

Rise & Fall of the Mechanical Calculator

Part 1 Adding Machines & the Difference Engine

Paul Breedveld, Dept. Bio-Mechanical Engineering

“There is something special about antique mechanical calculators: the weight, the many buttons, the spinning wheels and the mysterious innards packed with gears and cylinders that makes these things seem so cool.”

Remark seller Monroe-L adding machine, eBay USA, 12-11-2006

Contents

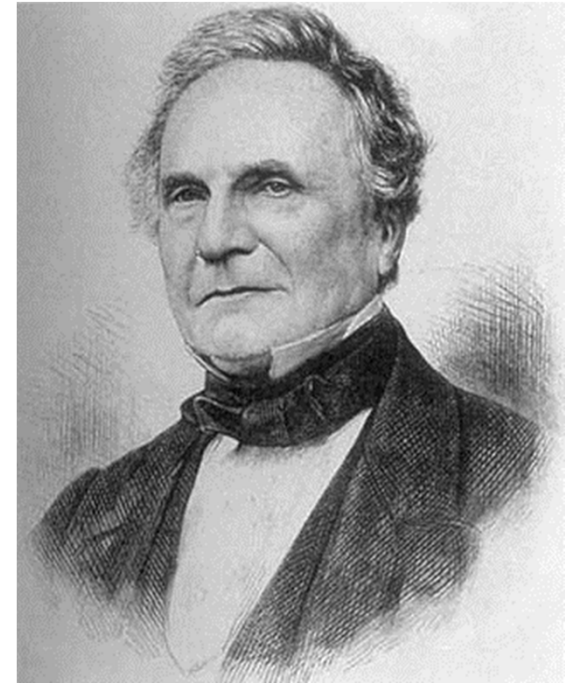
1. Pascaline
2. Comptometer
3. 10-key machines
4. Difference Engine
5. Summary

Pascaline



Pascal
(1623-1662)

Later in Part 2



Babbage
(1791-1871)

Pascaline



Pascal
(1623-1662)



Pascaline (1642):
first adding machine

P1

De Fransman Blaise Pascal (Clermont-Ferrand, 19 juni 1623 – Parijs, 19 augustus 1662) was een buitengewoon begaafde wis- en natuurkundige, christelijk filosoof, theoloog en apologet. Zijn belangrijkste prestaties:

- * hij legde de grondslag voor de waarschijnlijkheidsrekening (samen met Fermat).
- * hij bouwde één van de eerste mechanische rekenmachines (optelling en aftrekking) (1642), de pascaline.
- * hij droeg bij aan de projectieve meetkunde (kegelsneden, stelling van Pascal), , hydrostatica, hydrodynamica en combinatoriek (driehoek van Pascal).
- * hij ontdekte de Wet van Pascal: De druk die op een vloeistof wordt uitgeoefend, plant zich in alle richtingen met dezelfde grootte voort.

Als christelijk denker wordt hij vooral gezien als de apologet van de openbaring. Hij stelt met klem dat de rede haar eigen grenzen moet kennen en dat zij moet buigen voor de door God gegeven werkelijkheid. Bekend is zijn uitspraak, dat men volgens de kansrekening wel in God moet geloven: als deze namelijk bestaat, is de winst voor de gelovige oneindig. Bestaat God niet, dan verliest men niets (Le pari, de gok). Deze redenering staat bekend als Pascal's Wager.

Levensloop

Pascal was de zoon van Etienne Pascal, rechter in Clermont-Ferrand. Na de dood van diens vrouw, Antoinette Bégon, die overleed toen Pascal vier was, verkocht zijn vader zijn werk door aan zijn broer, zodat hij zich geheel aan de opvoeding van zijn kinderen kon wijden. Ze verhuisden in 1631 naar Parijs. Blaise had twee zussen, Gilberte en Jacqueline. De laatste trad na de dood van haar vader in in het jansenistische klooster Port Royal in Parijs. Zij was naast zijn vader de belangrijkste persoon in het leven van Blaise.

Vader Pascal onderwees zijn kinderen zelf. Al vroeg ontdekte hij daardoor de uitzonderlijke talenten van zijn zoon. Blaise had al ongeveer vanaf zijn zevende jaar een onstuitbare leergierigheid op het gebied van de wiskunde en de mechanica. Jacqueline bleek literaire talenten te bezitten; vanaf haar dertiende werd haar al geregeld door het koninklijk hof gevraagd haar gedichten voor te dragen.

Nadat zijn vader een paar slechte beleggingen had gedaan, ging deze weer aan het werk als belastinginspecteur in Rouen. Etienne Pascal moest veel berekeningen maken, hier hielp Blaise hem bij. Door dit werk werd hij geïnspireerd tot de uitvinding van de eerste mechanische rekenmachine.

Etienne Pascal werd na veel moeite toegelaten tot de prestigieuze Académie Française, naast de Sorbonne het Mekka voor Franse wetenschappers in die tijd. Zo kon hij ook zijn zoon na verloop van tijd bij de geleerde heren introduceren. Al spoedig stond hij bekend als een jong genie.

Hij correspondeerde behalve met Fermat ook met Christiaan Huygens, Gottfried Leibniz en andere grote wiskundigen van de Gouden Eeuw. Hoewel Fermat en Pascal elkaar nooit persoonlijk hebben ontmoet, is hun samenwerking altijd positief geweest en stimuleerden ze elkaar om oplossingen voor steeds nieuwe vraagstukken te vinden.

Mechanische rekenmachine

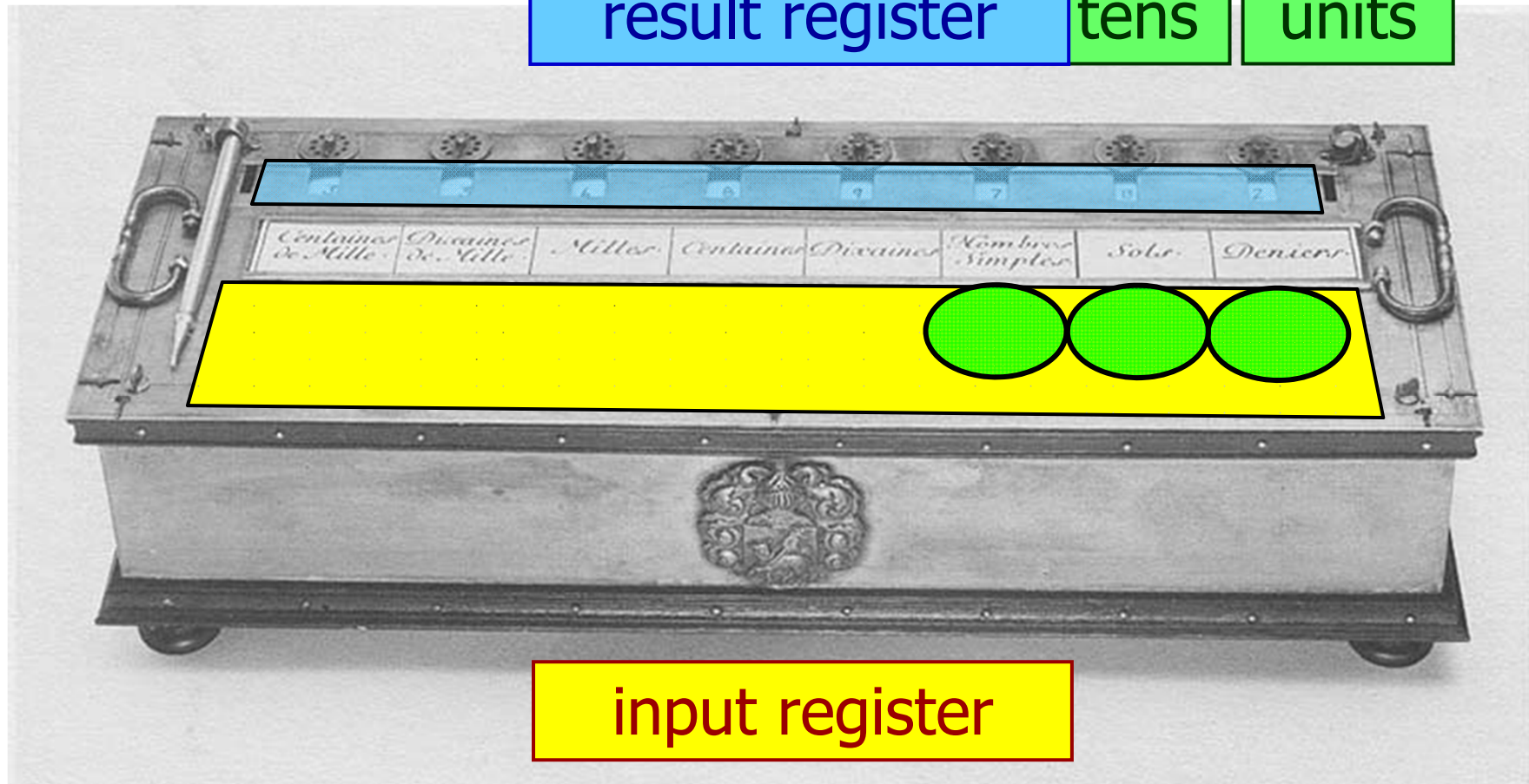
Uit Pascals uitvinding van de eerste mechanische rekenmachine, "pascaline" genaamd, bleek zijn vermogen om nieuwe oplossingen te bedenken voor oude problemen. Hij begon erover na te denken vanwege het vele rekenwerk dat zijn vader beroepsmatig moest doen en

