiore diffusione è stato certamente il regolo calcolatore. La strada per arrivare all'invenzione di questo strumento fu aperta da Nepero agli inizi del 1600.



Il primo regolo calcolatore in grado di eseguire moltiplicazioni e divisioni fu proposto dall'inglese **Edmund Gunter** (1581-1626) attorno al 1620 ed era basato su un'unica scala logaritmica (detta *linea dei numeri di Gunter*) riportata sopra un regolo da utilizzare insieme ad un compasso (comparatore)

Questo tipo di regolo fu successivamente perfezionato nel 1632 dal matematico **William Oughtred** (1574-1660), in quale comprese che l'uso del compasso poteva essere evitato **utilizzando due scale logaritmiche vicine in grado di scorrere una rispetto all'altra**. Egli però invece di impiegare regoli, utilizzò due scale disposte su cerchi concentrici. Altri perfezionarono lo strumento fino ad arrivare alla forma attuale.



Regolo di Bissaker (Museo delle Scienze di Londra), uno degli strumenti più antichi a noi giunti, 1654.

A partire dal 1700, questi strumenti furono molto utilizzati specialmente in Gran Bretagna.



Fino agli anni '70 il regolo calcolatore è stato lo strumento principe degli ingegneri e di tutte le persone impegnate in attività di calcolo scientifico, ed è stato sostituito solo dalle calcolatrici tascabili elettroniche.

Questo strumento, sfruttando le proprietà dei logaritmi e le capacità addizionatrici dei regoli scorrevoli, permette di svolgere rapidamente diverse operazioni facendo scorrere semplicemente il righello centrale o spostando un indice di riferimento.

$$\log (a \cdot b) = \log a + \log b$$

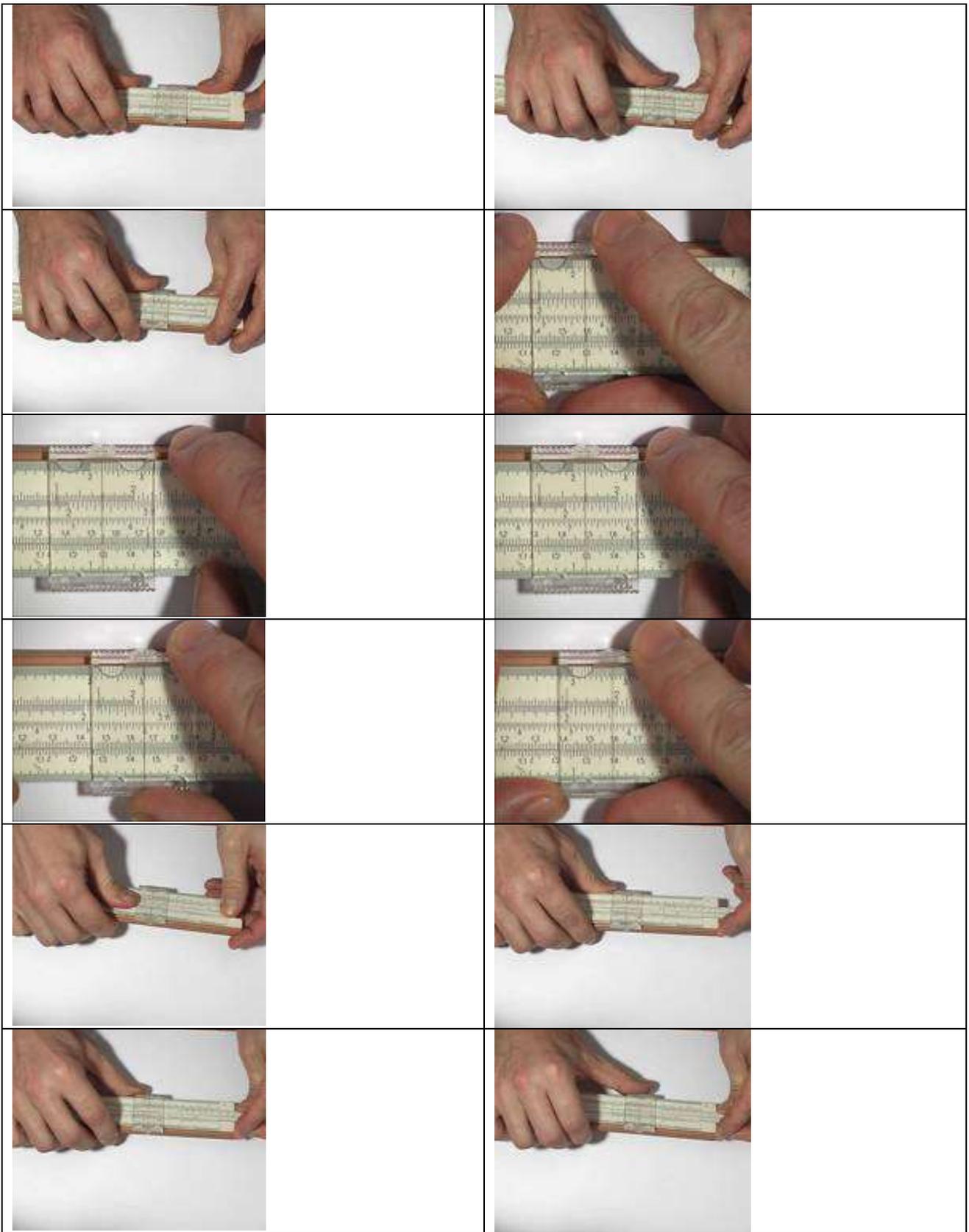
$$\log (a / b) = \log a - \log b$$

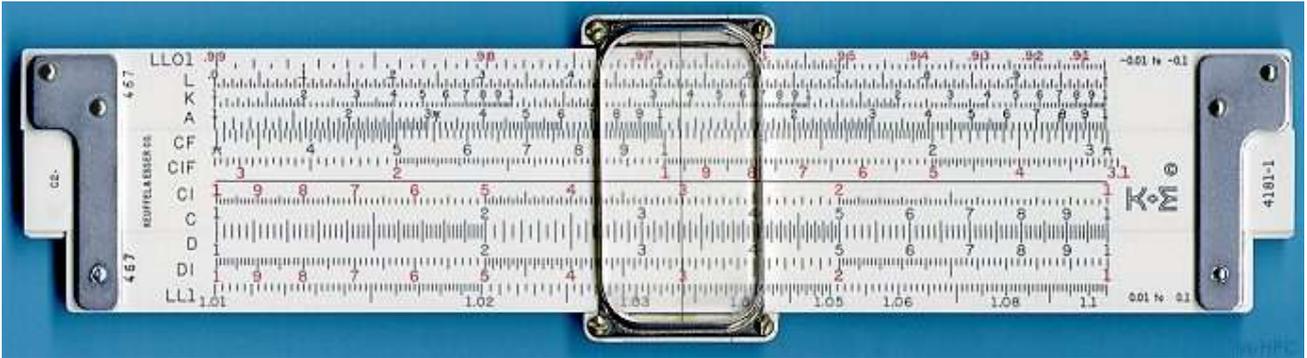
$$\log a^n = n \cdot \log a$$

$$\log \sqrt[n]{a} = (\log a)/n$$

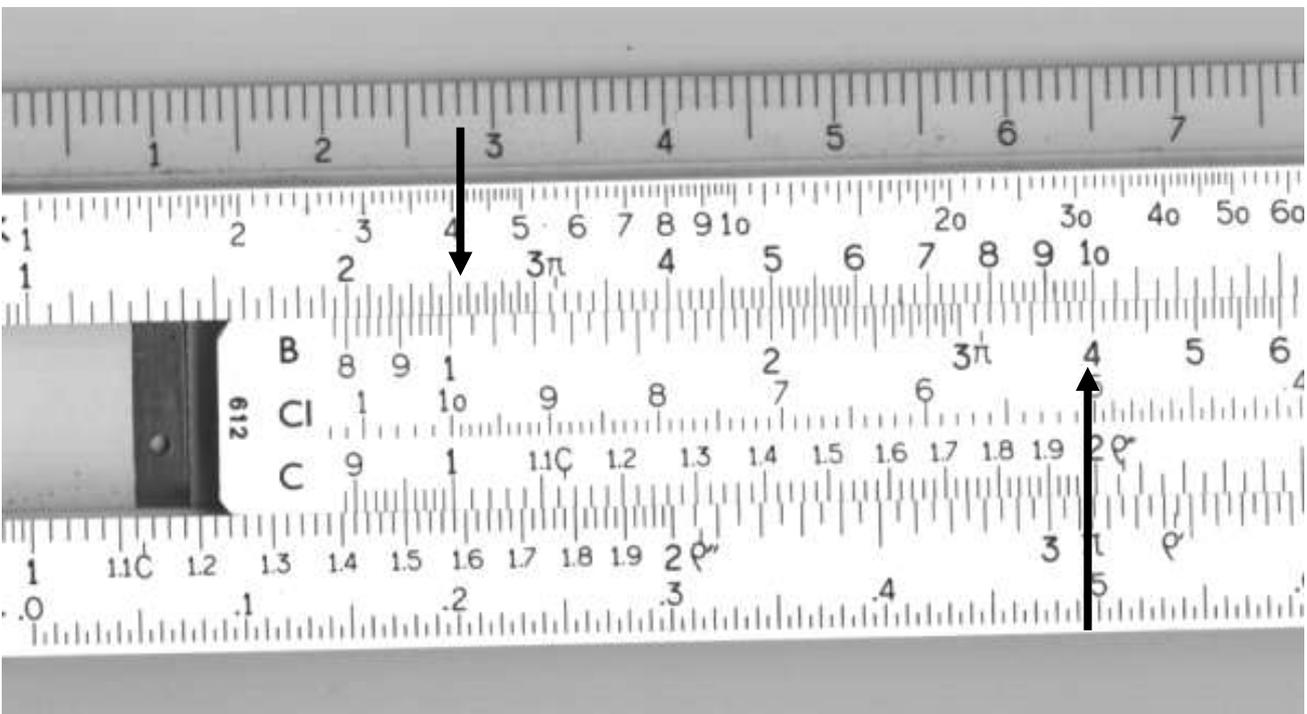
Questo strumento offriva diversi vantaggi rispetto alle tavole di Napier:

- faceva risparmiare tempo nel ricercare i logaritmi sulla tavola;
- realizzava la somma (o la differenza) di due logaritmi direttamente sfruttando l'additività di segmenti, facilmente realizzabile con il comparatore;
- infine, consentiva di realizzare l'interpolazione tra due valori (tacche sulle scale del regolo) ottenendo facilmente valori approssimati grazie alla stima visiva che poteva essere fatta per valori intermedi tra le tacche presenti sulle scale del regolo realizzando quindi in modo naturale il passaggio dal discreto al continuo.

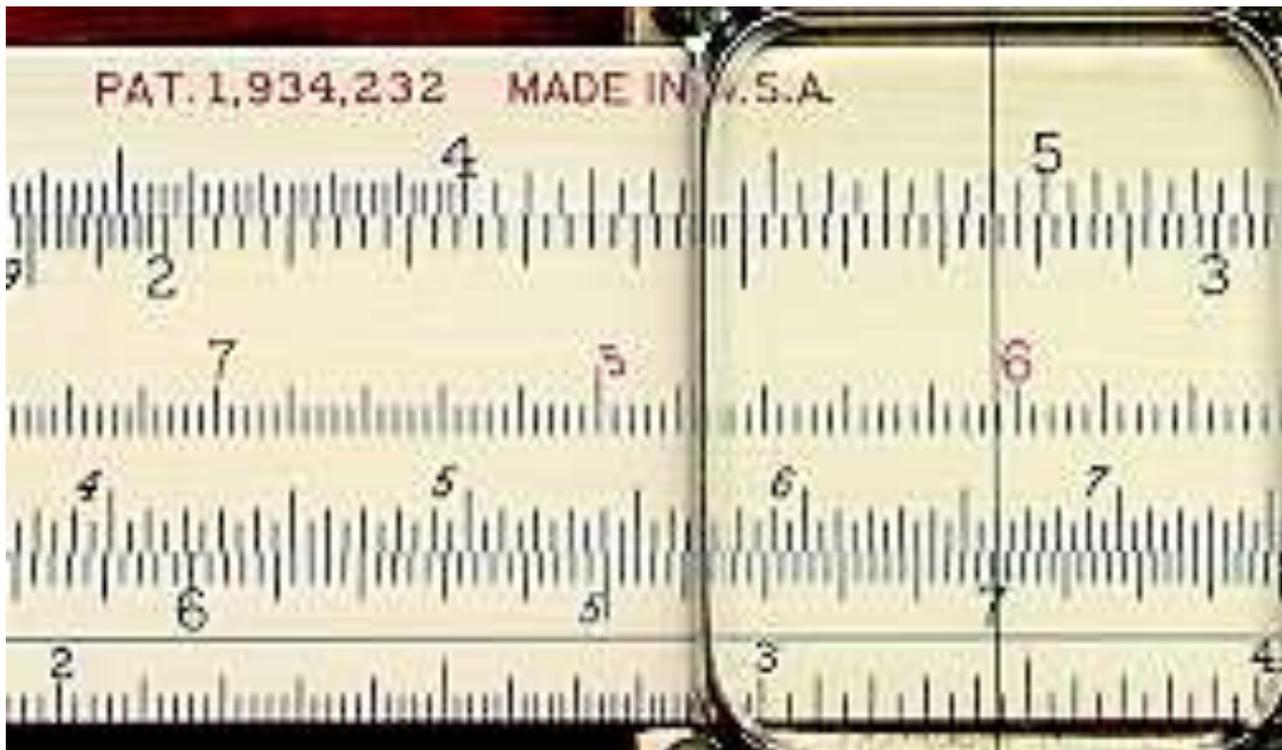




Regolo calcolatore moderno.



Un esempio di prodotto ($2,5 \times 4,0 = 10$) mediante il regolo calcolatore.



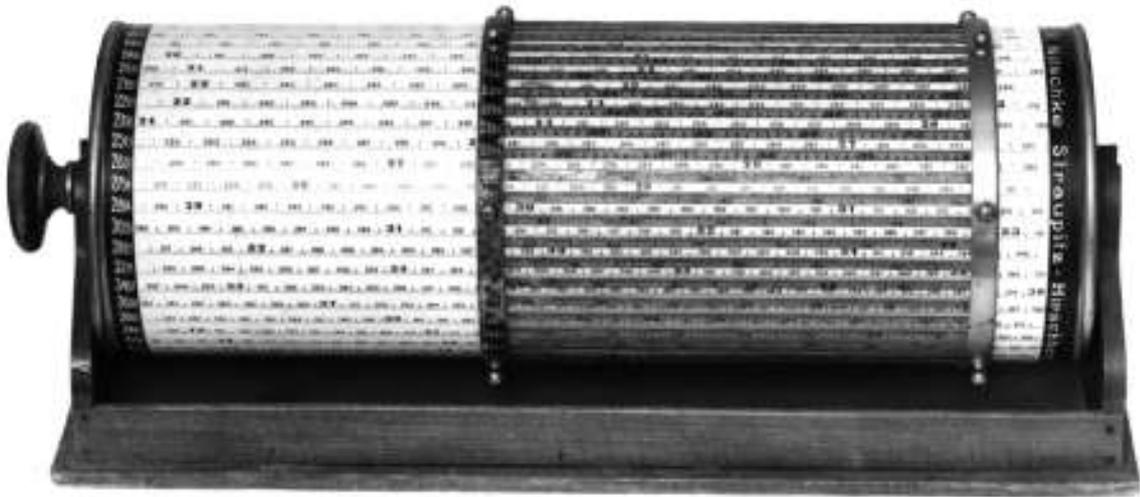
Calcolo radice quadrata con il regolo calcolatore.

Qui possiamo vedere come calcolare la radice quadrata di 49 mediante il regolo calcolatore: spostiamo la linea di fede dello scorrevole in modo che corrisponda al numero 49 della scala superiore; nella scala inferiore in corrispondenza della stessa linea di fede troviamo il valore della radice quadrata di 49, cioè 7.

I comuni regoli calcolatori raggiungono la precisione di tre cifre, sufficiente per molti problemi, mentre i migliori, di tipo cilindrico, arrivano fino a 4 o 5 cifre. In alcuni modelli, l'asta scorrevole si può sfilare e ribaltare per utilizzare altre scale.



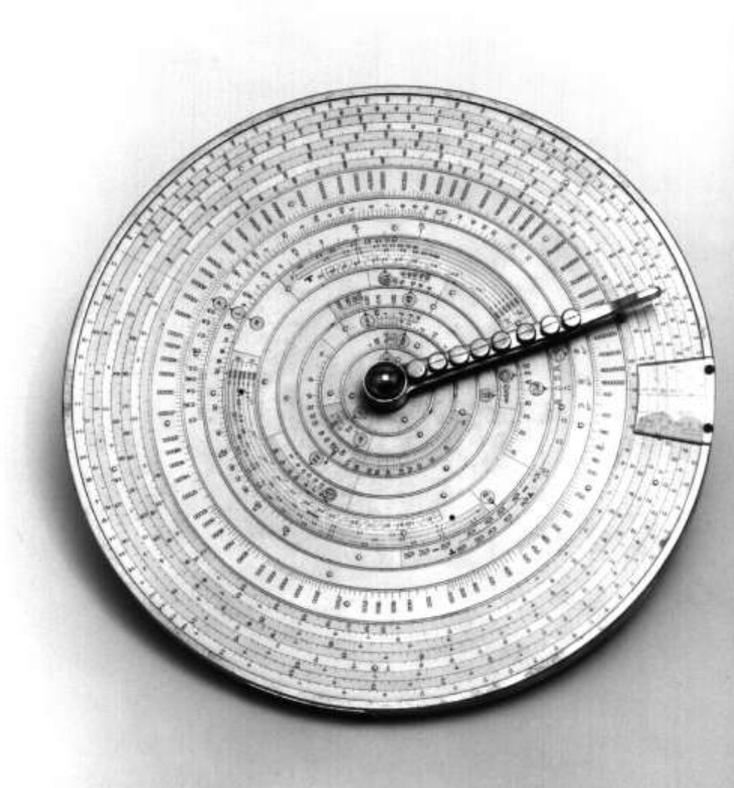
Regolo calcolatore Fuller.