Pascaline

result register

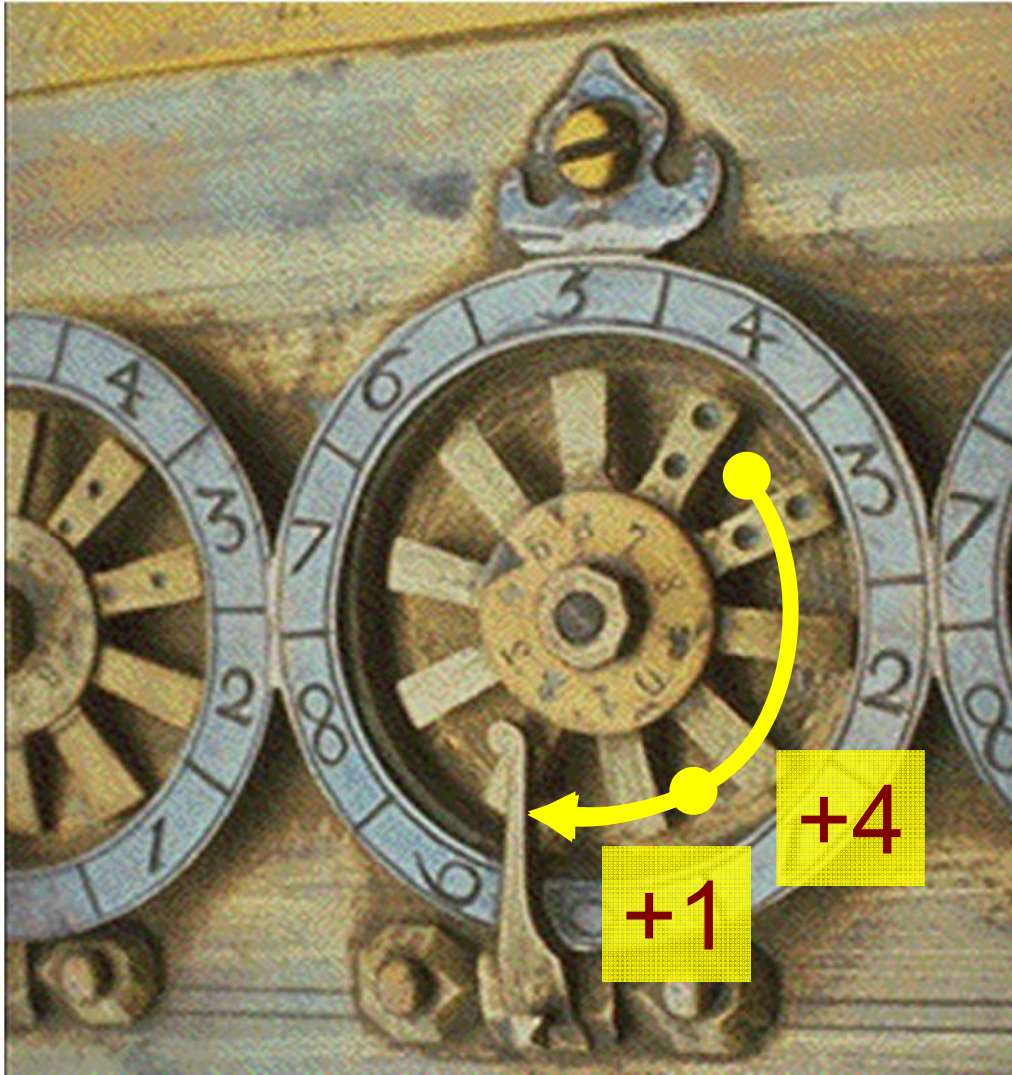
tens

units



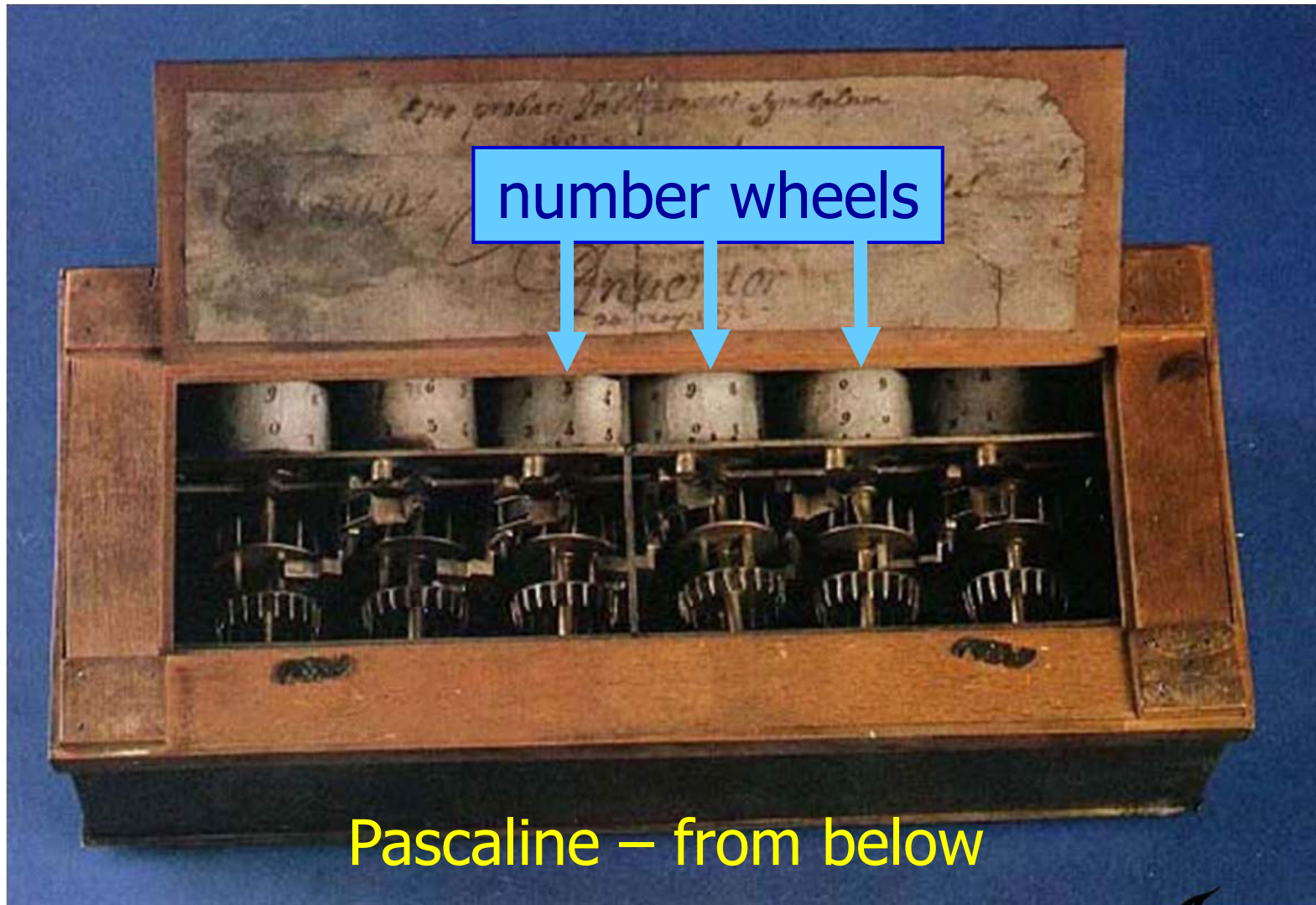
Pascaline – working principle

Pascaline

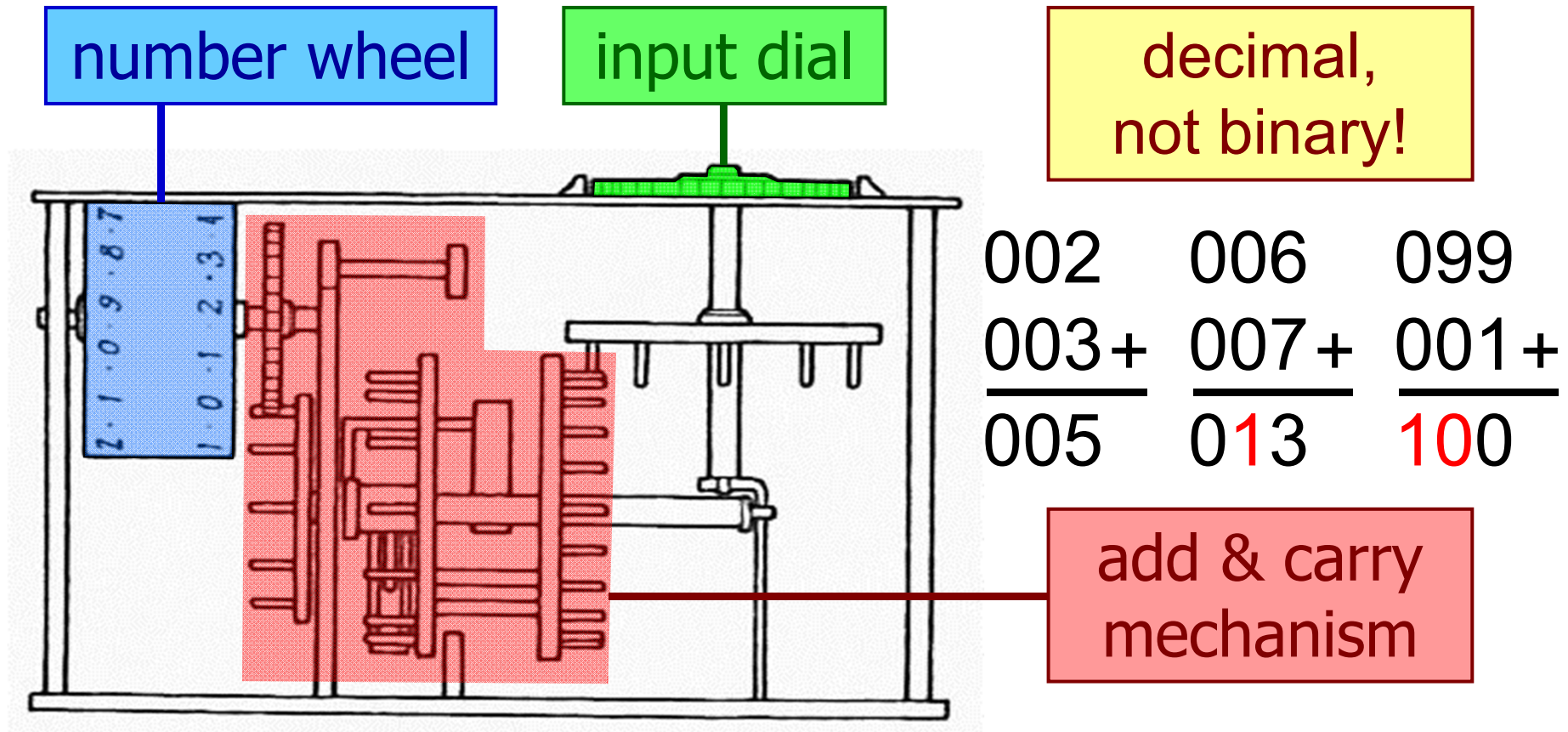


Pascaline –
telephone-like
input dials

Pascaline

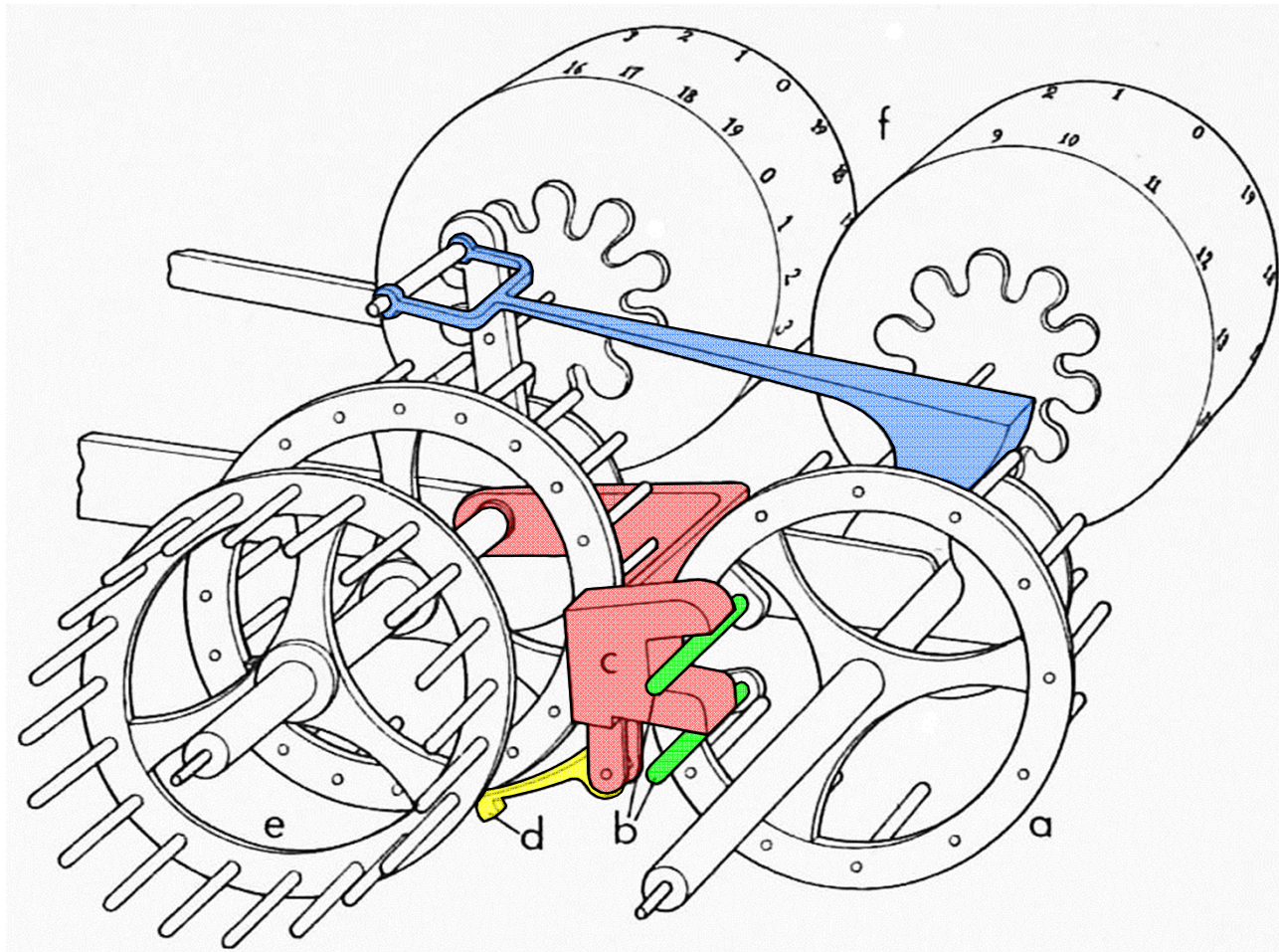


Pascaline



Pascaline – cross section

Pascaline

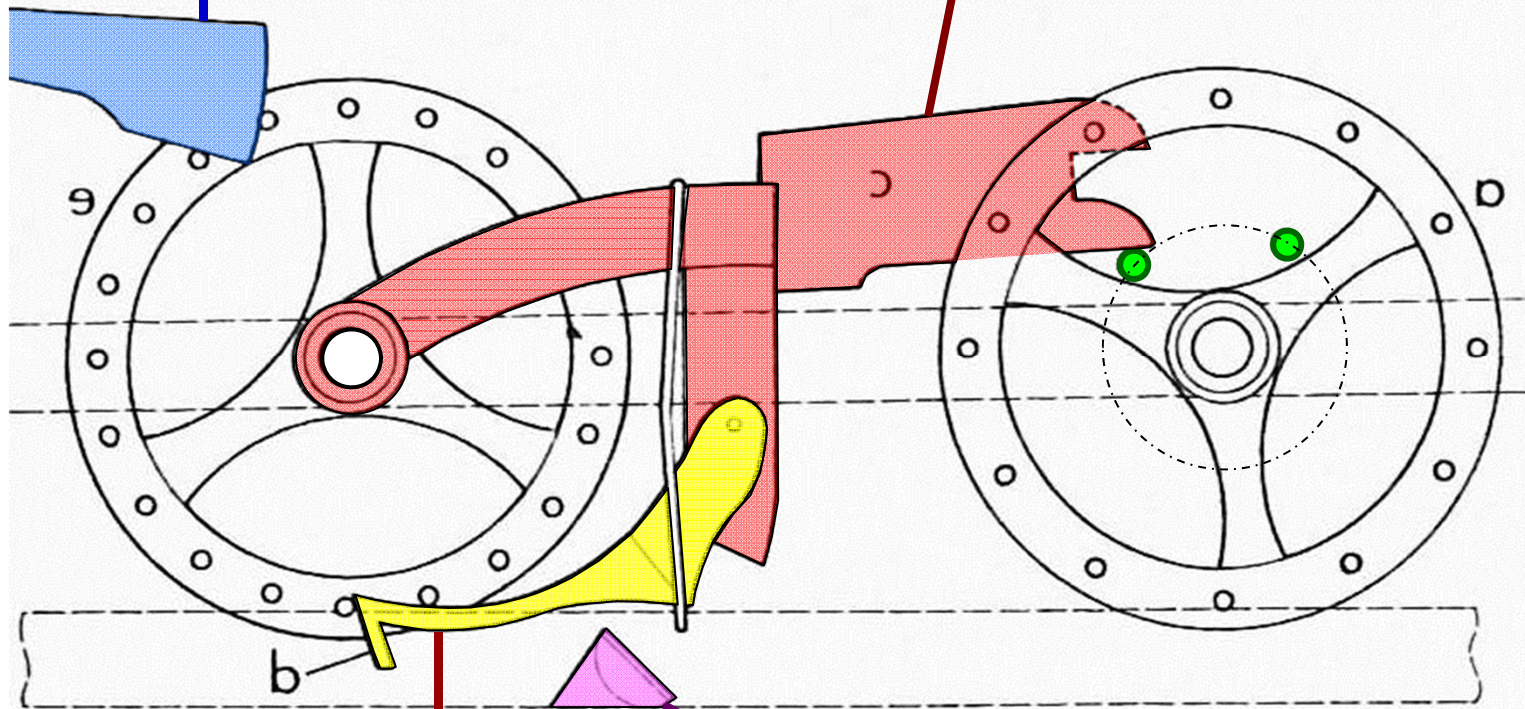


Pascaline – add & carry mechanism

Pascaline

backward stopper

carry lever

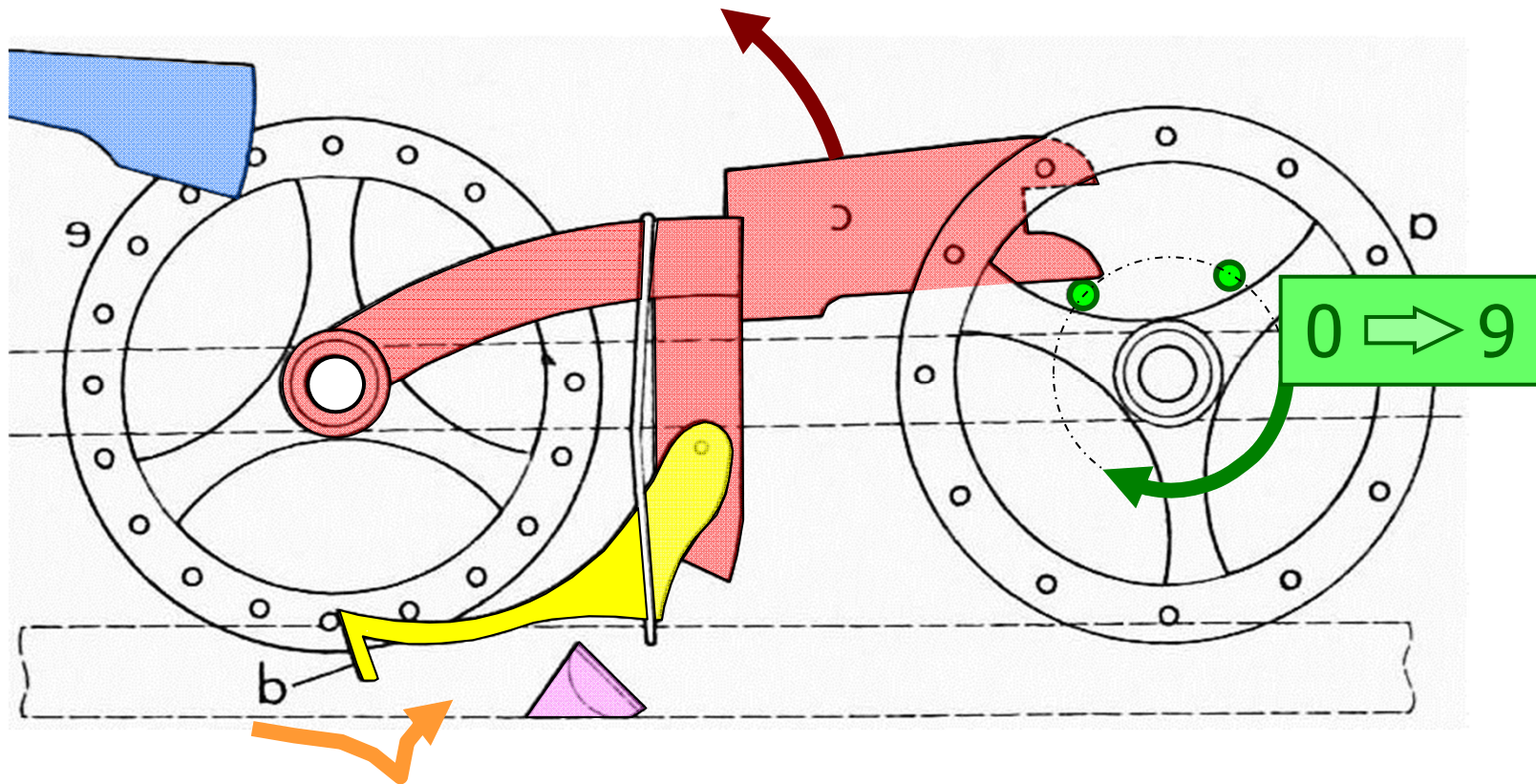