Regolo calcolatore cilindrico (tipo Nitschke).



Regolo calcolatore modello Washington per il calcolo del cemento armato.



Regolo calcolatore modello Ferrero.



Multimedia

Video 1: [Moltiplicazione con regolo calcolatore](http://www.engr.colostate.edu/~dga/video_demos/mathematics) [da http://www.engr.colostate.edu/~dga/video_demos/mathematics]

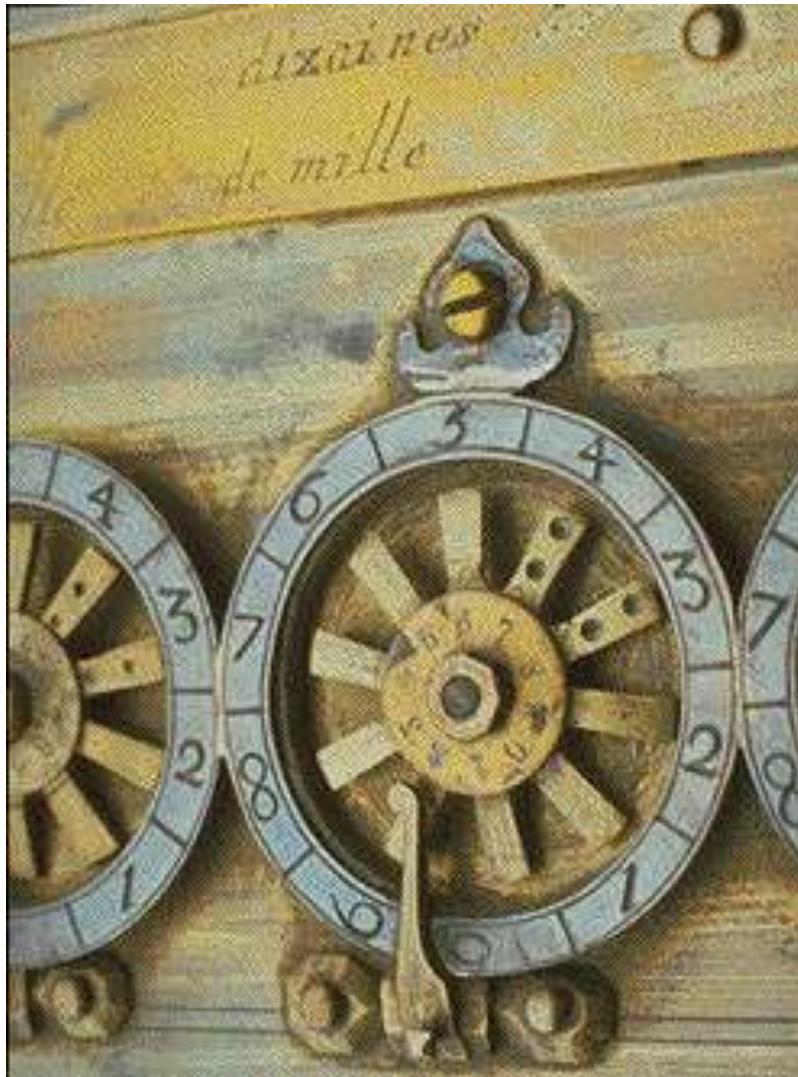


LINK

<http://www.sliderule.ca/>

<http://www.theslideruler.org/text/index.html>

1.3. Primi calcolatori meccanici digitali



La tecnologia dell'orologio meccanico



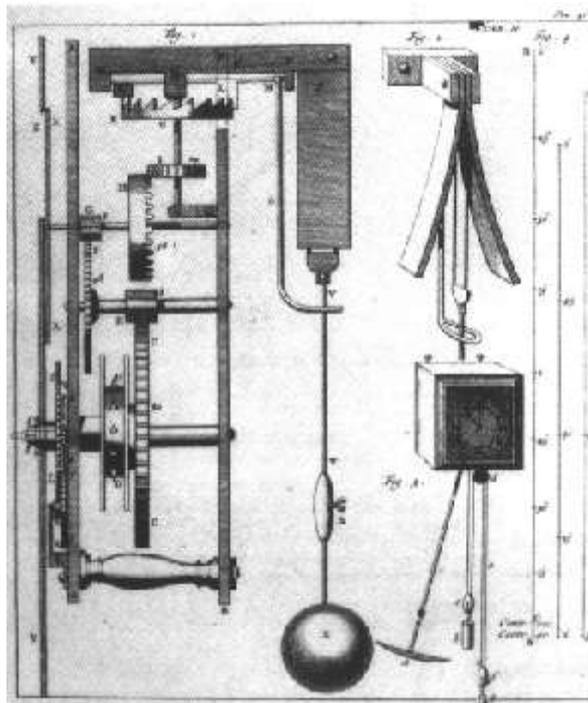
Ingranaggi di un orologio.

Il miglioramento della tecnologia a partire dal 1400-1500, permise di realizzare dispositivi meccanici sempre più complessi e tra questi conobbero un importante sviluppo gli orologi.



C. Huygens (1629-1695).

Fu l'isocronismo del pendolo, osservato da Galileo, che permise a C. Huygens (1629-1695) nel 1656 di costruire i primi orologi abbastanza precisi regolati da un pendolo.



Disegno dell'orologio di Huygens. C. Huygens, Horologium oscillatorium, Parigi 1673.

Orologi e calcolatori meccanici

La costruzione di orologi monumentali con automi o con strumenti astronomici sempre più complessi e, parallelamente, di orologi portatili sempre più piccoli e precisi portò la meccanica di precisione ad un altissimo livello, lasciando così una preziosa eredità tecnologica all'emergente disciplina del calcolo automatico: la ***ruota dentata***.

La riduzione in ore, minuti e secondi richiedeva meccanismi simili a quelli necessari per gestire i numeri (in base 10) nelle calcolatrici meccaniche. Sino all'avvento dell'elettronica, la ***ruota dentata*** costituirà la base costruttiva fondamentale per il calcolo meccanico digitale.

Le diverse problematiche che si incontrano nella realizzazione degli orologi sono affini a quelle che emergono nel calcolo automatico.

Ruota dentata e calcolo meccanico

Nel Seicento si comprese che gli ingranaggi usati negli orologi potevano essere adattati per la realizzazione di una calcolatrice: come la ruota dei secondi dopo 60 scatti ritorna a zero e fa avanzare di un'unità la ruota dei minuti e così via, allo stesso modo è possibile applicare lo stesso idea in una calcolatrice lavorando con multipli di dieci.

Le prime calcolatrici meccaniche erano quasi tutte basate su un dispositivo di conteggio, detto **contatore decimale**, realizzato mediante alcuni ingranaggi: un giro completo di una ruota faceva avanzare di un'unità la ruota a fianco, la quale una volta completato un'intera rotazione, faceva avanzare a sua volta di un'unità la ruota successiva.

In questi contatori meccanici, la **ruota dentata** gioca un ruolo essenziale e in un certo senso è al centro del funzionamento del calcolatore.



In una ruota dentata, l'elemento costruttivo che rappresenta (memorizza) il numero è anche l'elemento calcolante.



Ad esempio, per eseguire la somma $2 + 5$, si dovrà aggiungere 5 alla ruota con dieci denti che è già stata portata su 2; in concreto, ciò significa che la ruota verrà ruotata in avanti di cinque posizioni in modo che alla fine del movimento, la ruota mostri il numero 7, che è il risultato dell'operazione.

In questo modo la ruota svolge due funzioni diverse:

- **è memoria**, quando viene impostata su 2 e quando indica 7;
- **è dispositivo attivo di calcolo** quando con la sua rotazione in avanti di 5 posizioni permette di aggiungere l'addendo 5 al 2 già presente (o, se vogliamo, già memorizzato).

Riassumendo, la posizione della ruota dentata permette di rappresentare (cioè memorizzare) i numeri, mentre il movimento degli ingranaggi costituisce il processo di calcolo.

Il numero di ruote dentate usate per rappresentare i numeri determina anche il massimo numero rappresentabile nella macchina calcolatrice: ad esempio con sei ruote si possono rappresentare numeri (interi) da 0 fino a 999999.

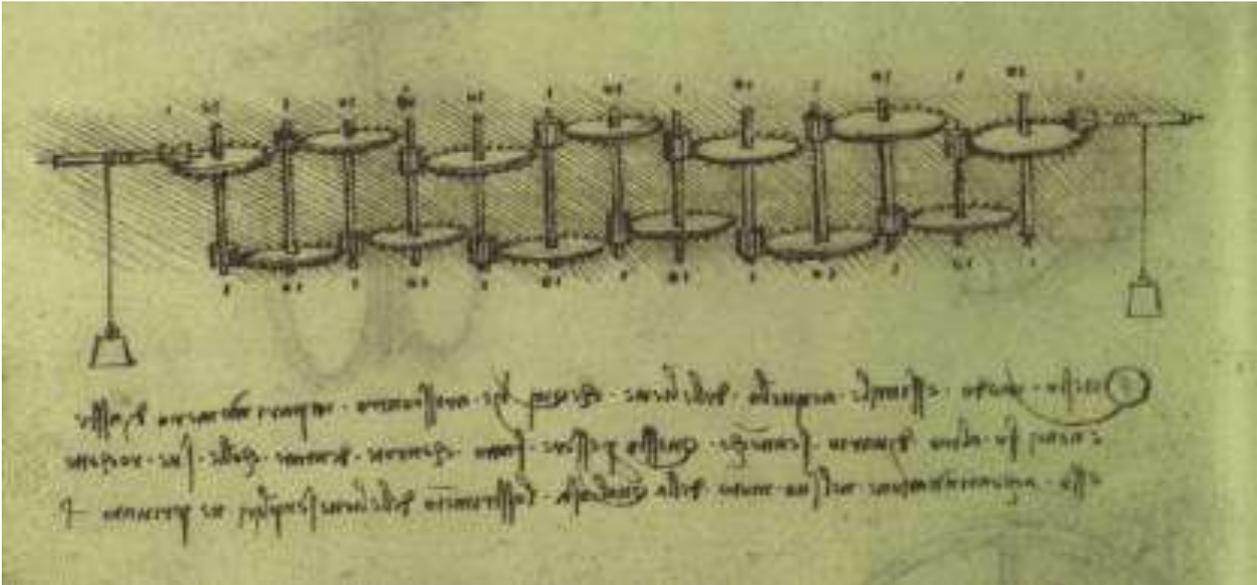
Il problema del riporto

Il problema principale da superare nei primi strumenti di calcolo meccanico di tipo digitale per effettuare addizioni (e moltiplicazioni) fu quello del riporto da un'unità all'altra, problema che nell'abaco viene risolto manualmente.

$$\begin{array}{r} 111 \\ 348 + \\ 967 = \\ \hline 1315 \end{array}$$

Per poter eseguire la più semplice delle operazioni aritmetiche, la somma, è necessario aggiungere alla ruota un opportuno meccanismo per gestire il riporto: ogni volta che la ruota completa un giro passando dal nove allo zero, la ruota a fianco deve incrementare di un'unità. La soluzione di questo problema venne grazie alla tecnologia meccanica degli orologi.

I diversi dispositivi realizzati per risolvere il problema del riporto nella somma dei numeri si chiama **totalizzatore**.



Una delle macchine disegnate da Leonardo da Vinci: un possibile modello di calcolatore?

Una prima soluzione al problema del riporto può essere rappresentata da una semplice ingranaggio costituito da una coppia di ruote dentate adiacenti. Questo tipo di meccanismo era già presente negli orologi per la riduzione del moto. Poiché il numero di giri trasmesso da una ruota all'altra è legato al rapporto tra il numero di denti presenti sulle due ruote (*rapporto di trasmissione*), scegliendo un rapporto di trasmissione tra le due ruote di 1 : 10, quando la prima ruota avrà completato un intero giro, la seconda ruota sarà avanzata di 1/10, cioè di un'unità.

Visto che due ruote adiacenti ruotano con verso opposto, è necessario inoltre aggiungere anche una ruota supplementare per riportare il verso corretto.

L'improbabile calcolatore disegnato da Leonardo da Vinci era basato su un approccio di questo tipo. Come abbiamo già detto, questo tipo di soluzione soffre in modo pesante del problema degli attriti e un calcolatore anche di poche cifre non potrebbe mai funzionare.

I primi veri inventori delle calcolatrici meccaniche cercarono altre soluzioni per il meccanismo dei riporti in modo da evitare il problema degli attriti. **Gran parte del lavoro degli inventori di calcolatrici meccaniche fu dedicato al perfezionamento di questo meccanismo** e al suo adattamento per l'esecuzione delle altre operazioni aritmetiche.

L'addizionatrice di Schickard



W. Schickard (1592-1635).

Il primo dispositivo di calcolo in grado di effettuare calcoli automaticamente fu realizzato attorno al 1623 dall'astronomo e matematico W. Schickard (1592-1635) e denominato ***Orologio Calcolatore***.



Ricostruzione dell'Orologio Calcolatore di Schickard (Deutsches Museum, Monaco).

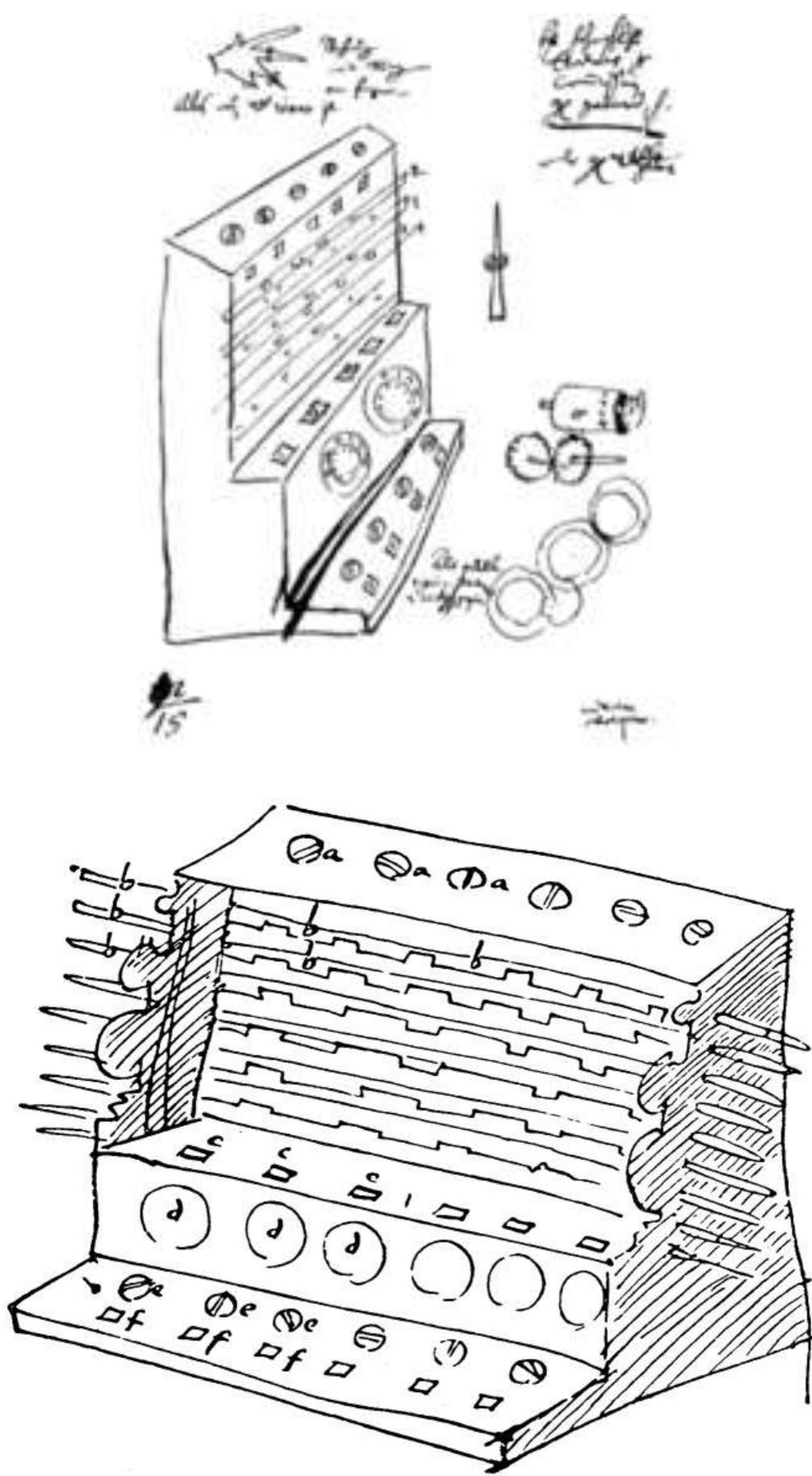
Tale dispositivo, che avrebbe dovuto servire per facilitare i calcoli in ambito astronomico, combinava la tecnologia degli orologi (da cui il nome) con il principio dei bastoncini di Nepero.

L'orologio calcolatore di Schickard è il primo apparato a svolgere autonomamente le funzioni dell'agente di calcolo a differenza di tutti i dispositivi precedenti, dove l'agente di calcolo era rappresentato dall'uomo.

Questa macchina (fisicamente realizzata dall'orologiaio J. Pfister), era in grado di lavorare con numeri di sei cifre e permetteva di eseguire autonomamente la somma e la differenza di due numeri.