forward pusher

carry stopper

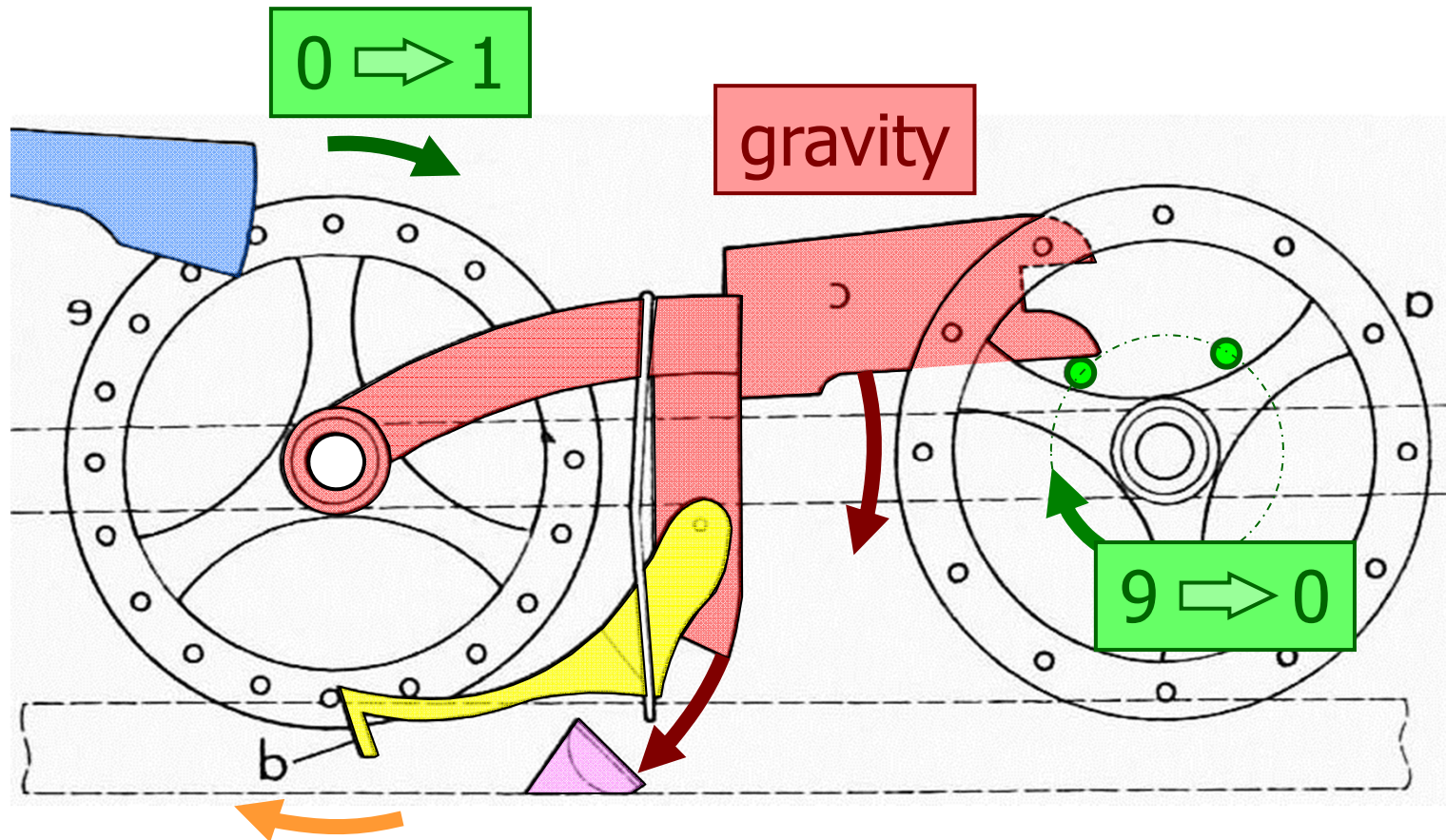
Pascaline – carry mechanism

Pascaline



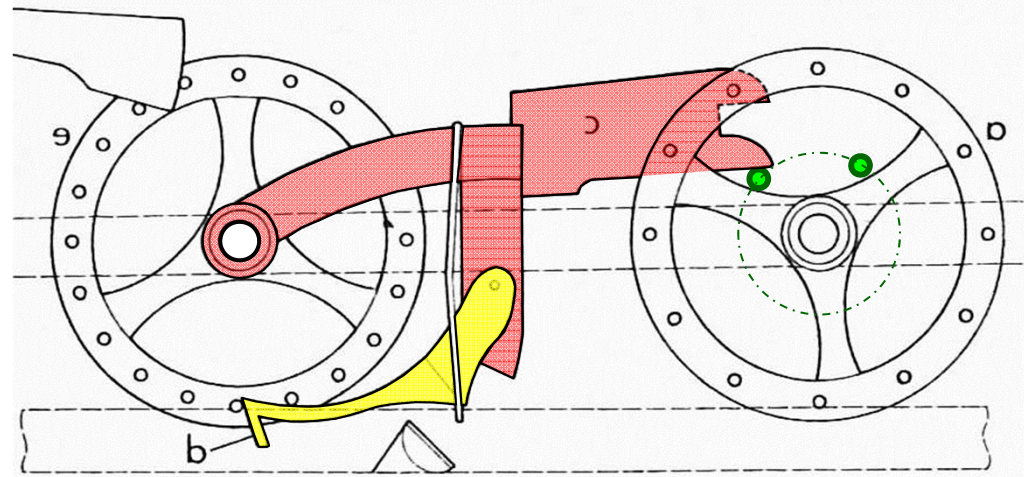
Pascaline – carry mechanism

Pascaline



Pascaline – carry mechanism

Pascaline



Drawback Pascaline:

Fast dial rotation

⇒ upward overshoot carry lever

⇒ 2 carry's instead of 1

⇒ ERROR

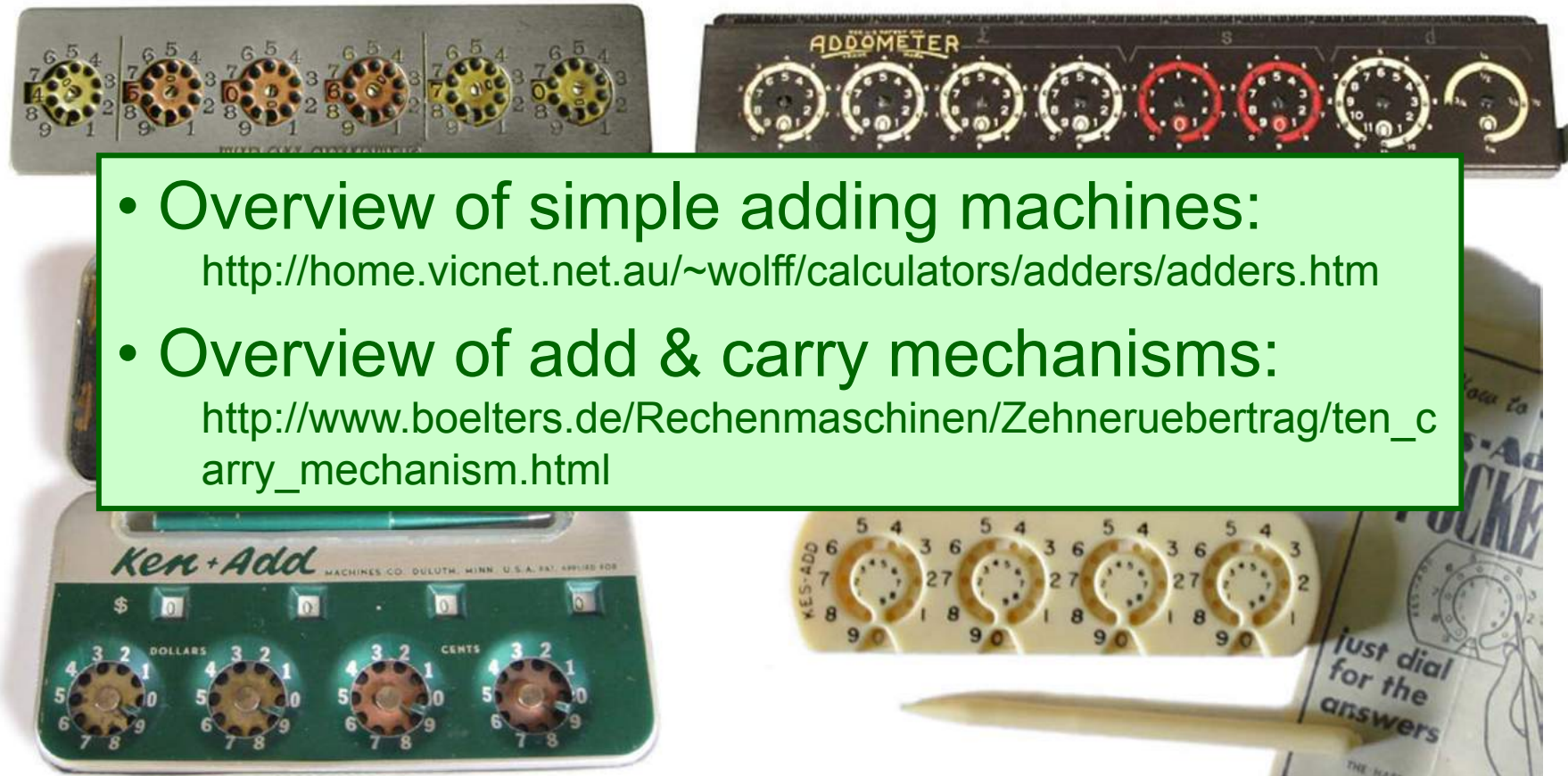
Accuracy depends on operator speed

Pascaline



1850-1972: Many simplified Pascaline variants

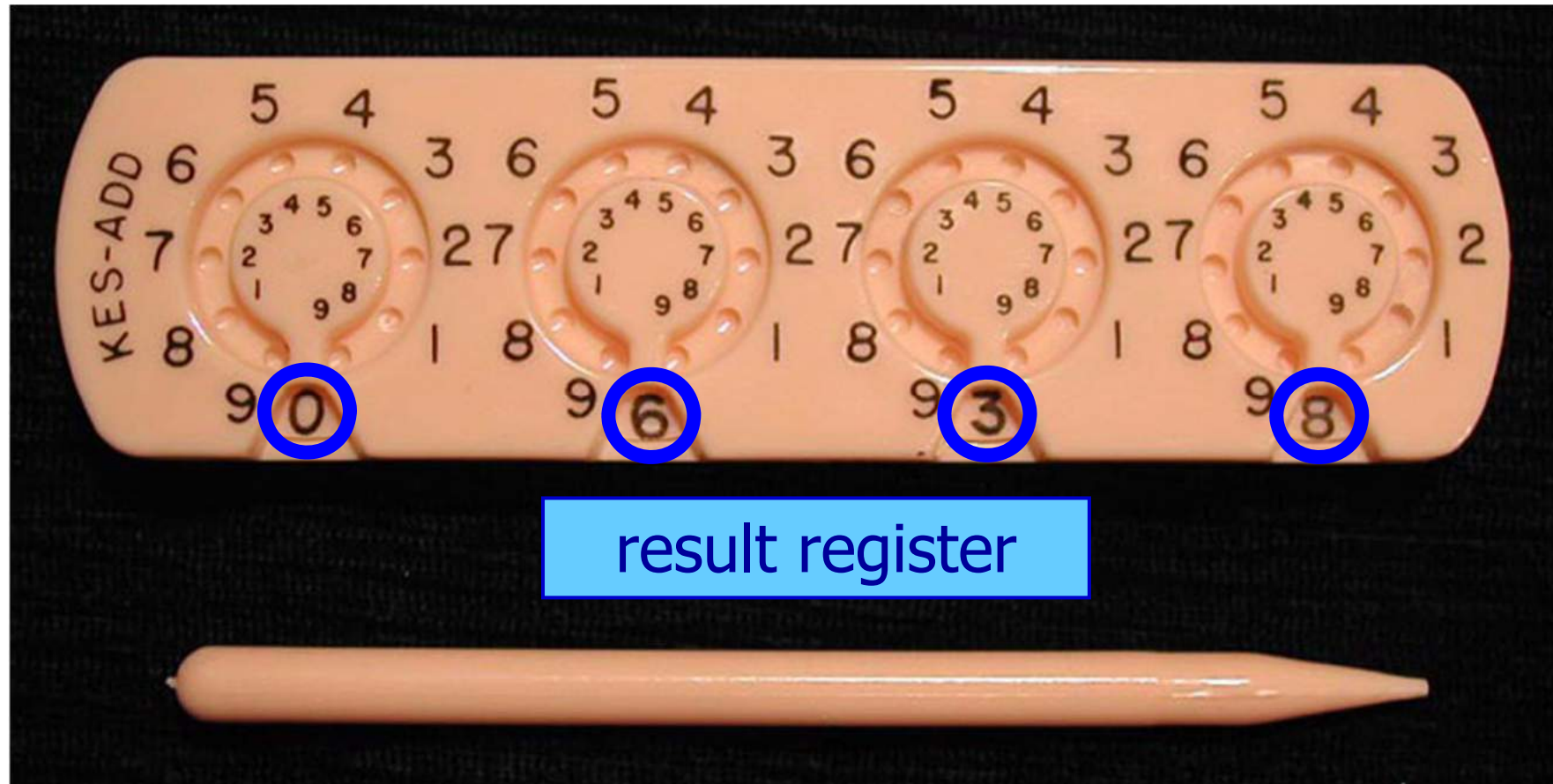
Pascaline



- Overview of simple adding machines:
<http://home.vicnet.net.au/~wolff/calculators/adders/adders.htm>
- Overview of add & carry mechanisms:
http://www.boelters.de/Rechenmaschinen/Zehneruebertrag/ten_carry_mechanism.html

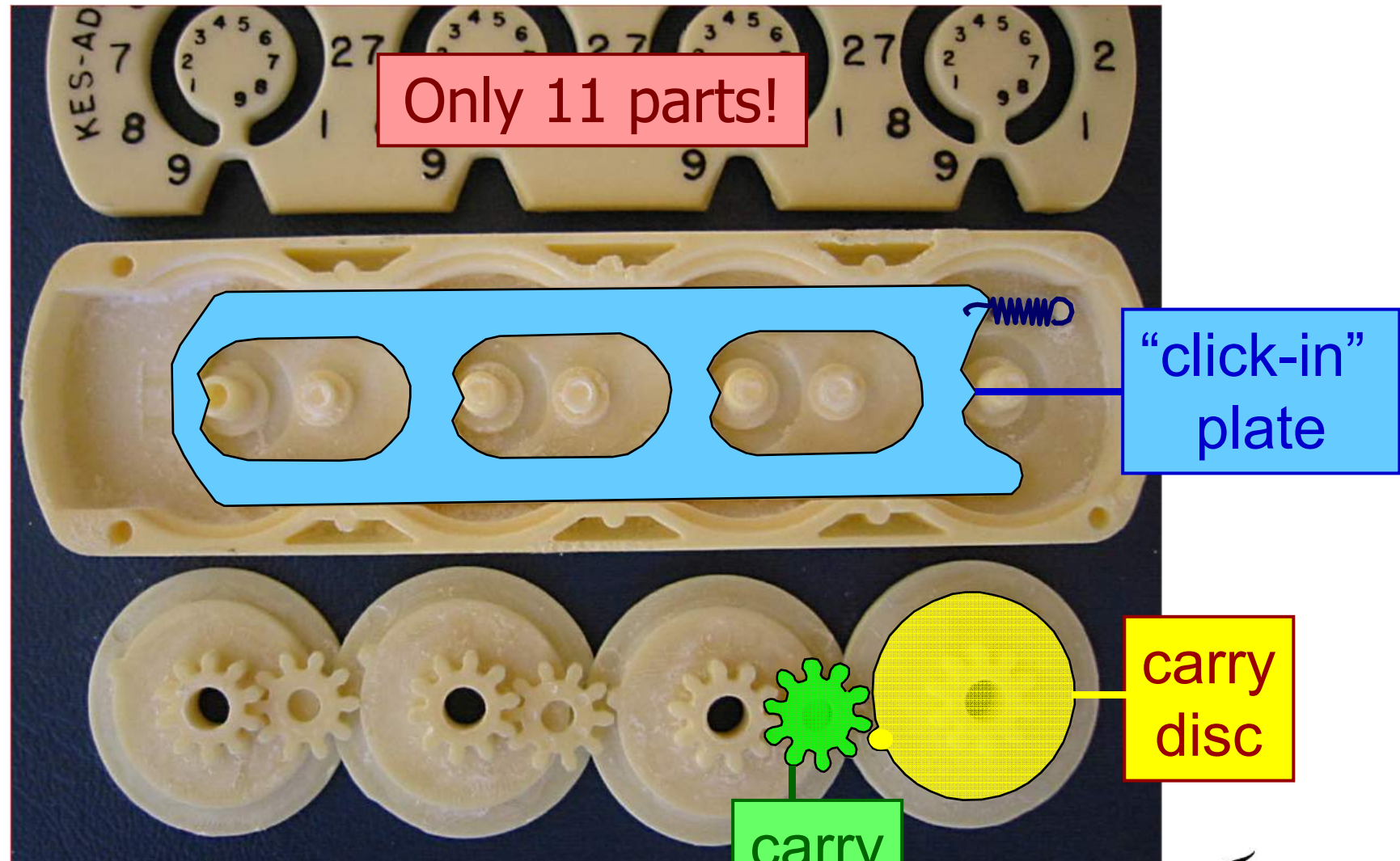
1850-1970: Many simplified Pascaline variants

Pascaline



Kes-Add: the simplest existing Pascaline variant

Pascaline



Pascaline



Advantages:

- no external power supply
- "endless" life span

Mechanical counters of today (gasmeter, water meter)

Pascaline

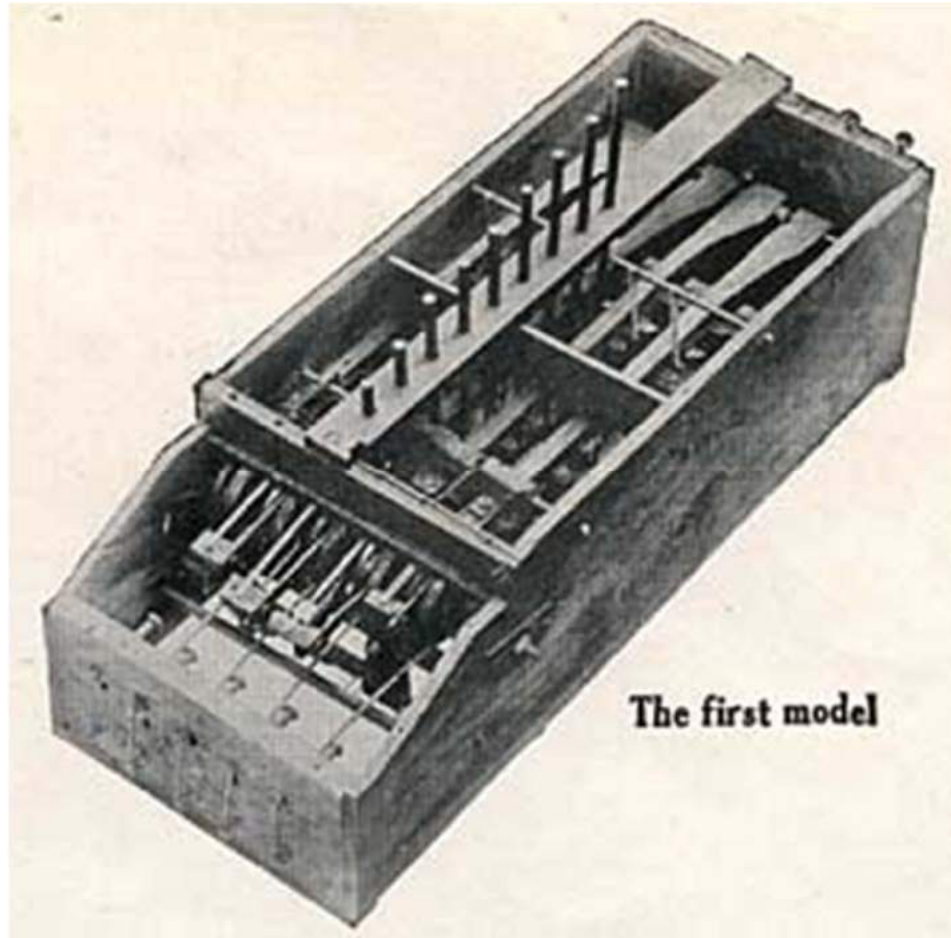
Drawback Pascaline & variants:

- Dial-input is slow and awkward

Solution:

- Replace each dial by row of keys

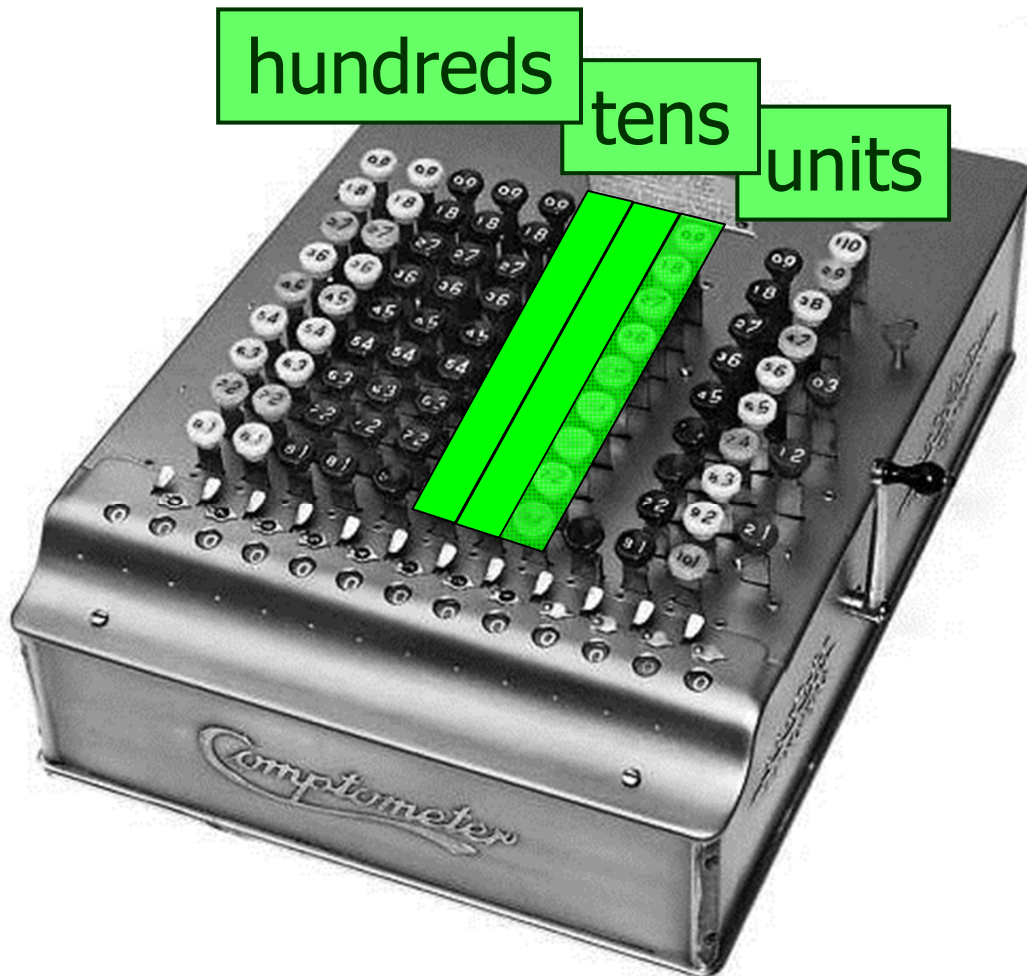
Comptometer



Dorr E. Felt
Felt & Tarrant Chicago

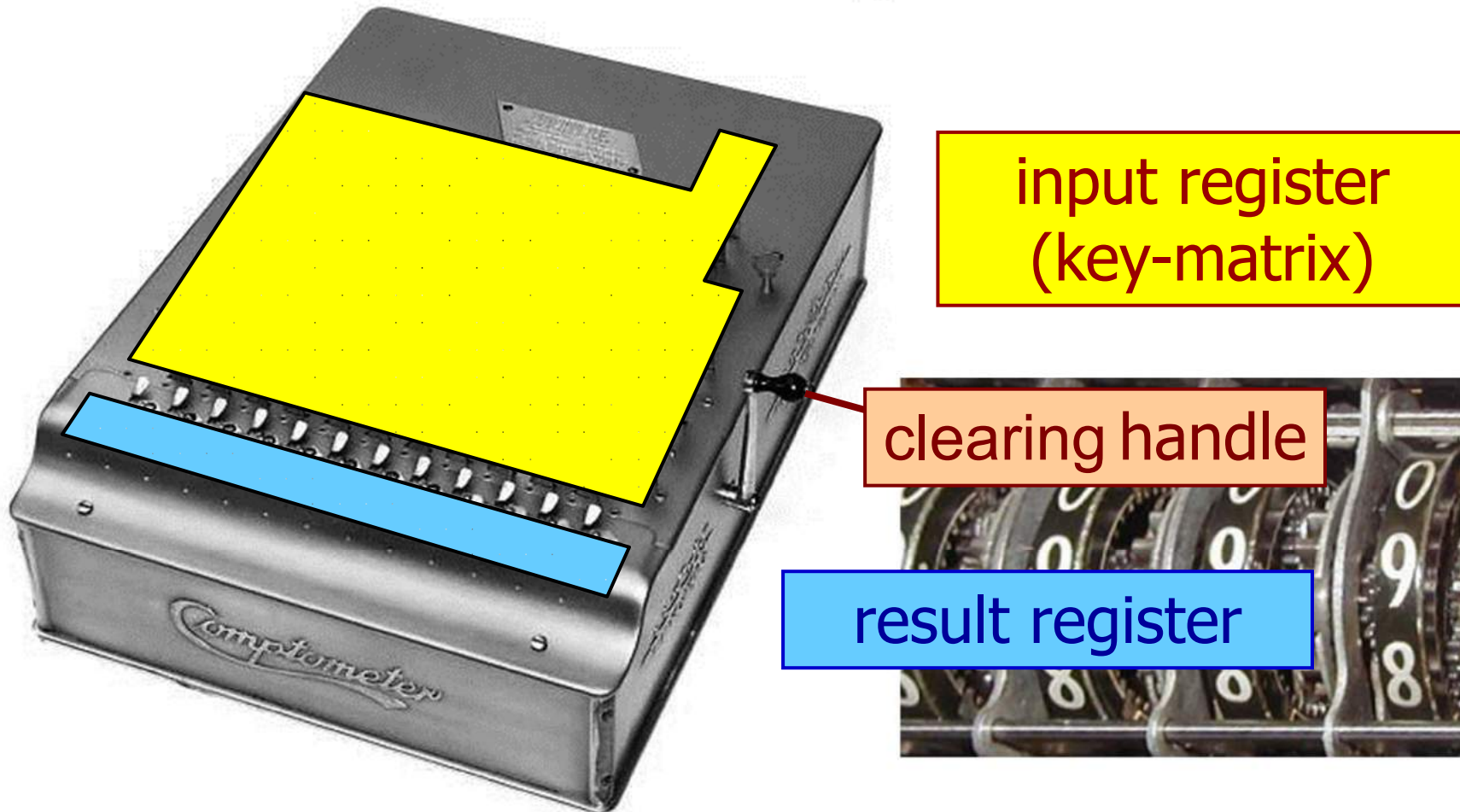
Comptometer – “spaghetti-box” prototype (1885)

Comptometer



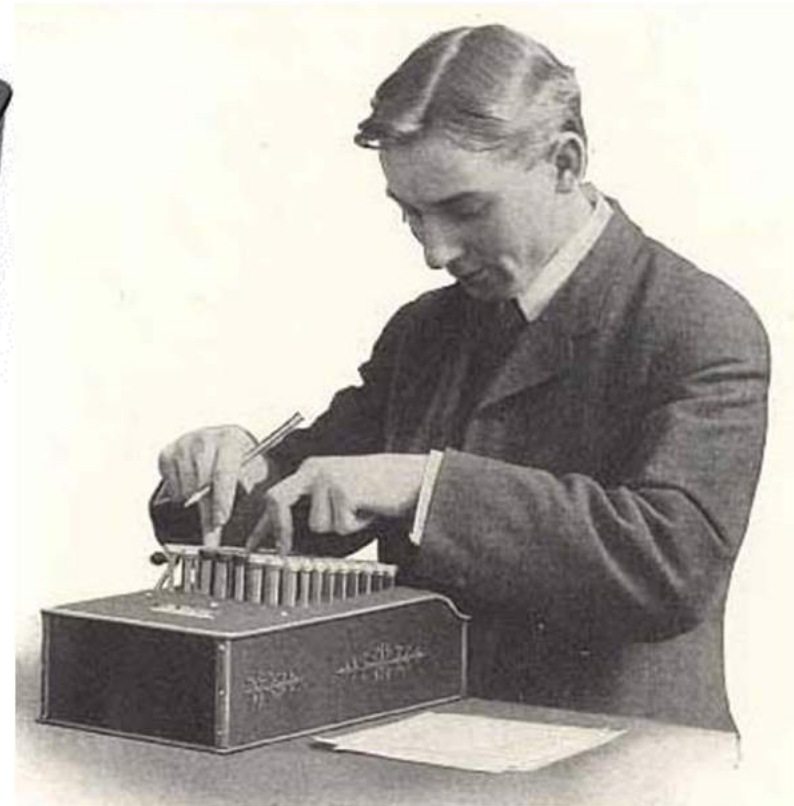
Comptometer – working principle

Comptometer



Comptometer – working principle

Comptometer



Comptometer – working principle

Pascaline

Comptometer

10-key

Difference

Summary

Comptometer



Comptometer – working principle

Comptometer



Comptometer first model (1887-1903)