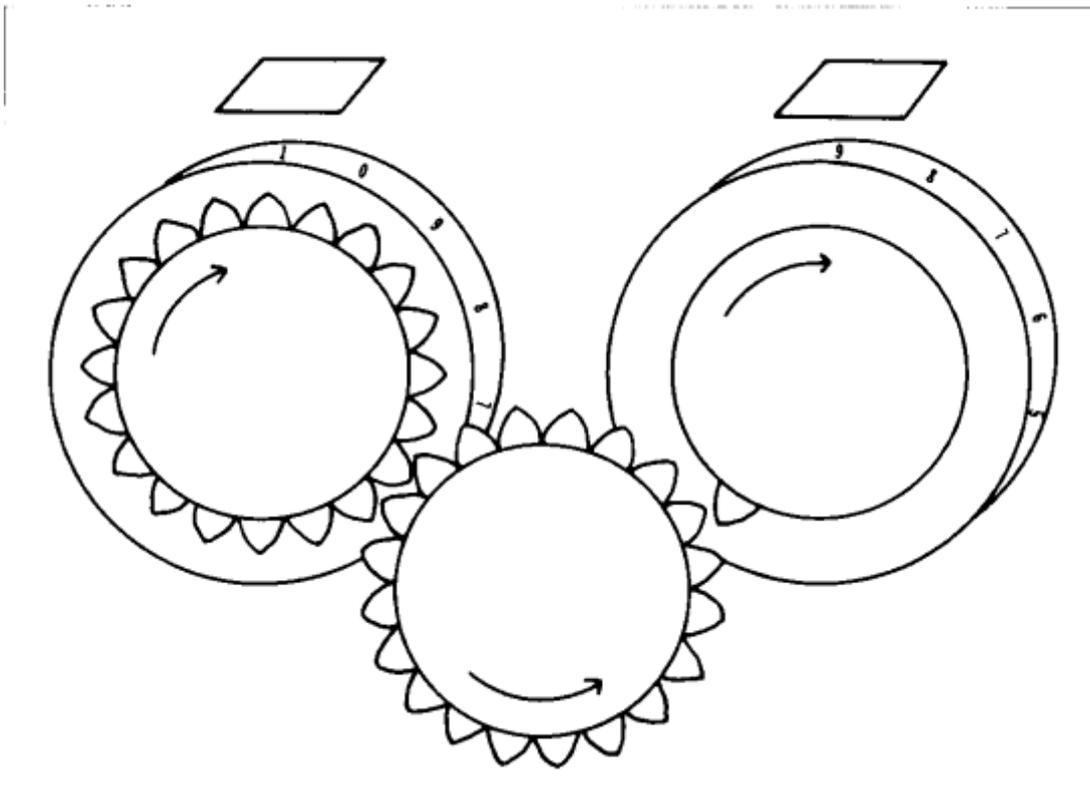
Il prototipo di Schickard purtroppo andò distrutto in un incendio e lo stesso inventore, amico del grande astronomo Keplero, dopo poco tempo morì di peste durante la guerra dei Trent'anni.

L'esistenza di questo dispositivo fu scoperta solo nel 1957 esaminando alcune lettere inviate da Schickard a Keplero (datate 1623 e 1624). Sulla base di queste descrizioni è stato possibile ricostruire un probabile modello dell'Orologio Calcolatore.



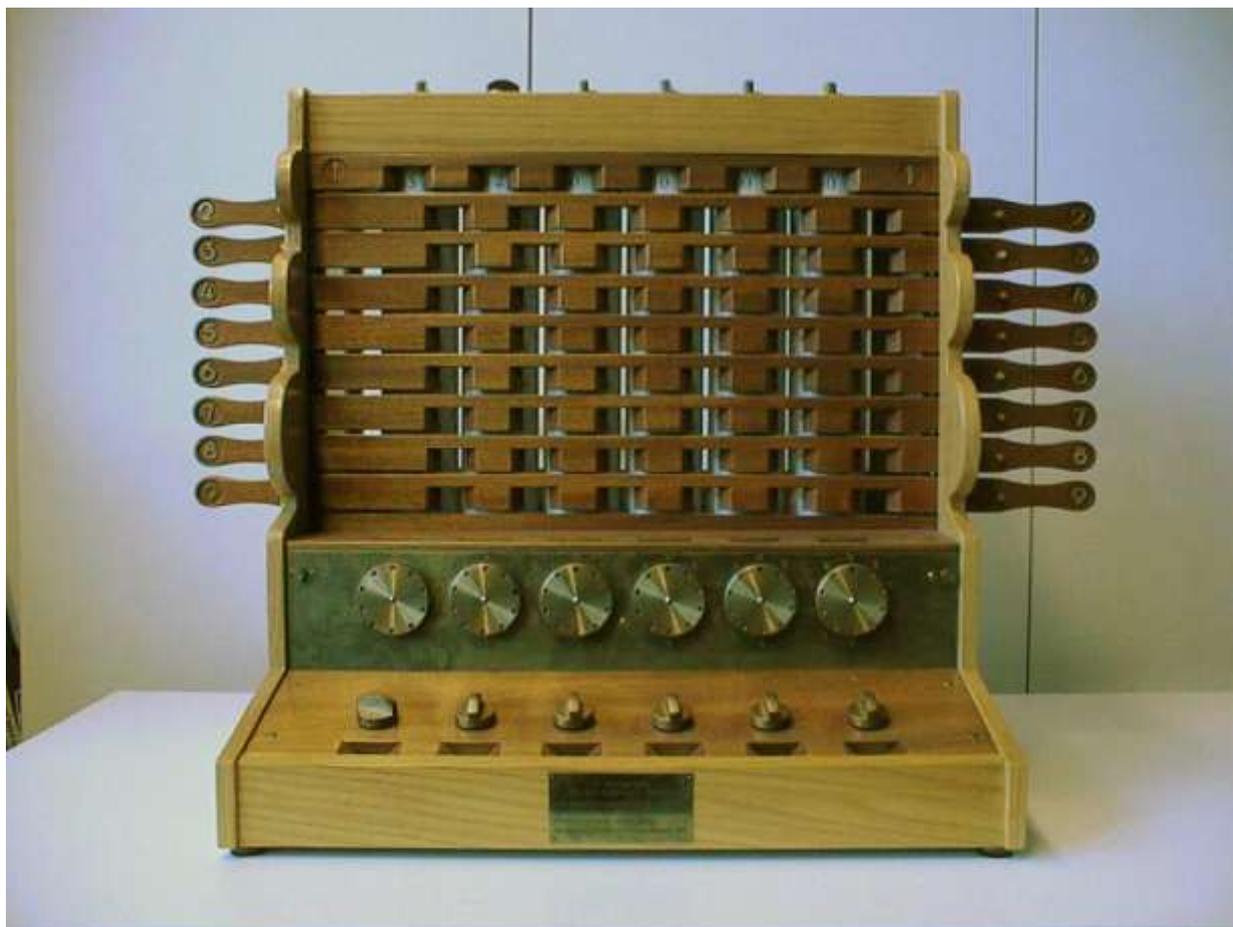
Schizzi del calcolatore Schikard.

Per risolvere il problema del riporto Schickard utilizzò una ruota ausiliaria che veniva azionata dalla ruota dell'unità, dotata di un unico dente (ruota mutile), quando la ruota passava dal nove allo zero.



Probabile schema del meccanismo del riporto utilizzato da Schickard. La ruota a destra dotata di un solo dente fa scattare la ruota a sinistra di un'unità solo dopo aver completato un intero giro.

Per eseguire la moltiplicazione e la divisione la macchina di Schickard utilizzava un adattamento dei bastoncini di Nepero riportati su cilindri (come in quelli che verranno realizzati in seguito da Schott).



Ricostruzioni dell'Orologio Calcolatore di Schickard.

L'addizionatrice di Pascal



Blaise Pascal (1623-1662).

Anche il matematico e filosofo francese Blaise Pascal inventò, indipendentemente da Schickard, una macchina calcolatrice per agevolare il lavoro di suo padre, esattore delle imposte a Rouen. Nel 1642, a soli 19 anni, inventò la Pascalina!

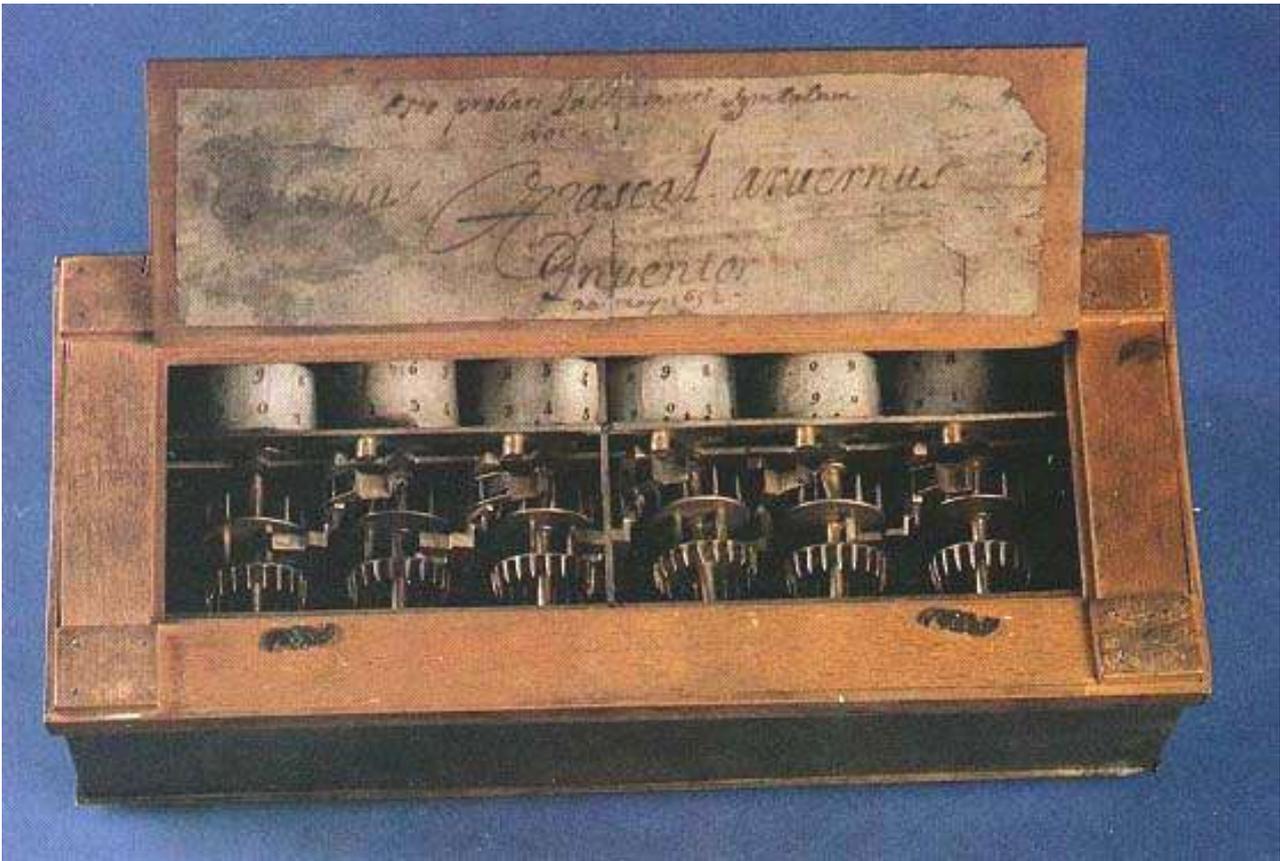
La macchina, completata nel 1644 e chiamata "Pascalina", era in grado di eseguire addizioni e sottrazioni tra numeri interi con il riporto automatico delle cifre (una macchina di questo genere viene anche detta **totalizzatore**).



Vista esterna della Pascalina.

La Pascalina funzionava con un sistema di ruote sulla cui circonferenza erano incise le cifre da zero a nove; le ruote (da cinque, nei primi modelli, fino a otto, negli ultimi modelli) rappresentano le unità, le decine, le centinaia e così via.

Un opportuno meccanismo faceva sì che la rotazione delle ruote con i numeri rendesse automatica l'operazione dei riporti.



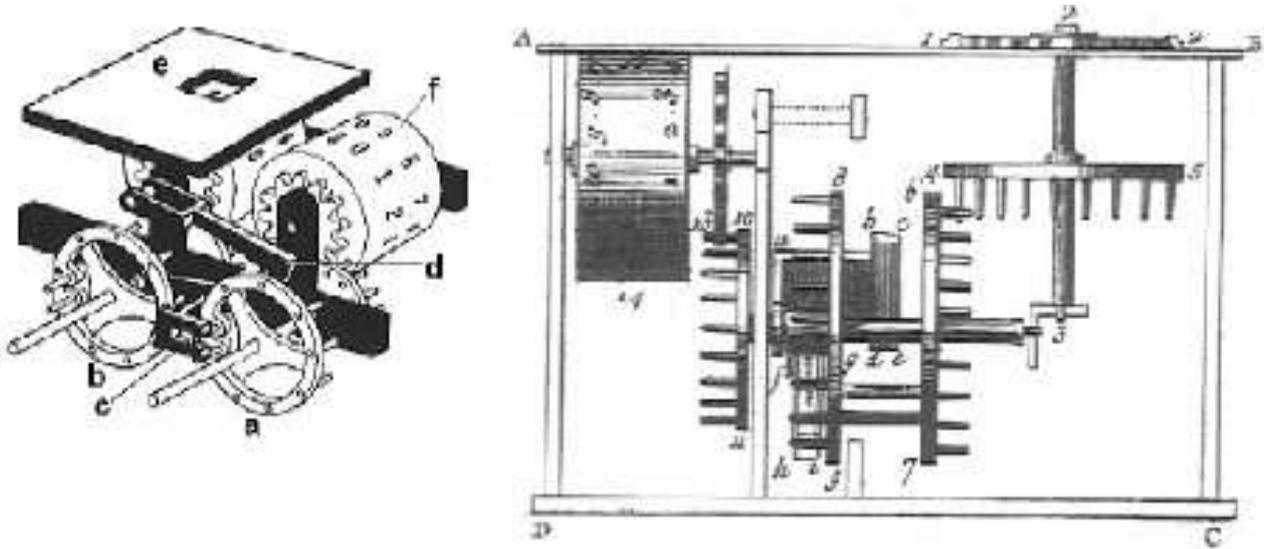
Vista dell'interno della Pascalina.

Quando la prima ruota (quella dell'unità) completa un giro, fa avanzare di un'unità quella contigua delle decine e così via.

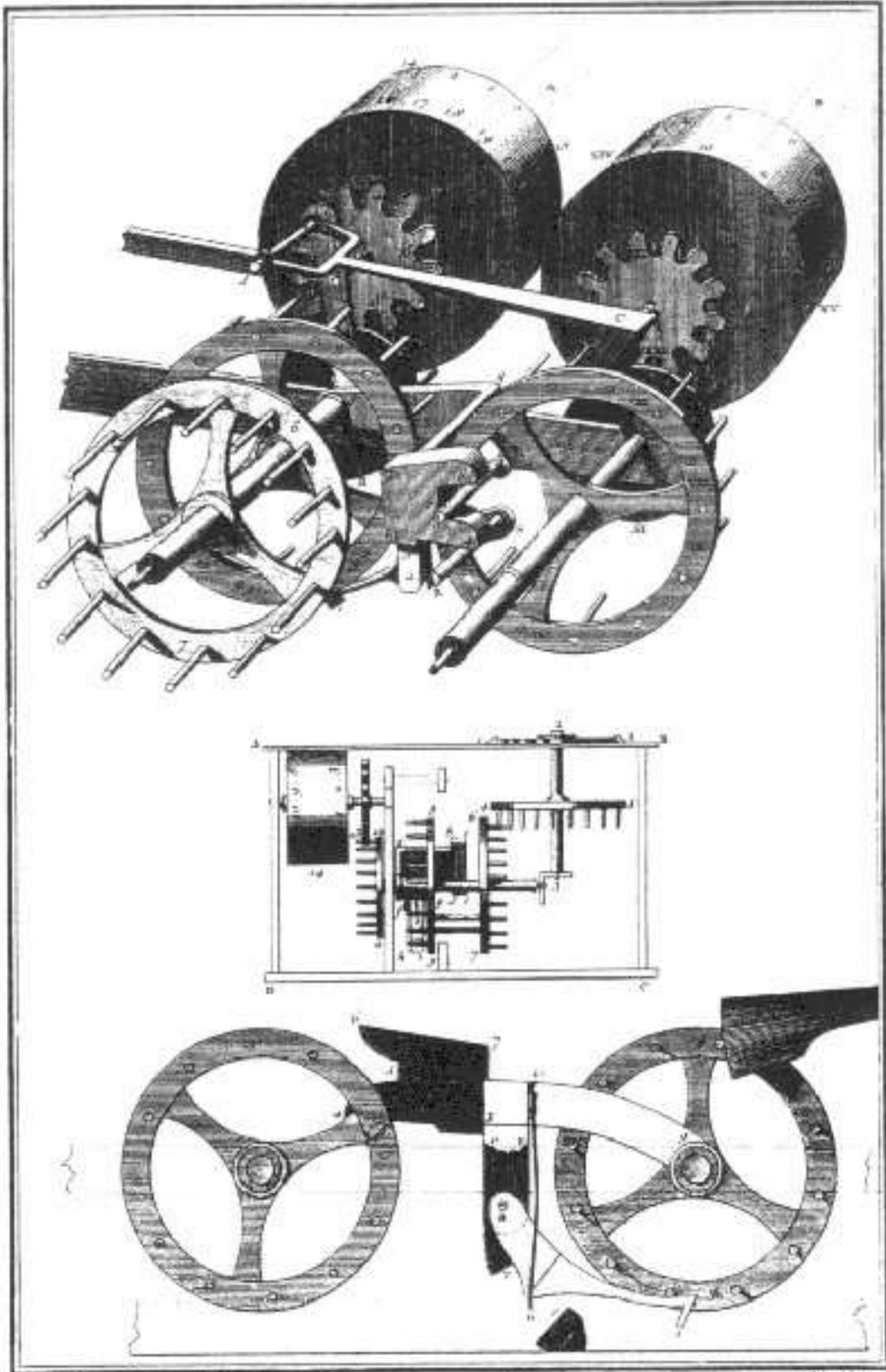
Poiché le ruote possono girare in una sola direzione non è possibile svolgere la sottrazione girando in senso opposto le ruote.

La **sottrazione** veniva invece ridotta ad una somma mediante un accorgimento basato sulla complementazione delle cifre del sottraendo (**complemento a nove**), tecnica già utilizzata con l'abaco.

Il meccanismo del riporto inventato da Pascal era più complesso di quello di Schickard ed è illustrato nelle seguenti figure:



Meccanismo interno per la trasmissione dei movimenti per una data cifra.



Algebre et Arithmetique - Machines Arithmetiques de Pascal.

Meccanismo di Pascal relativo a due cifre.



VIDEO

Animazione meccanismo Pascalina: [Video](#) [da http://calculmecanique.chez-ali-ce.fr/francais/Pascaline/Pascaline_films/Pascaline_sautoir.htm]



LINK

<http://www-groups.dcs.st-and.ac.uk/~history/index.html>

<http://calculmecanique.chez-alice.fr/francais/Pascaline/Pascaline.htm>

Leibniz e l'automazione della moltiplicazione



Wilhelm Leibniz (1646-1716).

Il totalizzatore di Schickard e quello di Pascal consentivano di eseguire direttamente le operazioni di somma e sottrazione, ma non le altre operazioni matematiche.



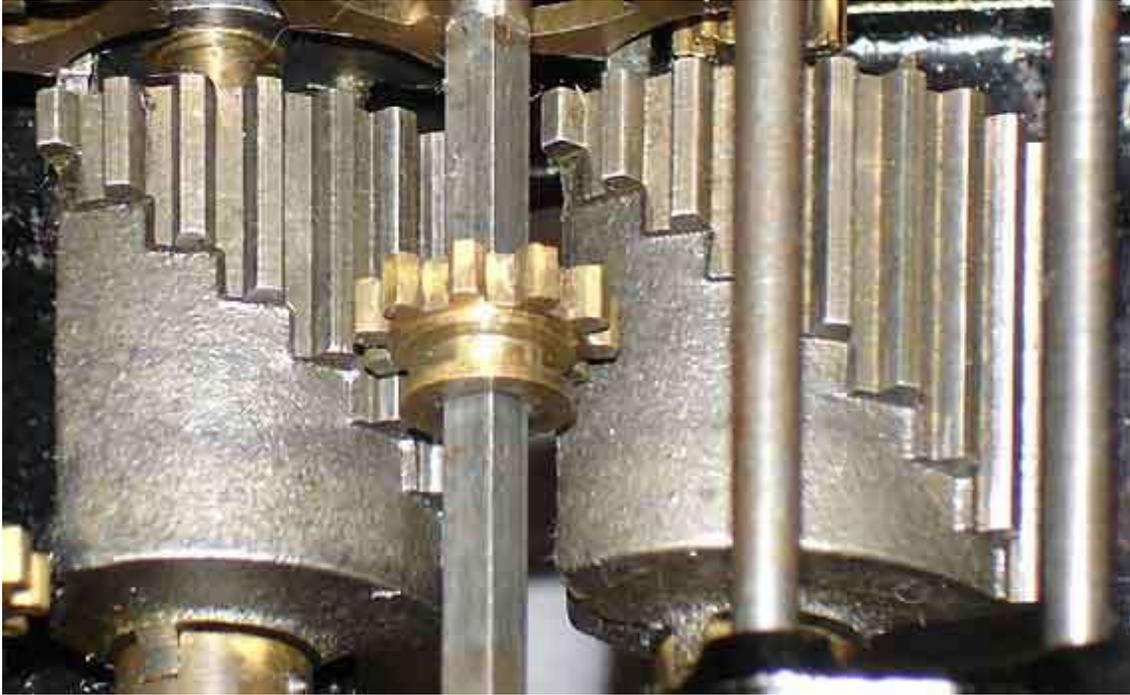
Ricostruzione della calcolatrice di Leibniz.

Un primo passo fu l'aggiunta di un meccanismo **per eseguire la moltiplicazione** e la prima soluzione proposta per tale operazione fu data dal matematico e filosofo tedesco W. **Leibniz** (1646-1716) nel 1694.

L'idea base per eseguire la moltiplicazione fu quella di ricorrere alle addizioni ripetute, ad esempio dovendo moltiplicare 18×5 è sufficiente tradurre la moltiplicazione nella somma $18 + 18 + 18 + 18 + 18$.

- Da un lato la somma può essere eseguita facendo ricorso ad un **totalizzatore**, cioè ad un dispositivo capace di realizzare somme e
- dall'altro lato serve un meccanismo (**traspositore**) che consenta di evitare di dover inserire manualmente nella macchina più volte il numero.

Il meccanismo chiave che permette di eseguire quest'ultima operazione viene chiamato **traspositore**. Mentre il problema di come realizzare il totalizzatore era già stato risolto da Schickard e Pascal, rimaneva aperto quello del traspositore.

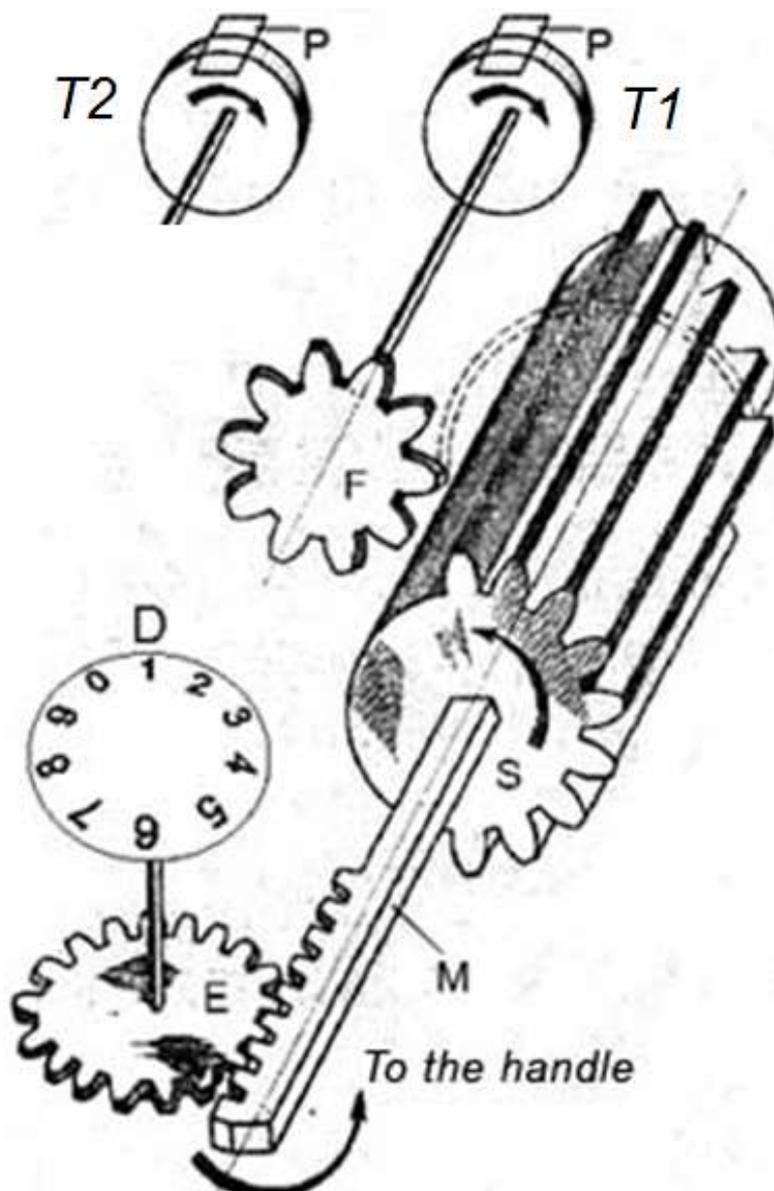


Ruota di Leibniz, basata su un tamburo a gradini (traspositore a gradini).

Il primo **traspositore** venne realizzato da Leibniz sfruttando un dispositivo che prese poi il nome di "**ruota di Leibniz**" (o traspositore a gradini di Leibniz).

Un tale dispositivo permette di simulare una ruota dentata con un numero variabile di denti.

Nella seguente figura vediamo lo schema del meccanismo per “gestire” una singola cifra: è presente una **ruota totalizzatrice** T1 con le dieci cifre (il cui funzionamento assieme ad altre ruote totalizzatrici è simile a quelle di Pascal), una piccola ruota a dieci denti F per muovere la ruota totalizzatrice, il tamburo a gradini S e una ruota di input D per inserire il moltiplicando.



Disegno del tamburo a gradini di Leibniz.

Il tamburo a gradini S viene azionato da una manovella e permette di far girare la ruota F che a sua volta fa ruotare la ruota totalizzatrice T1.

Naturalmente per gestire numeri a più cifre è necessario avere più di uno dei dispositivi qui rappresentati ed è necessario aggiungere inoltre un meccanismo di riporto (qui non illustrato) tra la ruota totalizzatrice T1 e l'altra ruota totalizzatrice T2 (di cui non viene mostrato il corrispondente tamburo a gradini).

Il tamburo S può essere spostato avanti o indietro mediante la cremagliera M; la cremagliera M viene mossa a sua volta dalla ruota di input D.

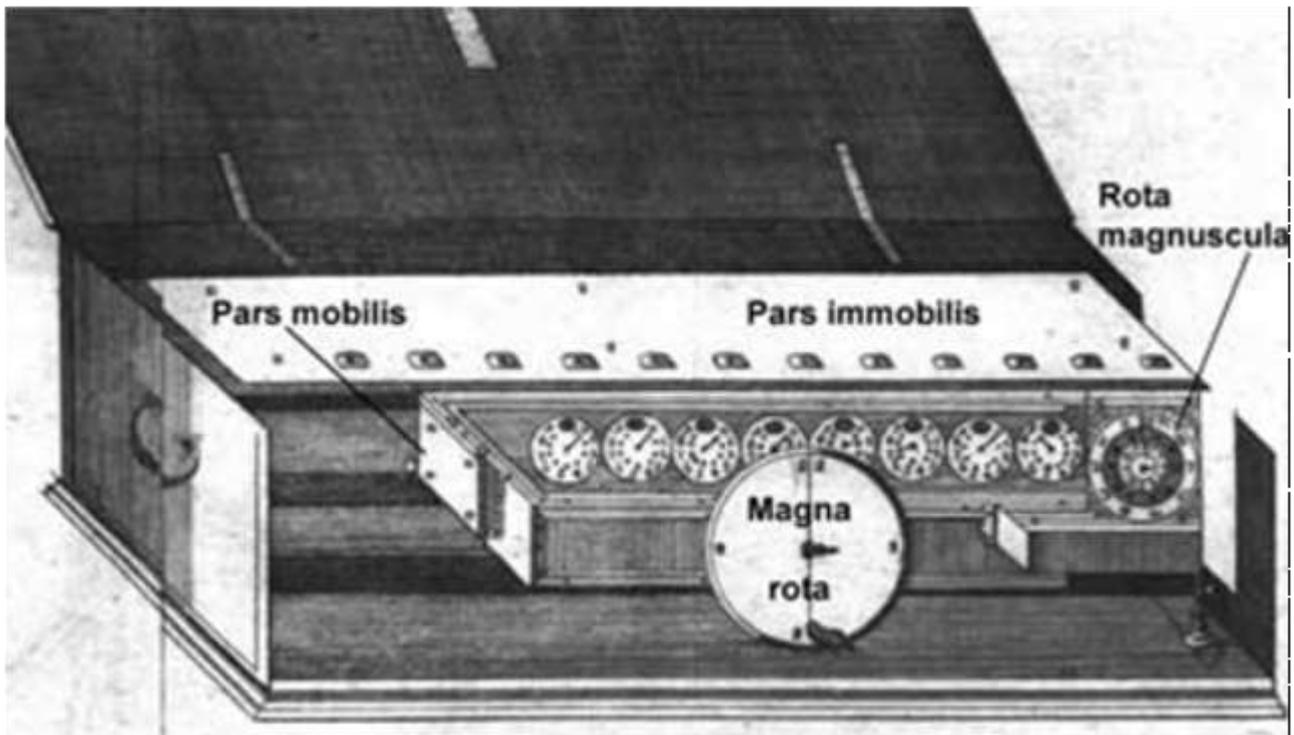
A seconda della posizione del tamburo S, questo va ad "ingranare" con un certo numero di denti la ruota F. Ad esempio, quando la ruota dentata D è nella posizione 8, solo 8 denti del tamburo saranno in corrispondenza della ruota F e quindi una rotazione del tamburo S fa avanzare di 8 scatti la ruota F, "sommando" al totalizzatore T1 8 unità.

Supponiamo ora di voler eseguire il prodotto 8×5 ; questo viene decomposto nella somma $8 + 8 + 8 + 8 + 8$, realizzata nel seguente modo:

- inizialmente tutte le ruote totalizzatrici T1, T2 ecc. vengono messe a zero e la ruota D di input viene spostata in modo da rappresentare il moltiplicando 8; in un certo senso l'operazione equivale a "memorizzare" il numero 8 nel traspositore;
- a questo punto un giro di manovella fa compiere una rotazione al tamburo il quale con i suoi 8 denti fa ruotare in avanti la ruota F di 8 scatti e di conseguenza anche la ruota totalizzatrice T1: su di essa leggeremo 8;
- un altro colpo di manovella con un giro del tamburo fa ruotare la ruota totalizzatrice T1 eseguendo quindi $8 + 8$: nella ruota T1 comparirà la cifra 6 e (grazie al meccanismo del riporto) nella ruota T2 comparirà la cifra 1;
- ogni volta che diamo un colpo di manovella facendo fare un giro al tamburo S viene aggiunto 8 al risultato parziale presente nel totalizzatore. Quindi con cinque colpi di manovella in tutto si completa la moltiplicazione;
- alla fine, nella ruota T1 avremo la cifra 0 e nella ruota T2, sempre grazie al meccanismo del riporto (non presente in figura), la cifra 4, cioè il risultato rappresentato è 40.

In questo modo è possibile realizzare una moltiplicazione mediante somme ripetute. È presente un apposito contatore che tiene il conto di quante volte viene sommato il moltiplicando a se stesso (cioè di quanti giri di manovella fare). Con un moltiplicando composto da più cifre è necessario avere più tamburi a gradini disposti in parallelo. Il moltiplicando viene inserito spostando le ruote del tipo D (uno per ogni cifra del moltiplicando) e poi facendo girare contemporaneamente con una manovella (collegata ad una ruota detta *Magna rota*) i tamburi del tipo S; in questo caso la manovella agisce contemporaneamente su tutti i tamburi a gradini.

Un accorgimento essenziale permette poi di semplificare le moltiplicazioni quando il moltiplicatore è composto da più cifre. Infatti, per moltiplicare, ad esempio, 365 per 124 non era necessario eseguire 124 somme ripetute di 365, cosa che sarebbe assai noiosa!



Parte mobile e immobile della macchina di Leibniz.

La macchina di Leibniz era dotata di un apposito carrello mobile (*Pars mobilis*), che consentiva di “spostare a sinistra” il moltiplicando memorizzato sui tamburi rispetto al totalizzatore (*Pars immobilis*), come nella consueta procedura di moltiplicazione scritta:

365 ×

124 =

1460

730 <--- spostamento carrello

365 <--- spostamento carrello

45260

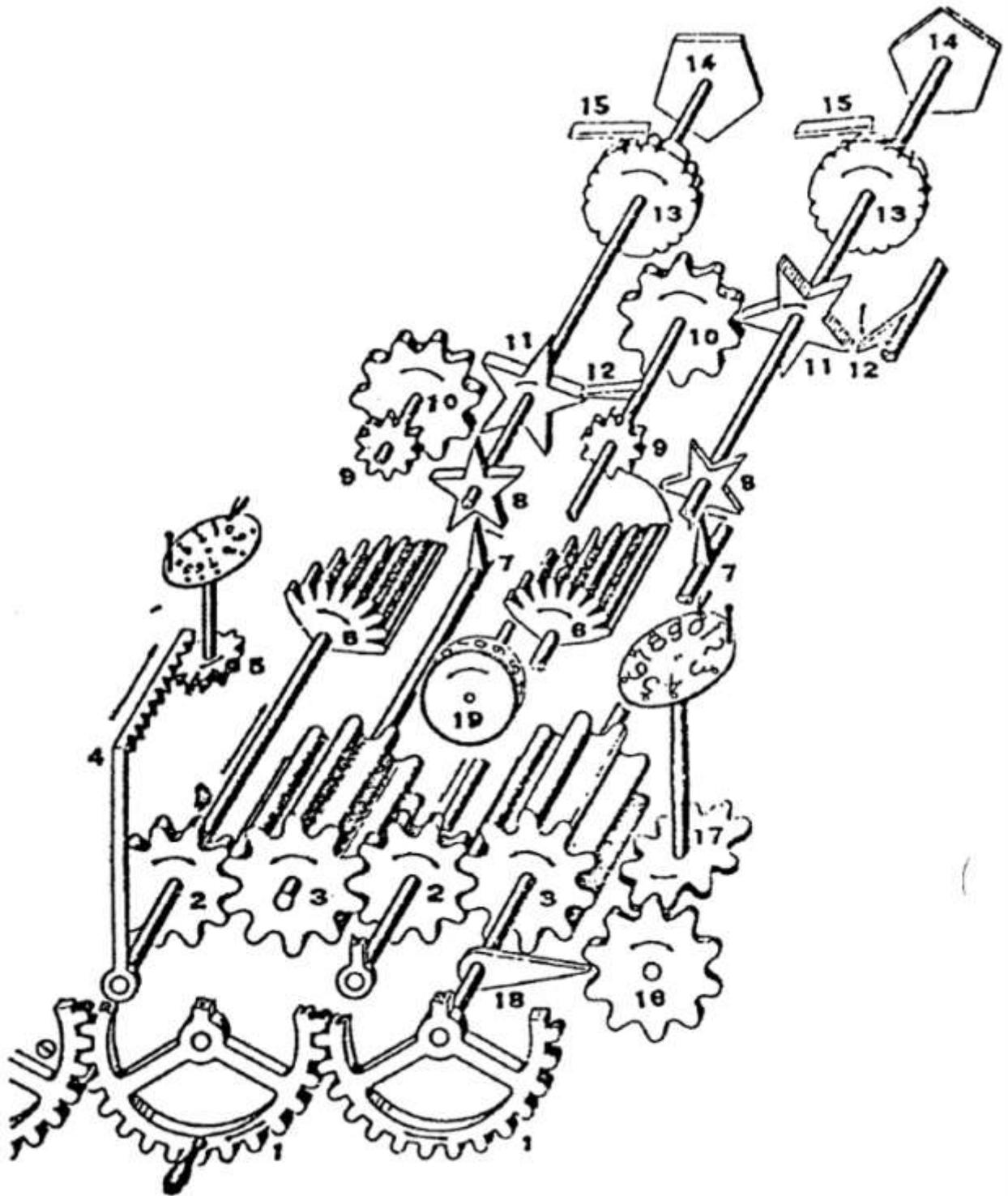
Più precisamente, il processo di calcolo avveniva nel seguente modo:

- prima si inserisce il moltiplicando nel traspositore muovendo le ruote del tipo D;
- si moltiplica poi il moltiplicando per 4 mediante somme ripetute, facendo fare alla Magna rota e quindi ai tamburi quattro giri (sommando cioè il moltiplicando a sé stesso quattro volte); secondo il processo sopra descritto; il risultato della moltiplicazione registrato nel totalizzatore è 1460;
- si sposta a sinistra poi il carrello con tutto il moltiplicando in memoria a sinistra di una “cifra” in modo da agire solo sulle cifre del totalizzatore dalla decina in su;
- e si procede in modo da moltiplicare per 2 il moltiplicando con due giri di manovella facendo girare due volte i tamburi; questo risultato parziale, 730, si va quindi ad aggiungere nel totalizzatore al precedente valore, 1460; lo spostamento del carrello totalizzatore ha fatto sì che la somma eseguita corrisponda in realtà a $1460 + 7300$; il risultato che si ottiene nel totalizzatore è ora 8760; infine
- dopo aver spostato a sinistra ancora di una posizione il carrello, con un solo giro di manovella si completa la moltiplicazione, eseguendo quindi l'ultima addizione mancante $8760 + 36500$.

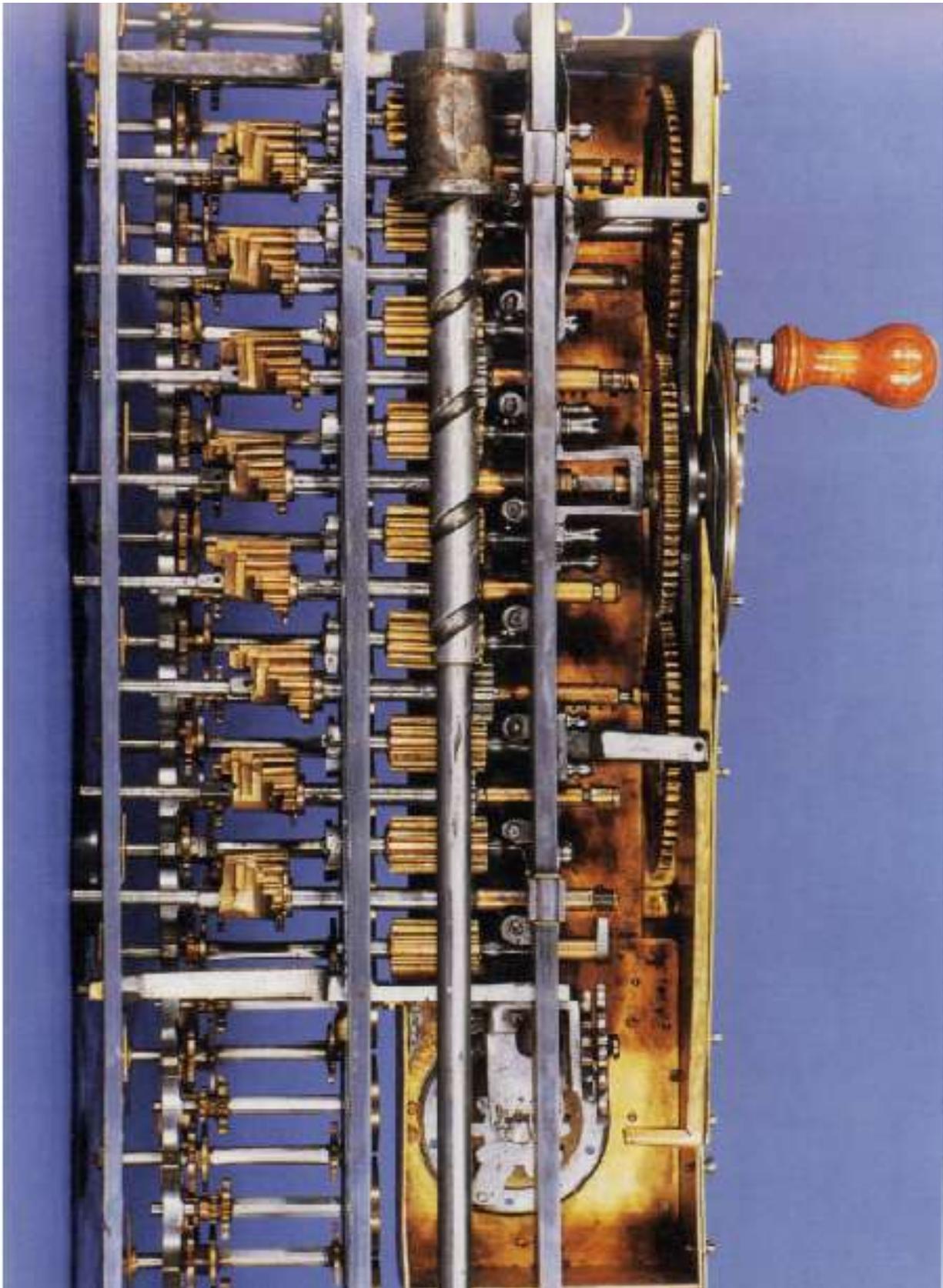
Riassumendo in forma schematica il processo di calcolo:

$$\begin{array}{r}
 365 \times \\
 124 = \\
 \hline
 365 + \left. \begin{array}{l} \\ \\ \\ \\ \end{array} \right\} \begin{array}{l} 4 \text{ giri di manovella} \\ \\ \\ \\ \end{array} \\
 365 + \left| \\
 365 + \left| \\
 365 \right. \left. \begin{array}{l} \\ \\ \\ \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{totalizzatore: } 1460 \\ \\ \\ \end{array} \\
 \\
 \text{spostamento carrello} \\
 \\
 365 + \left. \begin{array}{l} \\ \\ \end{array} \right\} \begin{array}{l} 2 \text{ giri di manovella} \\ \\ \end{array} \\
 365 + \left. \begin{array}{l} \\ \\ \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{totalizzatore: } 8760 \\ \\ \end{array} \\
 \\
 \text{spostamento carrello} \\
 \\
 365 = \left. \begin{array}{l} \\ \\ \end{array} \right\} \begin{array}{l} 1 \text{ giro di manovella} \\ \\ \end{array} \\
 \hline
 45260
 \end{array}$$

In questo modo la moltiplicazione avveniva facendo girare la manovella dei tamburi un numero di giri pari solo alla somma delle cifre del moltiplicatore: $1 + 2 + 4 = 7$.



Il meccanismo di Leibniz con la parte necessaria per eseguire anche i riporti. La figura dà anche un'idea della notevole complessità della macchina inventata da Leibniz.



Interno della calcolatrice di Leibniz.



VIDEO

Animazione ruota: [Video](#)

Bisogna dire che lo stesso meccanismo può essere sfruttato anche per **eseguire la divisione mediante differenze successive**.

Per molto tempo, l'approccio di Leibniz rimase comunque l'unica soluzione per eseguire moltiplicazioni. Solo nel 1887 il francese L.A. Bollée (1870-1913) inventò una calcolatrice (*aritmografo*) capace di eseguire direttamente le moltiplicazioni senza ricorrere ad una serie di addizioni successive ma mediante una tabella (pitagorica) delle moltiplicazioni.

Purtroppo le difficoltà di costruzione della macchina e alcuni problemi nel funzionamento ne limitarono assai l'affidabilità e la calcolatrice rimase solo a livello prototipale.

1.4. Macchine calcolatrici nella Rivoluzione Industriale

Non sarà l'Illuminismo ma la Rivoluzione Industriale ad innescare l'effettiva richiesta di macchine da calcolo e quindi a spingere verso una loro produzione industriale:

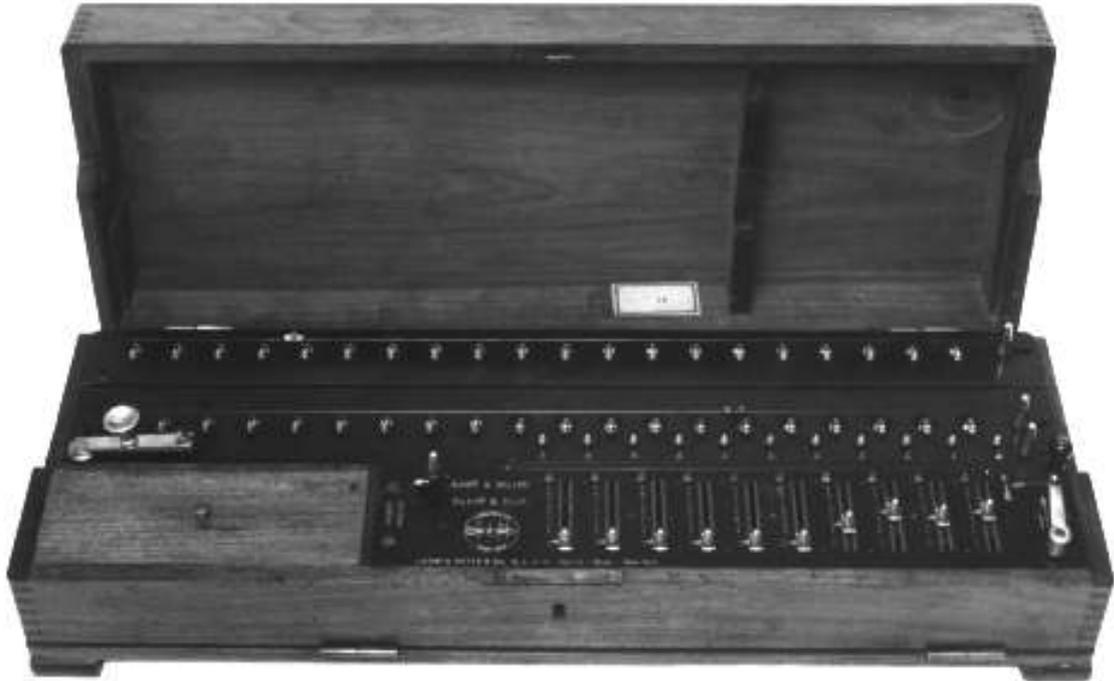
- **aumentò l'esigenza di calcoli** in campo tecnologico e, soprattutto, in campo contabile e
- **mise a disposizione gli standard costruttivi** necessari per realizzare calcolatrici affidabili e a prezzo contenuto.

L'Aritmometro

La prima calcolatrice meccanica ad essere prodotta in serie fu brevettata dal francese Charles Xavier Thomas de Colmar (1785-1870) nel 1820.

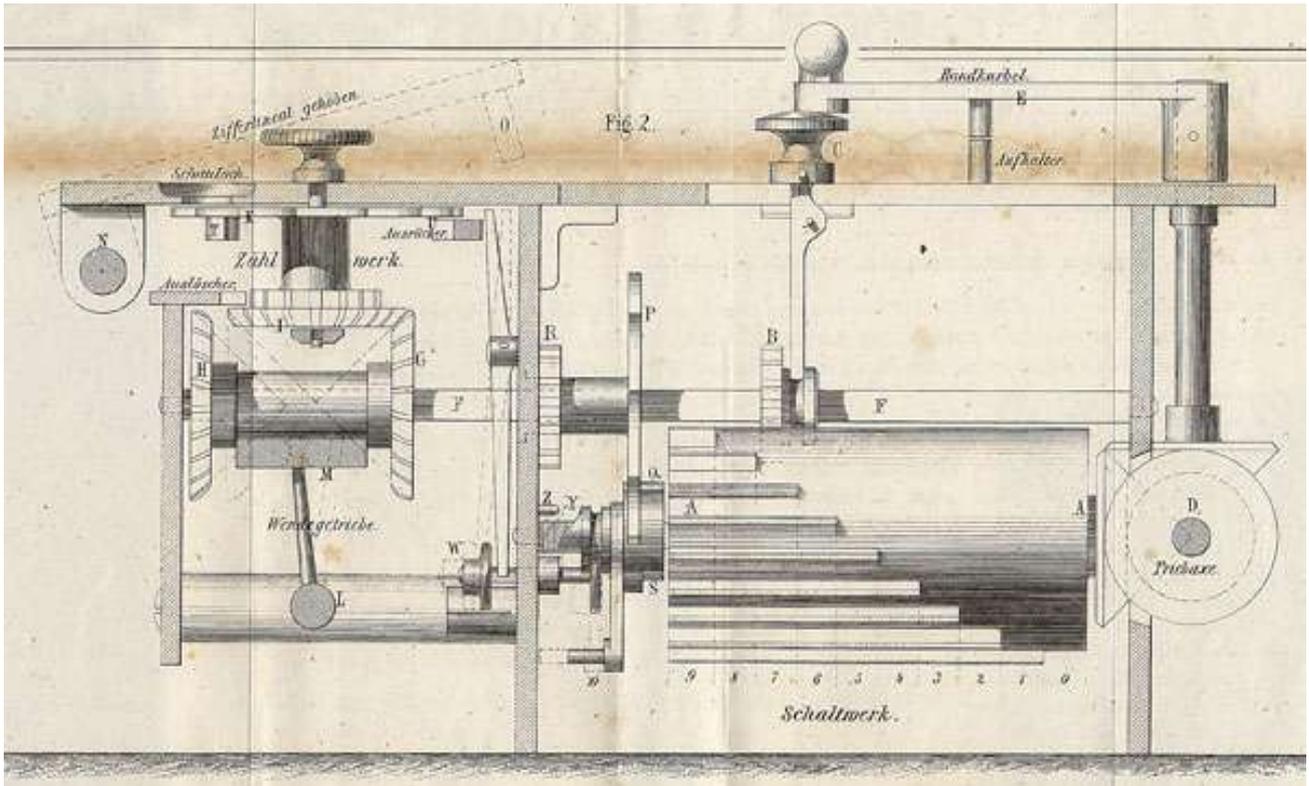
Questa macchina, chiamata **Aritmometro**, in grado di funzionare con sufficiente affidabilità, fu riprodotta in molti esemplari equivalenti fino agli anni '20 del Novecento.

Questa macchina adottava come principio di funzionamento lo stesso della calcolatrice di Leibniz (tamburo di Leibniz).



Arithmometro TIM, simile a quello di Thomas de Colmar (Coll. C. Bonfanti).

Questa macchina fu riprodotta in molti esemplari equivalenti fino agli anni '20.



Uno dei disegni di progetto dell'Arithmometro. [da <http://www.mhs.ox.ac.uk/staff/saj/arithmometer/figure2.htm>]

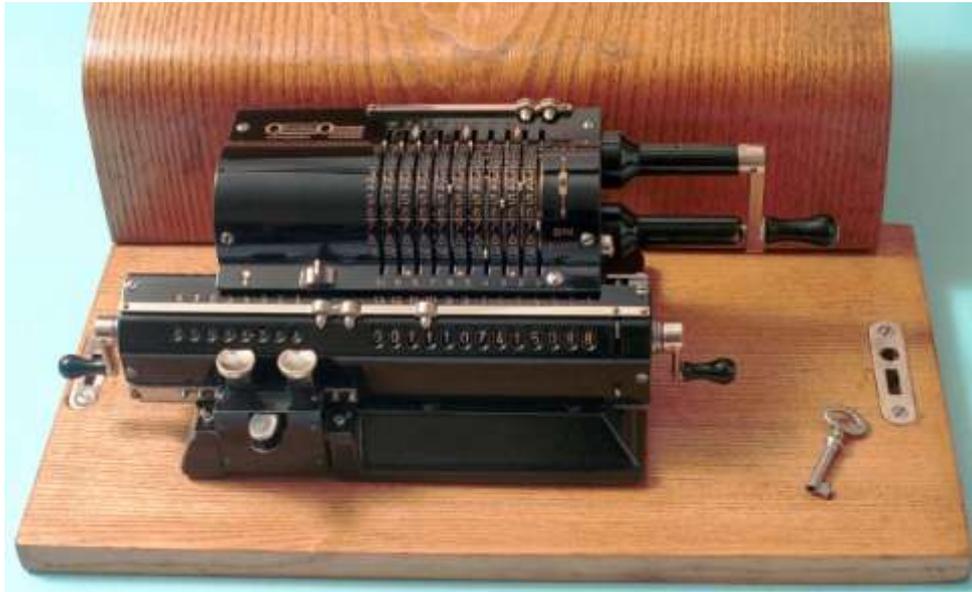


LINK

<http://www.mhs.ox.ac.uk/staff/saj/arithmometer/>

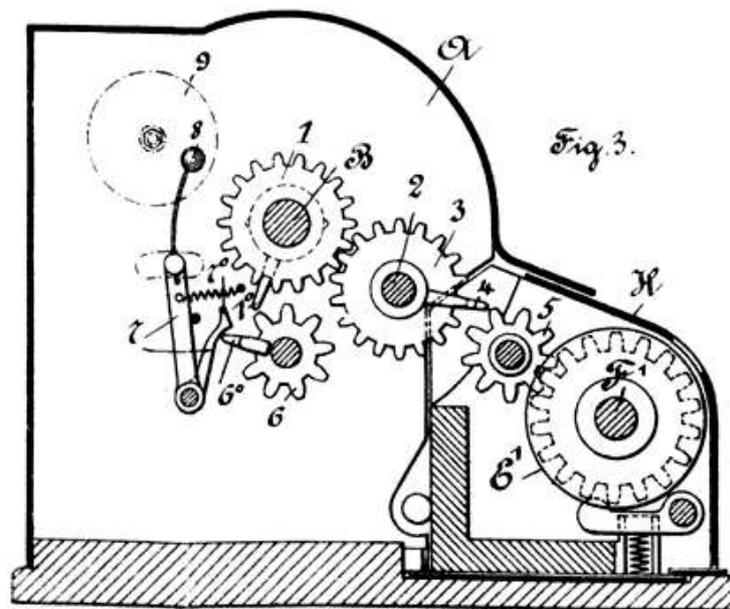
http://calculmecanique.chez-alice.fr/francais/histoire_entraîneurs.htm

La ruota moltiplicatrice di Odhner



Uno dei modelli delle calcolatrici di Odhner.

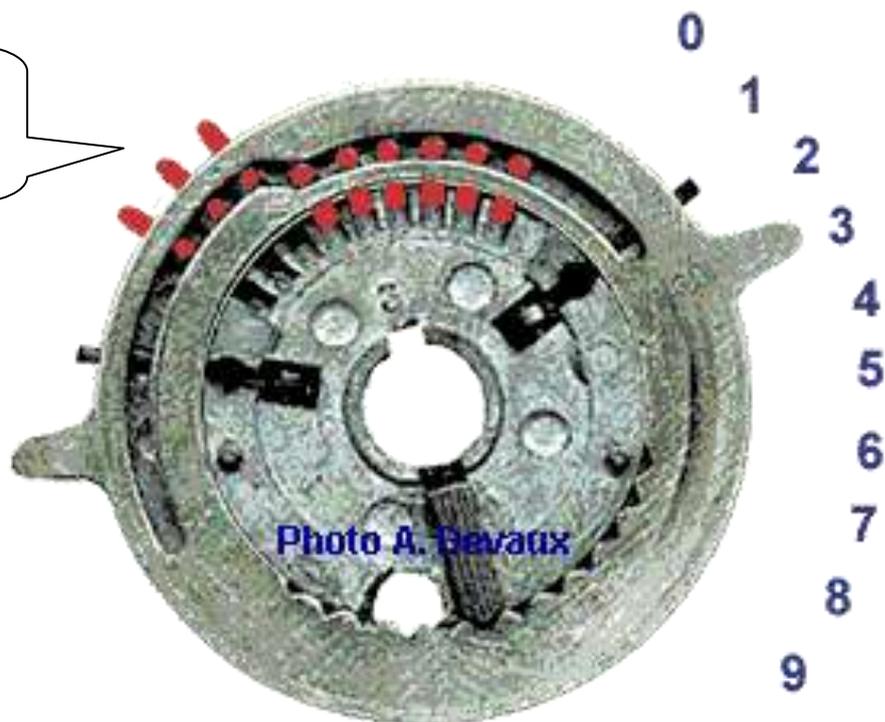
Nel 1878 un ingegnere svedese realizzò un nuovo dispositivo meccanico al posto della ruota di Leibniz, che aveva caratterizzato la maggior parte delle macchine calcolatrici fino a quel momento. Il meccanismo (anche questo detto **traspositore**) di Odhner era costituito da **una ruota con un numero variabili di denti** (da 0 a 9).



Uno schema interno della calcolatrice di Odhner.

Nella ruota di Odhner i denti erano mobili e potevano sporgere o meno dalla ruota a seconda della posizione di un'altra ruota concentrica:

Numero di denti variabili



Ruota a denti variabili inventata da Odhner (traspositore di Odhner).

Dal punto di vista funzionale, questa ruota poteva sostituire quella di Leibniz ed era alla base del calcolo per le moltiplicazioni e le divisioni.

Rispetto al meccanismo di Leibniz era molto più leggera e compatta e consentiva quindi realizzare calcolatrici più piccole dell'Aritmometro.



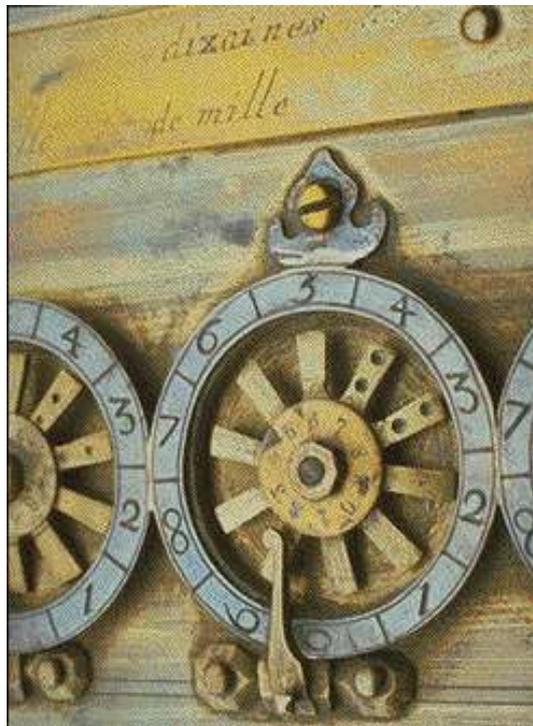
VIDEO

Animazione ruota: [Video](http://calculmecanique.chez-alice.fr/francais/histoire_entraîneurs.htm) [da http://calculmecanique.chez-alice.fr/francais/histoire_entraîneurs.htm]

[Video](#): calcolatrice di Odhner

L'inserimento dei numeri nella calcolatrici

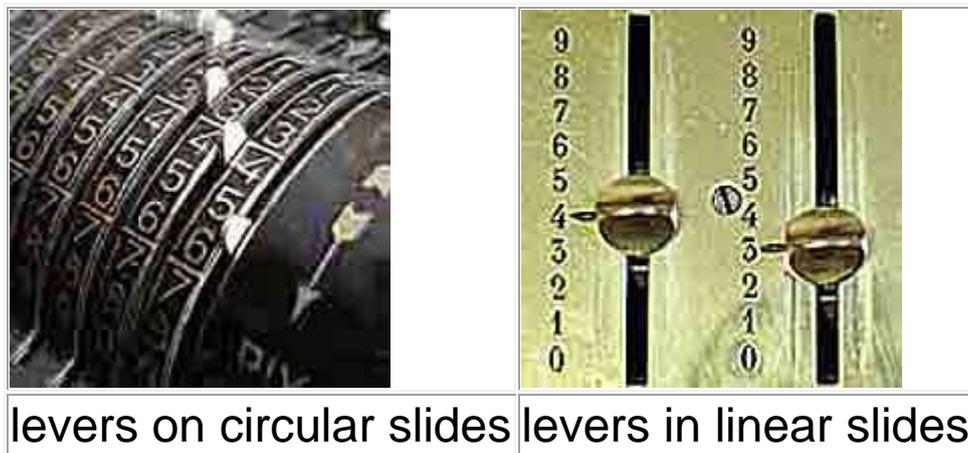
Inizialmente, l'inserimento dei dati nelle calcolatrici meccanica era effettuato ruotando opportunamente delle ruote su cui erano riportate le cifre, come negli orologi. La rotazione veniva effettuata con l'aiuto di uno stilo. La Pascalina fu la prima macchina ad adottare questa soluzione.



VIDEO

Animazione uso dello stilo: [Video](http://calculmecanique.chez-ali-ce.fr/francais/Pascaline/Pascaline_films/Pascaline_reports.htm) [da http://calculmecanique.chez-ali-ce.fr/francais/Pascaline/Pascaline_films/Pascaline_reports.htm]

Uno dei primi miglioramenti fu rappresentato dall'apparizione di levette e cursori per l'inserimento dei dati. Per registrare dati è sufficiente spostare il cursore vicino alla cifra da inserire.



Uno dei vantaggi di questo approccio fu rappresentato dalla separazione del meccanismo di inserimento dei dati da quello di calcolo. In tal modo i numeri inseriti potevano essere visti fino al nuovo inserimento e non venivano alterati durante il calcolo.

Attorno alla metà dell'800, grazie ai progressi della tecnologia meccanica, l'inserimento dei numeri cominciò ad essere effettuato mediante tasti come nelle attuali calcolatrici. Verso il 1850 l'italiano **Tito Gonella** inventò un primo prototipo di calcolatrice con la **tastiera** per l'inserimento dei numeri, ma sfortunatamente non ebbe il successo e la diffusione che avrebbe meritato e rimase solo un prototipo.



Comptometer (ideato da Felt, nel 1884) una delle prime calcolatrici meccaniche per uso commerciale dotate di tastiera.

La prima macchina calcolatrice a tasti a raggiungere invece la notorietà fu il **Comptometro**, realizzato dall'americano Dorr Eugene Felt, che brevettò l'invenzione nel 1887. L'effettiva produzione industriale di queste macchine iniziò attorno al 1897.

Inizialmente la **tastiera era di tipo esteso** (come in figura), ossia per ogni cifra (unità, decine, centinaia, ecc.) era presenta un set di dieci tasti per l'inserimento dei numeri.

La produzione industriale di calcolatrici a tastiera ridotta iniziò nel 1902 grazie a Dalton.



Calcolatrice meccanica Dalton, 1902.

Uno dei primi prototipi di calcolatrice meccanica a tastiera ridotta venne realizzato dal matematico Tito Gonella attorno al 1850.

[Audio 1](#): suono calcolatrice

[Audio 2](#): suono calcolatrice

Calcolatrici meccaniche scriventi



Calcolatrice meccanica scrivente della Burroughs.

Verso il 1890 cominciarono ad apparire calcolatrici capaci anche di **stampare su carta** i risultati delle operazioni. In particolare nel 1888 l'americano **William Steward Burroughs** ottenne il brevetto di un'addizionatrice dotata di un dispositivo di stampa.

In queste macchine era presente un meccanismo simile a quello delle macchine da scrivere.

In particolare, la stampa veniva eseguita mediante degli opportuni martelletti su cui erano impresse le diverse cifre, i quali opportunamente azionati andavano a colpire un nastro inchiostro interposto tra essi e la carta su cui stampare.

1.5. Il calcolo scientifico e l'analizzatore differenziale



Vannevar Bush con l'analizzatore differenziale da lui progettato presso il MIT (anni '30).

Il culmine del calcolo meccanico è costituito dai cosiddetti **analizzatori differenziali**, introdotti agli inizi degli anni '30 del Novecento.

Lo sviluppo di queste macchine rappresentò una svolta nell'ambito del calcolo automatico, poiché **segnò l'entrata in scena dei calcolatori nel mondo della ricerca scientifica**, dove da sempre era invece preferito il calcolo simbolico esatto o il calcolo approssimato basato su tavole numeriche.

Il mondo scientifico cominciò a manifestare l'esigenza di utilizzare macchine da calcolo progettate ad hoc per risolvere problemi complessi, per i quali il calcolo manuale richiedeva tempi lunghi e le normali calcolatrici meccaniche erano inadeguate.

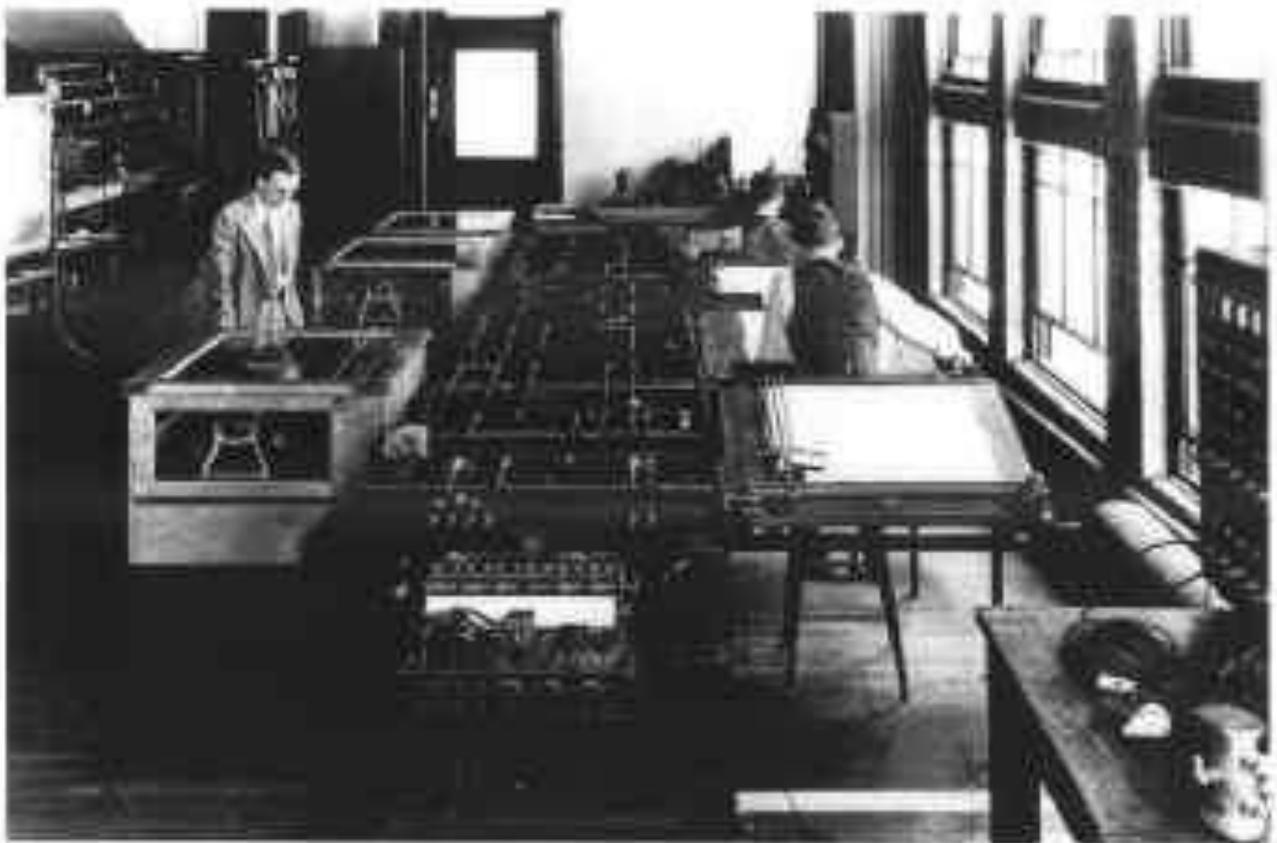
Sarà questa spinta del calcolo tecnico-scientifico, fortemente accelerata dallo **scoppio della Seconda Guerra Mondiale**, che nel decennio successivo, attraverso un cambio anche di tecnologia, porterà poi allo sviluppo dei moderni computer elettronici.

L'analizzatore differenziale, introdotto da **Vannevar Bush** (1890-1974) alla fine degli anni '20, era un computer di tipo analogico utilizzato **per risolvere equazioni differenziali**, legate a numerose applicazioni di carattere scientifico, ingegneristico e tecnologico.

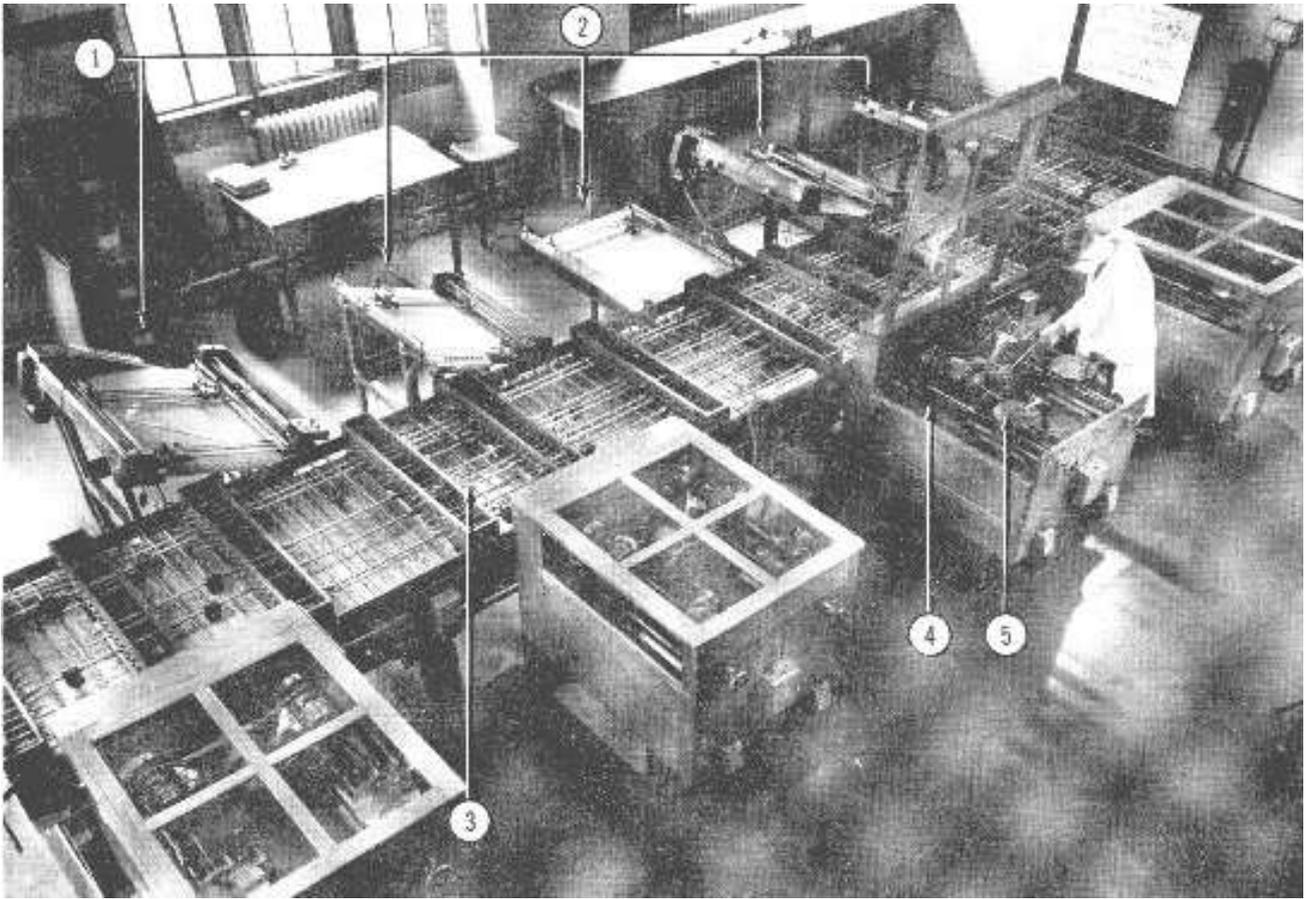
L'uso di integratori meccanici per la risoluzione di equazioni differenziali era già stato proposto nel secolo precedente, attorno al 1825, da James Thomson fratello di **Lord Kelvin** e alcune macchine integratrici per scopi specifici erano già state sperimentate.

L'integratore di Bush aveva tuttavia il merito di essere il primo dispositivo del genere di applicazione sufficientemente generale e sufficientemente affidabile per essere utilizzato per scopi pratici. Nel periodo immediatamente precedente alla seconda guerra mondiale ne furono costruiti vari modelli usati anche a scopo militare.

Queste macchine rappresentarono i calcolatori più potenti disponibili negli anni '30 prima dell'avvento dei computer elettronici.

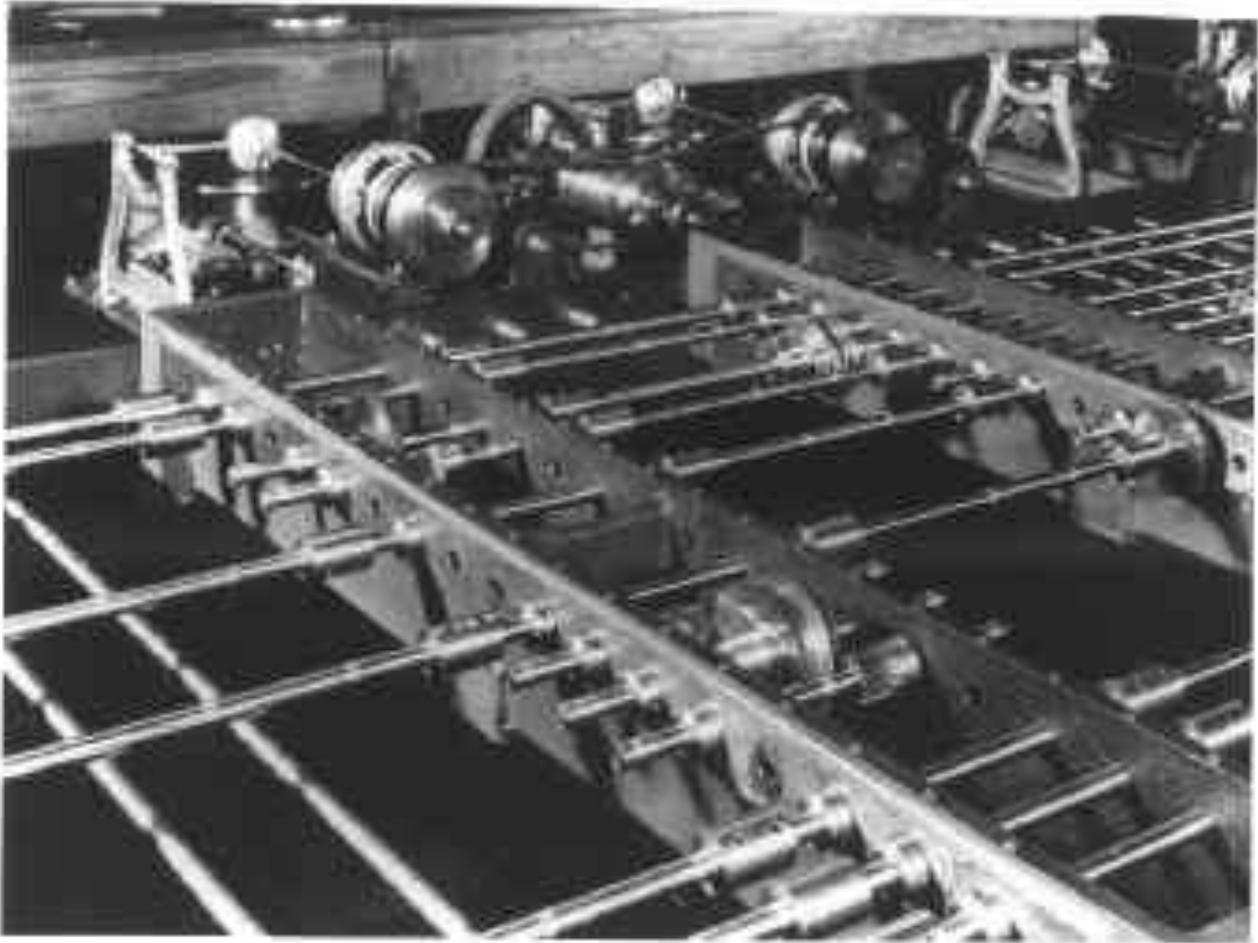


Vista generale dell'analizzatore differenziale. Le unità di integrazione (sei) sono all'interno delle scatole di legno ricoperte da vetro. Le barre metalliche avevano il compito di trasmettere le informazioni numeriche e sono visibili al centro. Le tavole per l'ingresso e l'uscita dei dati sono visibili a destra. In primo piano è visibile un tabulatore numerico che trasforma la posizione dell'albero meccanico in uscita numerica stampata.



Vista d'insieme dell'analizzatore differenziale.

L'analizzatore differenziale era una macchina molto complessa composta da diverse parti collegate insieme da opportuni alberi di trasmissione. Nella figura, sono visibili gli integratori e gli amplificatori di torsione insieme al sistema di alberi usato per le connessioni.



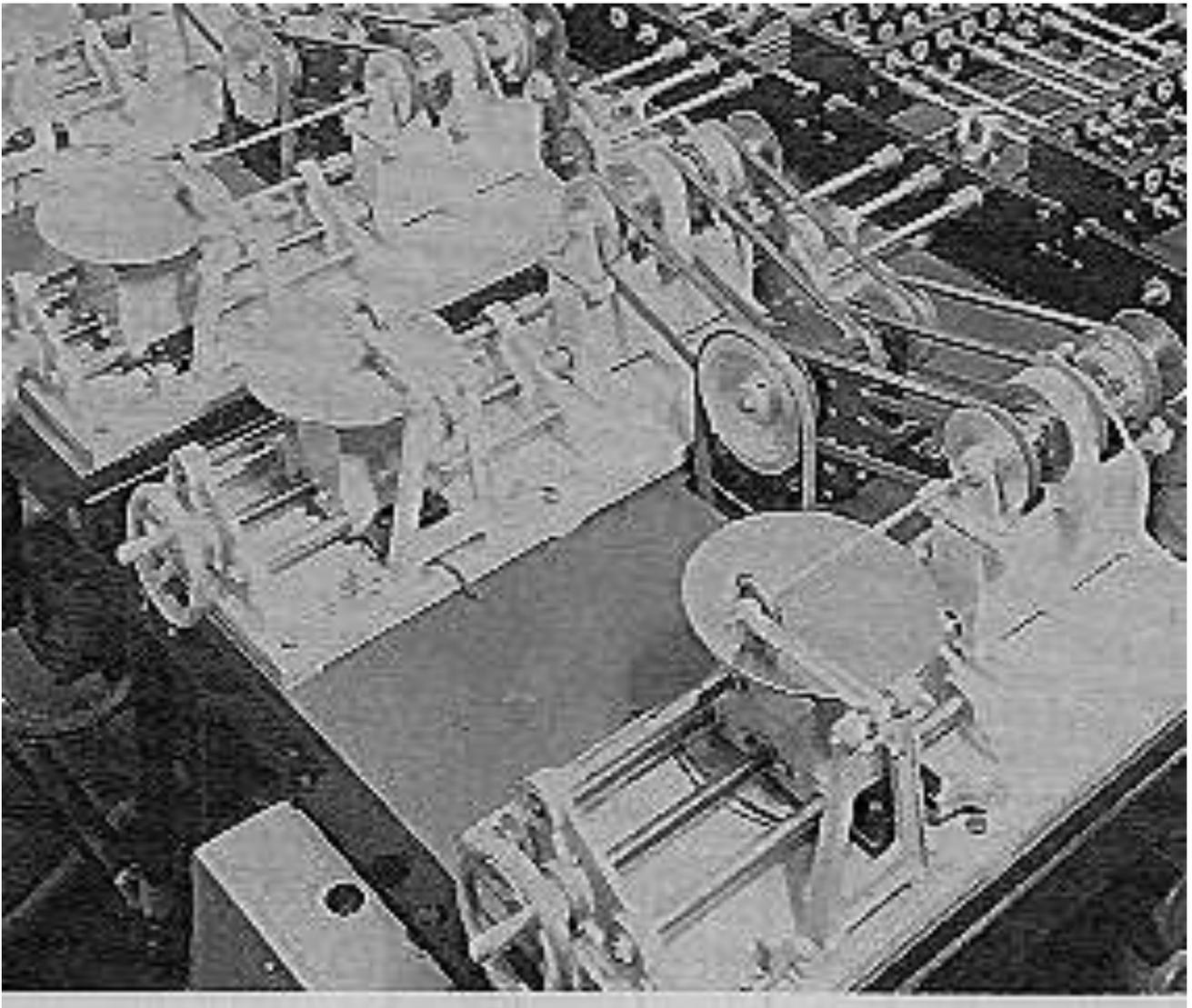
Vista degli alberi di trasmissione, che collegano le diverse unità di calcolo. Le variabili numeriche sono codificate come posizione angolare degli assi meccanici. La macchina viene programmata collegando secondo un opportuno schema le diverse unità di calcolo. Le variabili trasmesse sugli alberi in forma di rotazione possono sommate, moltiplicate, integrate ecc. dalle varie unità di calcolo.

Come abbiamo detto, l'analizzatore differenziale è costituito da una serie di unità collegate tra loro da lunghi alberi che trasmettono, per così dire, le variabili ed i risultati parziali fra i vari organi di calcolo.

Nell'analizzatore, una grandezza matematica viene rappresentata dal numero di giri di un albero.

Un'operazione matematica, che lega due differenti grandezze, è rappresentata da una particolare interconnessione meccanica fra i due alberi corrispondenti.

I collegamenti fra alberi e organi di calcolo sono diversi, a seconda del particolare problema da risolvere. Così ad esempio una coppia di ingranaggi con rapporti 1 a 5 rappresenta una moltiplicazione per 5, perché obbliga un albero a fare cinque volte il numero di giri dell'altro. Per eseguire i calcoli sono presenti diversi tipi di unità, tra queste il sommatore-sottrattore, l'integratore, il moltiplicatore.

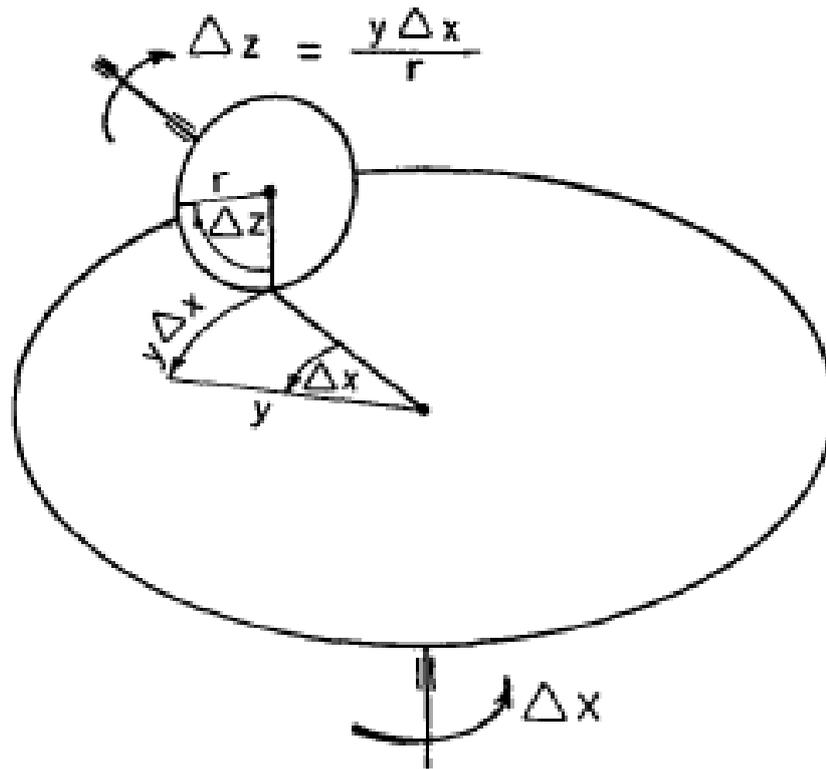


Alcuni dischi integratori dell'analizzatore differenziale.



Vista delle ruote e dischi di integrazione della macchina. I dispositivi che sembrano dei motori sulla sinistra sono gli “amplificatori di torsione di Nieman”, dispositivi a guida d’argano che funzionavano come amplificatori meccanici per poter procedere nelle successive operazioni di integrazione senza perdita di accuratezza.

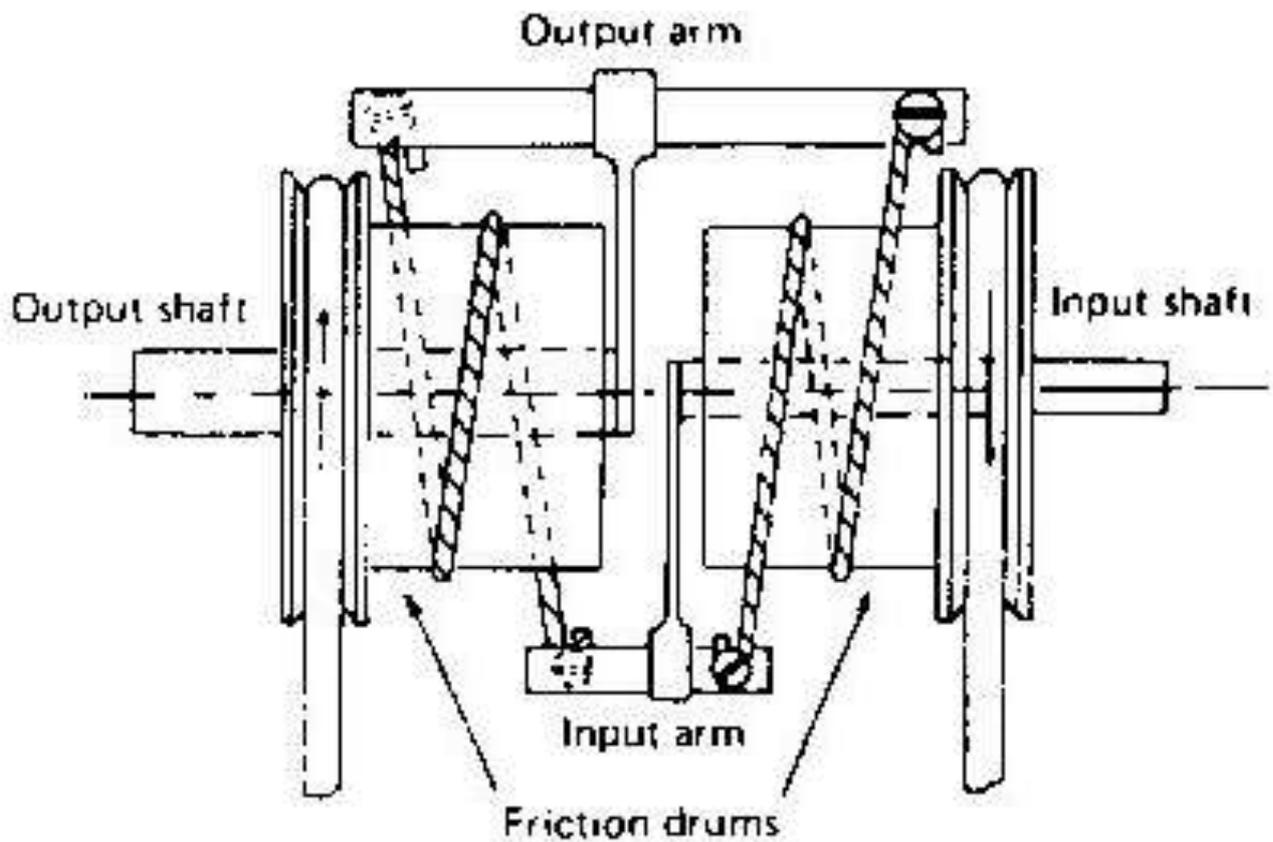
Di queste unità di calcolo la più importante per risolvere equazioni differenziali è **l’integratore.**



Meccanismo integratore dell'analizzatore differenziale.

L'integratore è in sostanza un ingranaggio a velocità di rotazione variabile e ha la forma di un disco rotante orizzontale su cui è appoggiata perpendicolarmente una rotellina con il bordo molto affilato.

La rotellina è guidata da una frizione e il rapporto di rotazione dell'ingranaggio può essere modificato variando la distanza della ruota dall'asse di rotazione del disco orizzontale, come illustrato nella figura.



Amplificatore meccanico di coppia.

Dal momento che la forza di rotazione che esce da un disco integratore è abbastanza piccola, affinché il calcolatore possa funzionare in pratica, è **necessario che sia presente un dispositivo in grado di amplificare la forza di rotazione generata da ciascun disco integratore.**

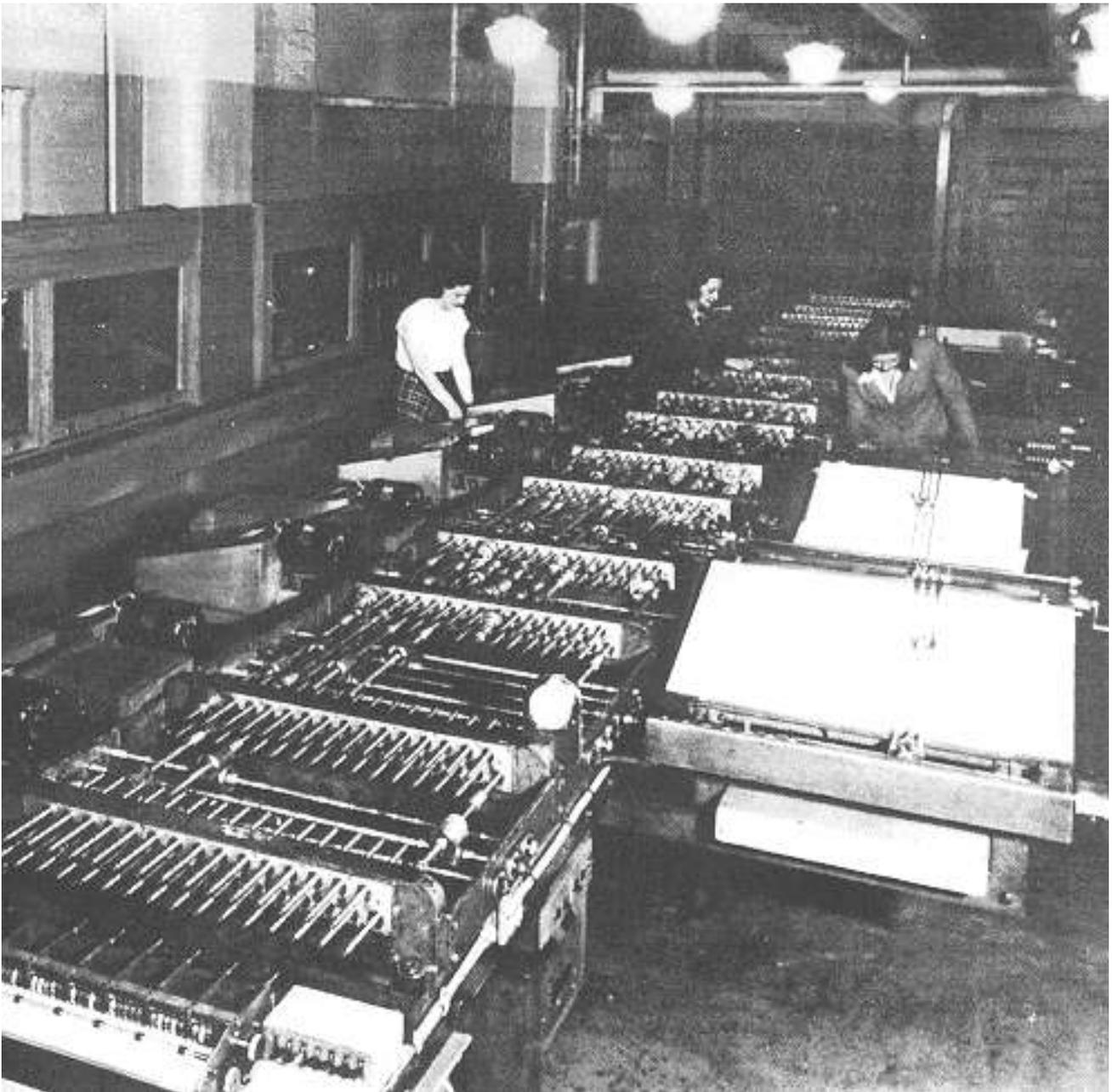
A tale scopo, Bush utilizzò e perfezionò un amplificatore sviluppato in precedenza da Nieman costituito da un meccanismo a torsione rifacendosi al principio dell'organo girevole usato sulle navi, adattandolo ad una rotazione di tipo continuo.

I tamburi a frizione vengono ruotati in senso opposto da un motore in continuo movimento di sufficiente potenza. Quando l'albero di input viene ruotato, una delle corde attaccate al braccio di input inizia a stringere sul tamburo a frizione a cui è avvolta.

Una stretta anche molto piccola e, quindi una tensione molto piccola all'estremità della corda attaccata al braccio di ingresso, è sufficiente a produrre una tensione abbastanza grande all'estremità del braccio di output in virtù dell'attrito del tamburo rotante. In definitiva, una piccola forza (di torsione) dell'albero di input è capace di produrre una forza ben più grande nell'albero di output.



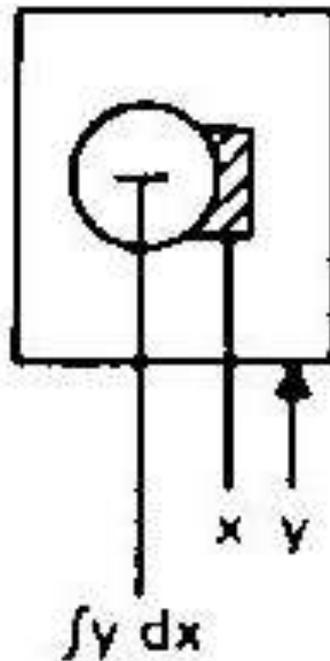
Operatore (Samuel Caldwell) alla console dell'analizzatore differenziale, costituita da un'interfaccia di tipo grafico. L'operatore manipolava a mano un puntatore per seguire le curve sulla carta, che venivano poi integrate (o elaborate in altro modo) dalla macchina fino a diventare un grafico in uscita. Vannevar Bush osserva la console.



Donne al lavoro con l'analizzatore differenziale.

Per l'ingresso e l'uscita dei dati erano presenti delle apposite tavole da disegno che rappresentavano graficamente i dati in ingresso e in uscita. Nella figura possiamo vedere un operatore che manipola manualmente un cursore per seguire la curva disegnata sul foglio di carta, che viene poi elaborata (solitamente con operazioni di integrazione) dalla macchina.

I risultati vengono tracciati direttamente su una tavola di output in forma grafica. Il grado di precisione di un singolo integratore si aggira su una parte su tremila, ma naturalmente ci si deve aspettare una precisione inferiore dovuta alla somma degli errori di tutte le componenti del sistema.

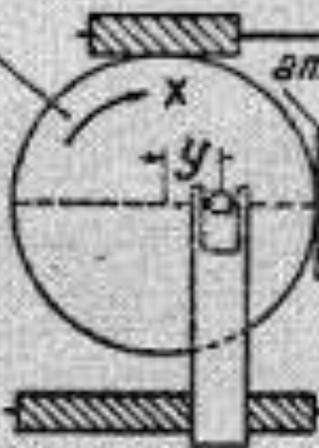


Per “programmare” la macchina si utilizzano degli schemi grafici che indicano le unità di calcolo da utilizzare e il tipo di collegamento da effettuare. In figura è possibile vedere il simbolo grafico usato per l'integratore. La figura mostra la notazione tecnica utilizzata per rappresentare un singolo integratore.

$$z = \frac{1}{R} \int_0^x y dx = \frac{1}{R} \int_0^x kx dx = \frac{k}{2R} x^2$$

disco dell'integratore

amplificatore di coppia



vite conduttrice dell'integratore

motore

tavola di uscita

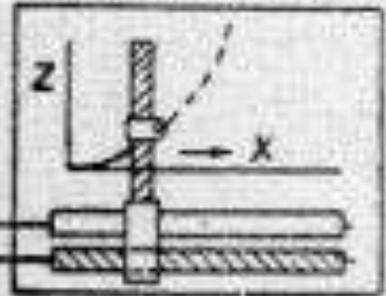
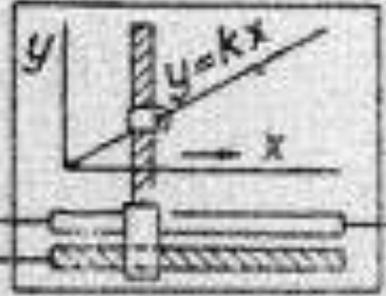
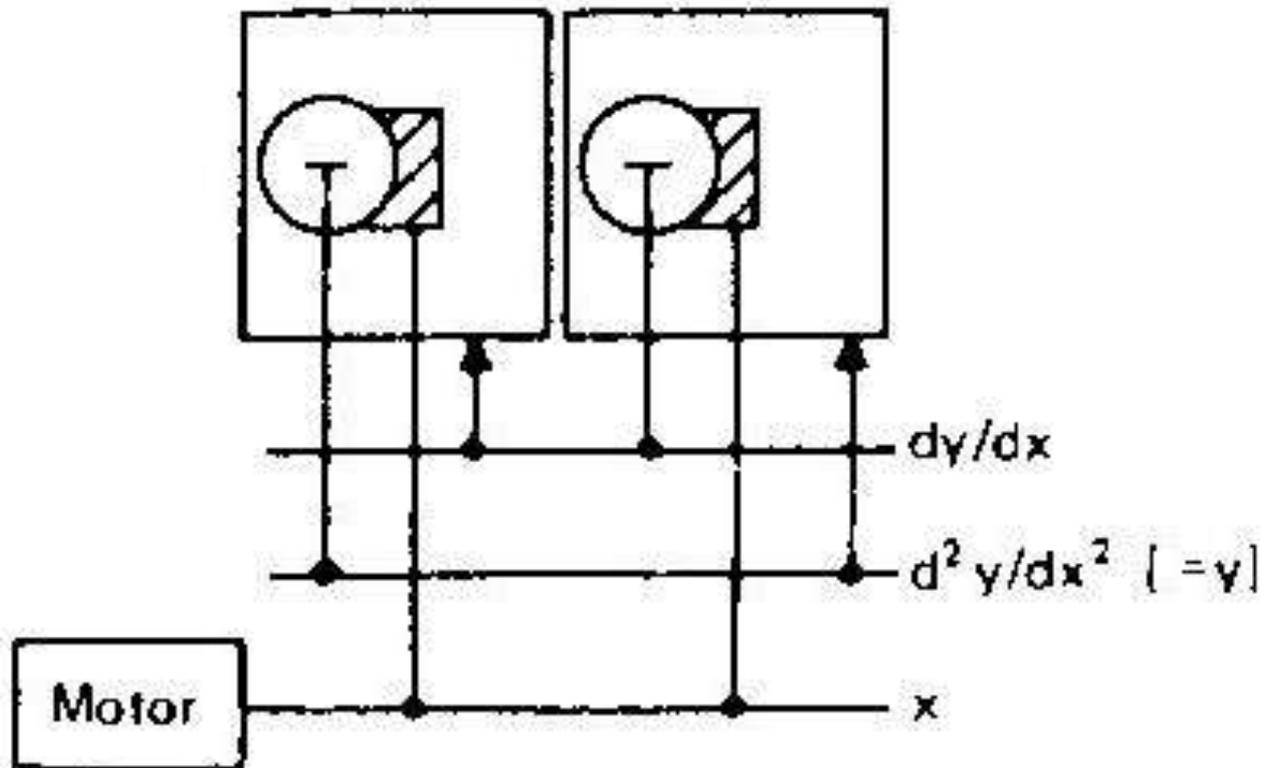


tavola di entrata

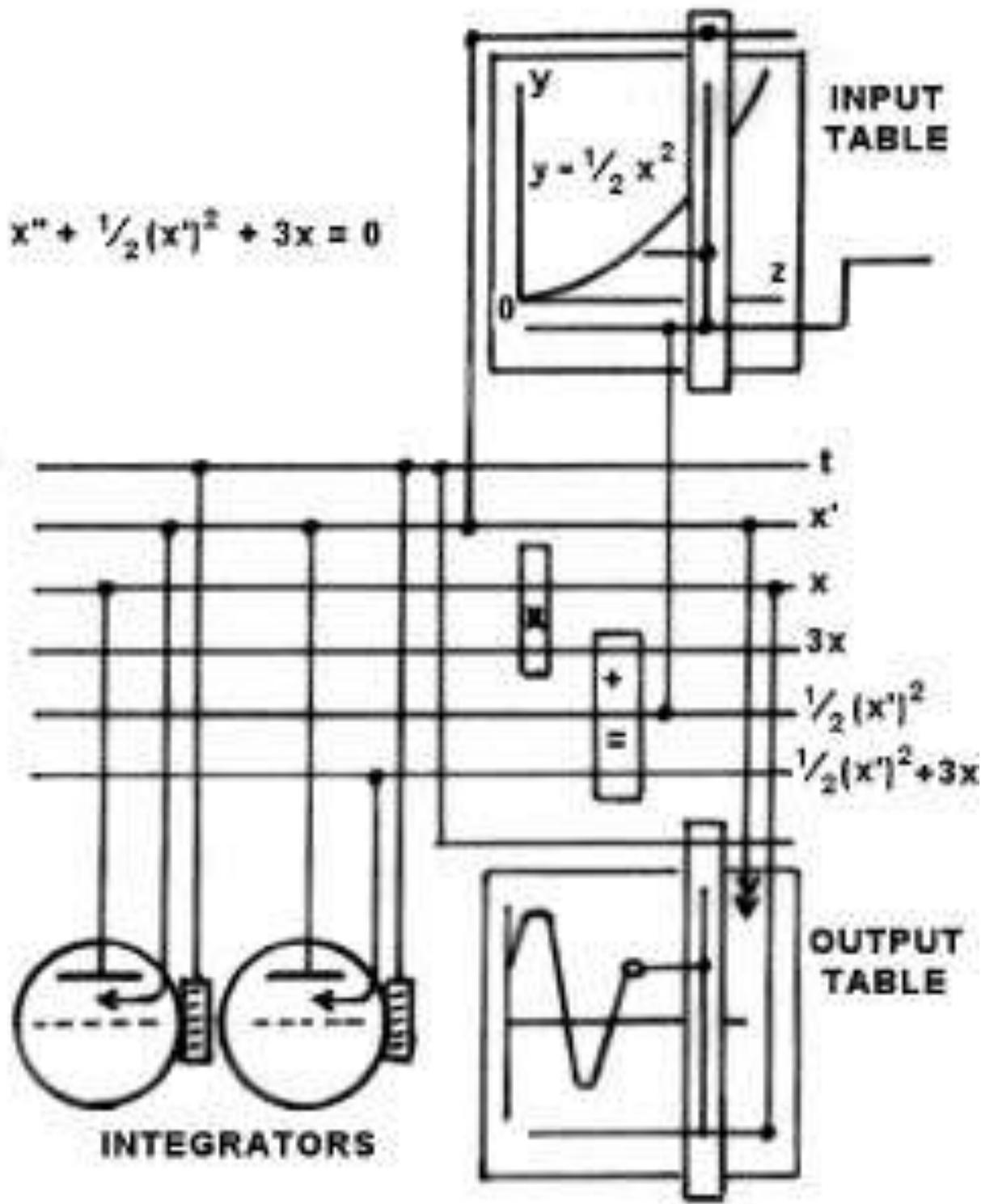




La figura mostra un “programma” in forma grafica per risolvere una semplice equazione differenziale: $d^2 y / dx^2 = y$.

In pratica, lo schema grafico indica come collegare insieme due integratori per risolvere l'equazione differenziale.

Preparare schemi simili alla figura per equazioni differenziali anche molto complesse non era difficile, ma predisporre la macchina in base a tali schemi era invece un lavoro piuttosto lungo e noioso per poter raggiungere una precisione accettabile.



Un altro esempio di “programma” per risolvere l’equazione differenziale: $x'' + \frac{1}{2}(x')^2 + 3x = 0$



Video

[[Video 1](#): frammento di film in cui viene usato analizzatore differenziale]

[[Video2](#): frammento di film in cui viene usato analizzatore differenziale] [da <http://www.science.uva.nl/faculteit/museum/flyingsaucers.mov>]

Ricostruzioni 3D analizzatore differenziale: [Video 1](#) e [Video2](#) (dvx) [da <http://web.mit.edu/klund/www/analyzer>]

[Video](#): Ricostruzione dell'analizzatore differenziale con il meccano

[Video](#): Ricostruzione dell'analizzatore differenziale con il meccano



LINK

<http://scoter2.union.edu/~hemmendd/Encyc/Articles/Difanal/difanal.html>

http://www.dalefield.com/nzfm/magazine/Differential_Analyser.html

http://www.meccano.us/differential_analyzers/index.html

<http://web.mit.edu/klund/www/analyzer/>

<http://www.meccano.us/>