Pascaline

Comptometer

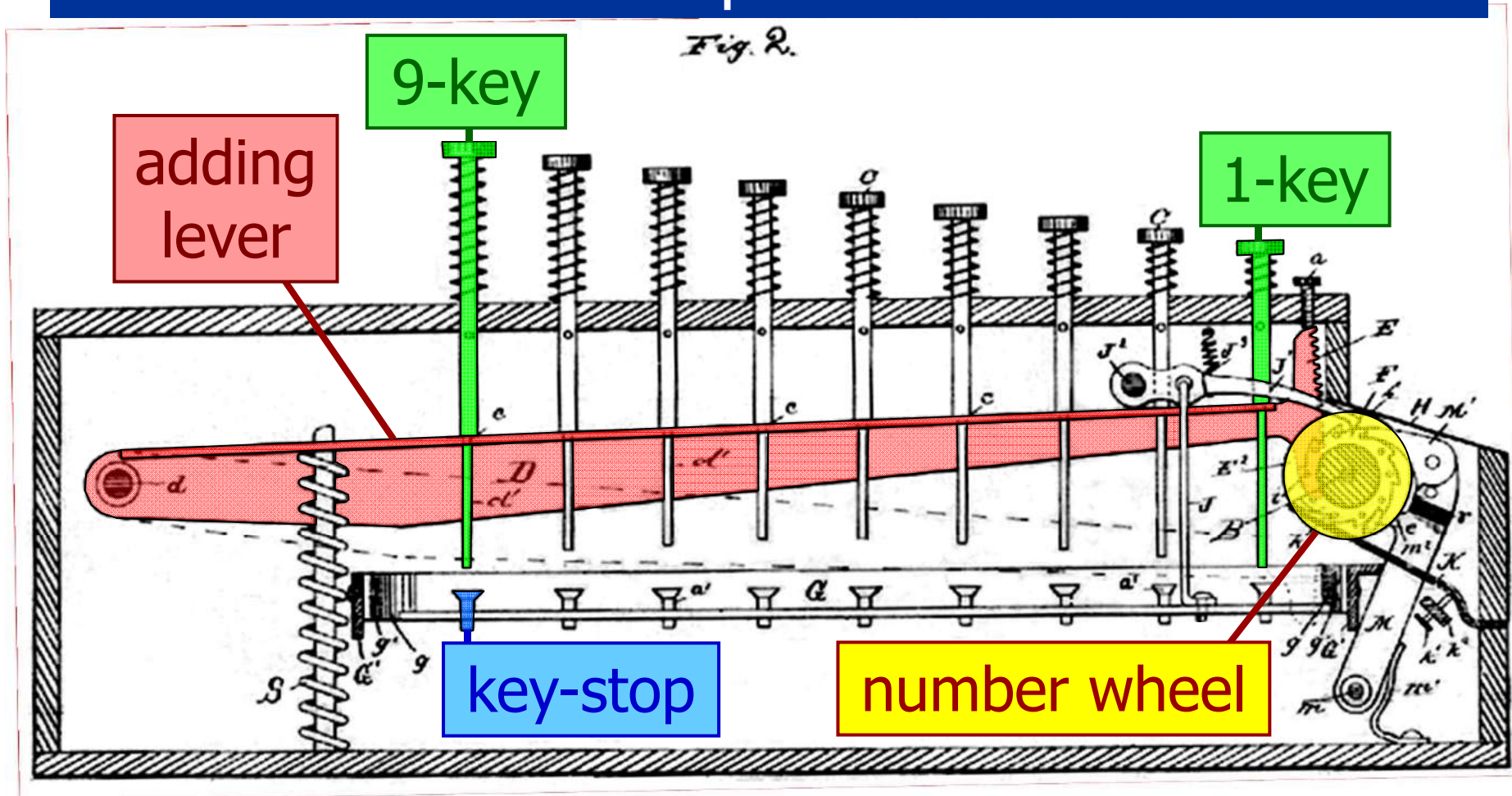
10-key

Difference

Summary

 **TU**Delft

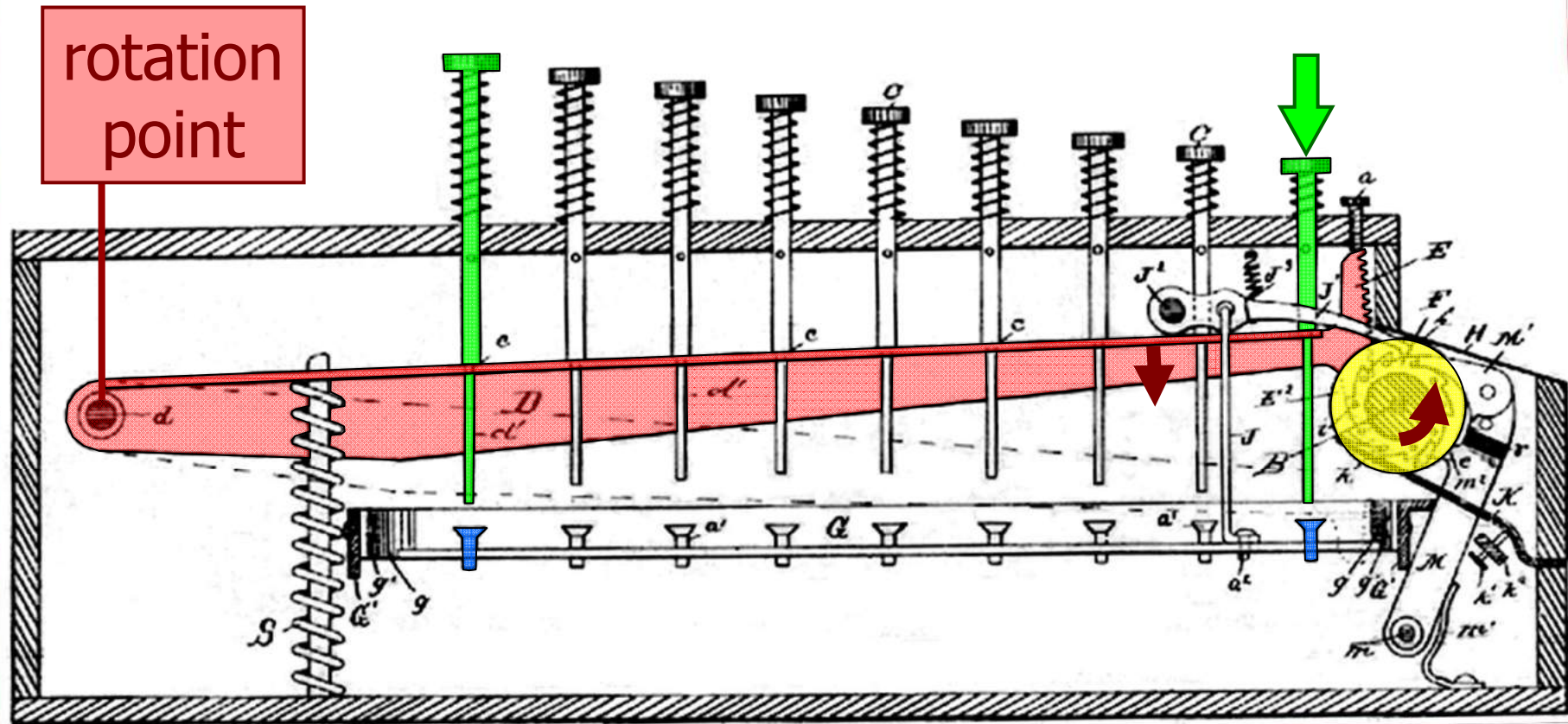
Comptometer



Comptometer first model – working principle

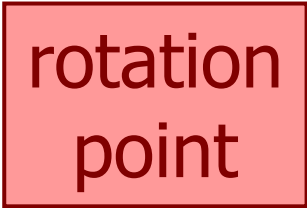
Comptometer

Fig. 2.



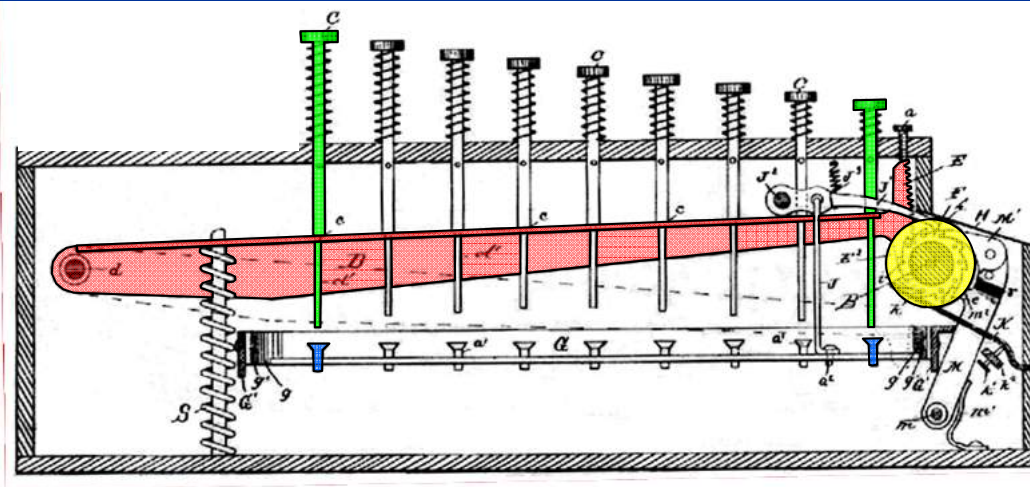
Comptometer first model – working principle

Comptometer



Comptometer first model – working principle

Comptometer



Drawback first Comptometer:

Hitting key hard

⇒ downward overshoot adding lever

➡ more added than desired

➡ ERROR

Accuracy depends on operator speed

Comptometer

Solutions:

- Stopping *adding* lever instead of key
- Adding on *upward* instead of downward stroke (controlled by spring, not by fingers operator)

Drawback first Comptometer:

Hitting key hard

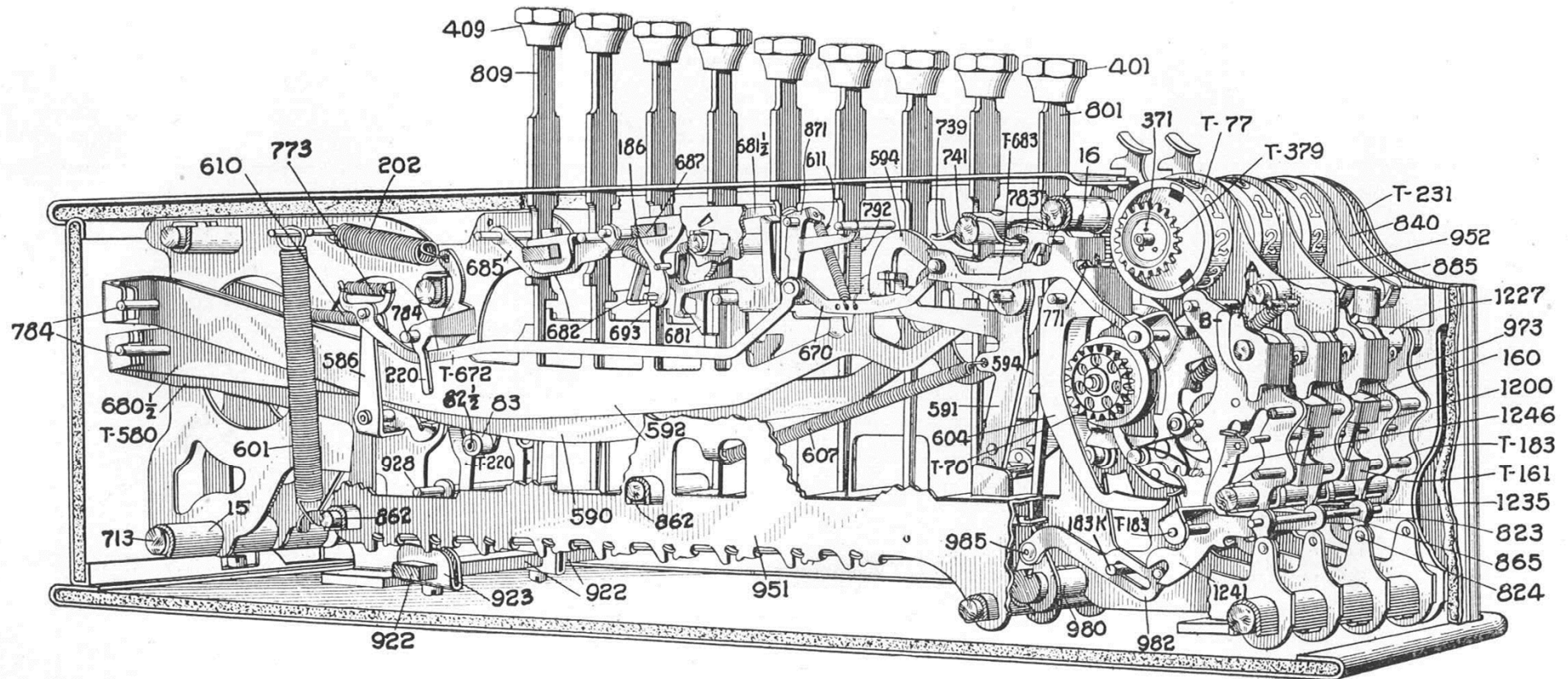
⇒ downward overshoot adding lever

⇒ more added than desired

⇒ ERROR

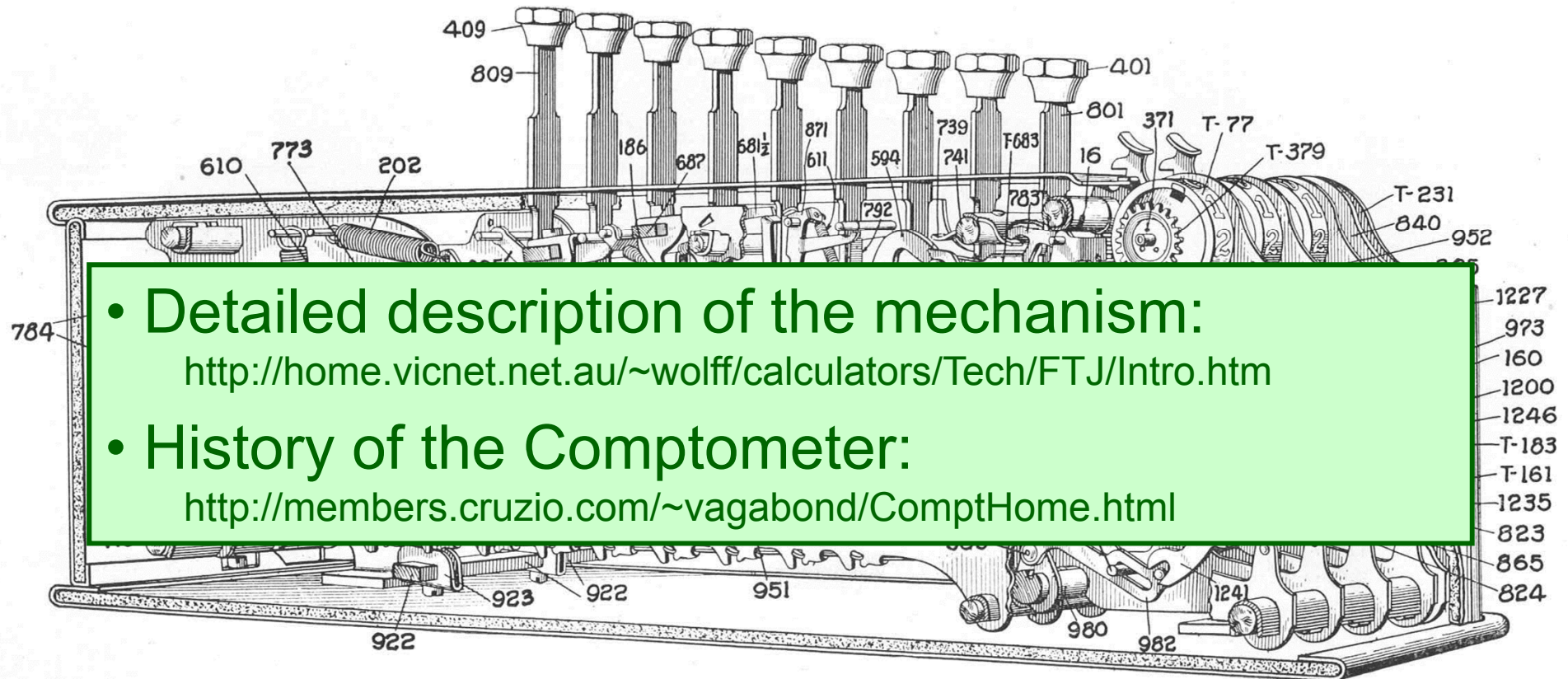
Accuracy depends on operator speed

Comptometer



Ingenious mechanism (~1500 parts)
Main calculating workhorse in world from 1903-1972

Comptometer



- Detailed description of the mechanism:
<http://home.vicnet.net.au/~wolff/calculators/Tech/FTJ/Intro.htm>
- History of the Comptometer:
<http://members.cruzio.com/~vagabond/ComptHome.html>

Ingenious mechanism (~1500 parts)
Main calculating workhorse in world from 1903-1972

Comptometer



Comptometer
Training Class
(1926)

Pascaline

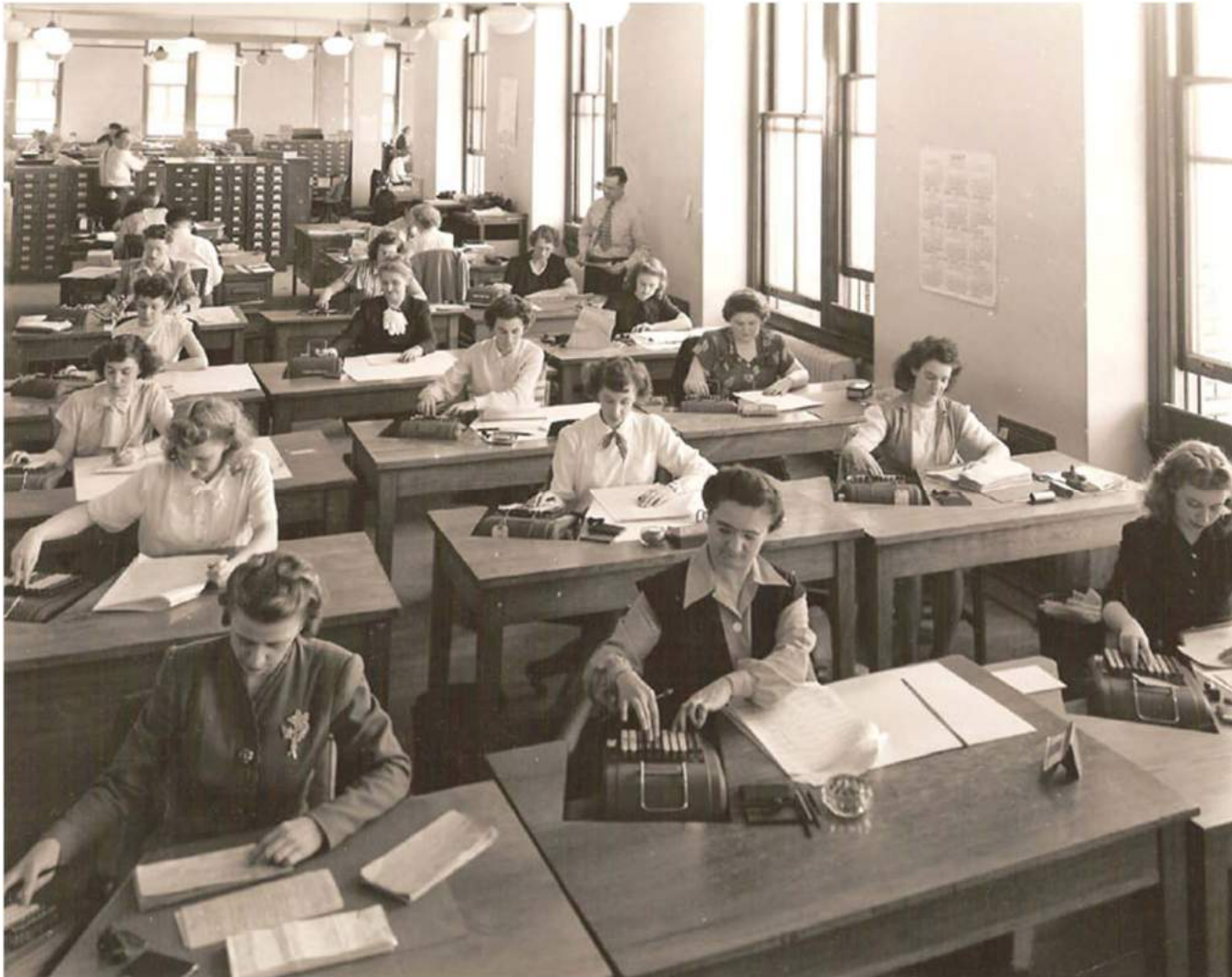
Comptometer

10-key

Difference

Summary

Comptometer



Calculating
Office
(1947)

Pascaline

Comptometer

10-key

Difference

Summary

Comptometer



Not good
for RSI!

Comptometer

1. $C = A - B$

$4199 = 9826 - 5627$

2. Take from every digit of B the 9-complement

$B^* = 4372$

3. Add 1 to last digit of B^*

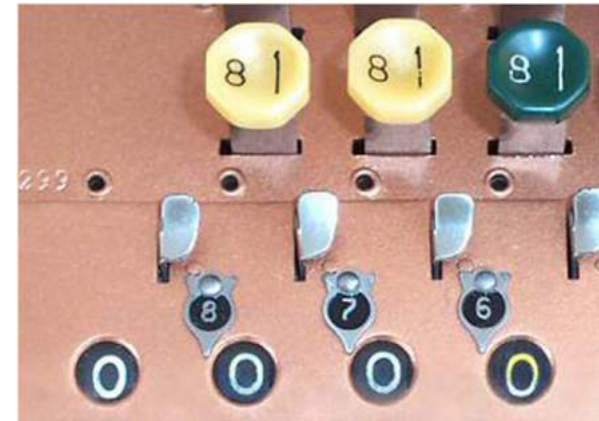
$B^{**} = 4373$

4. Add B^{**} to A

$A + B^{**} = 14199$

5. Subtract 1 from first digit of answer

$C = 4199$



Subtracting by adding: the 9-complement method

Comptometer

1. $C = A - B$

$$4199 = 9826 - 5627$$

2. Take from every digit of B the 9-complement

$$B^* = 4372$$

3. Add 1 to last digit of B^*

$$B^{**} = 4373$$

4. Add B^{**} to A

$$A + B^{**} = 14199$$

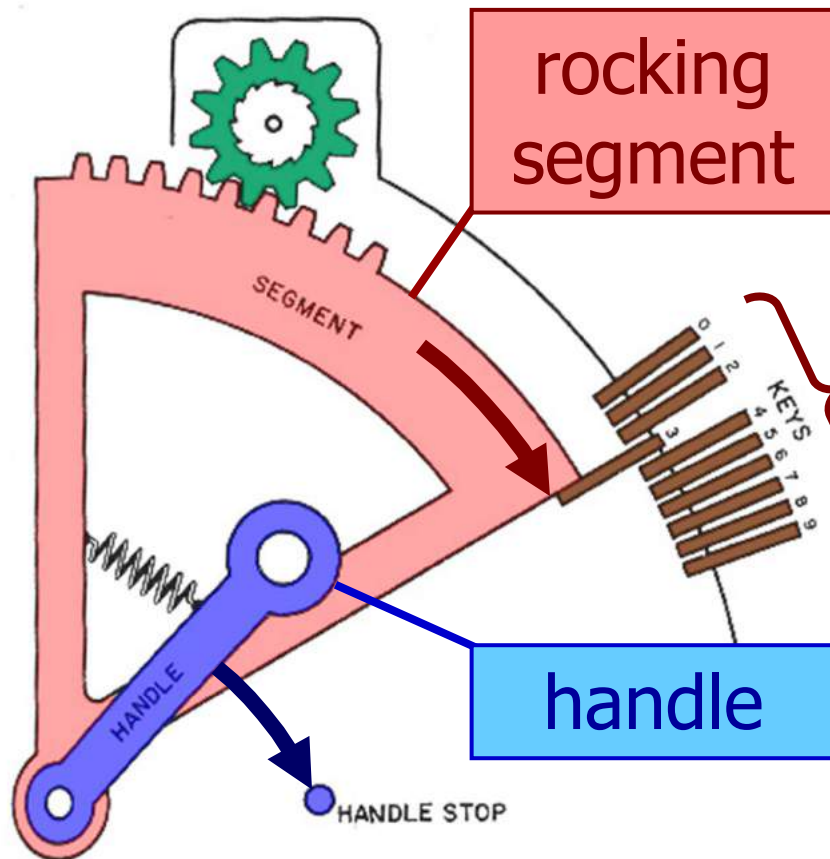
5. Subtract 1 from first digit of answer

$$C = 4199$$

Advantage:
no extra subtraction
mechanism needed

Subtracting by adding: the 9-complement method

Comptometer



Burroughs key-matrix adding machine (1884-1920)

Comptometer

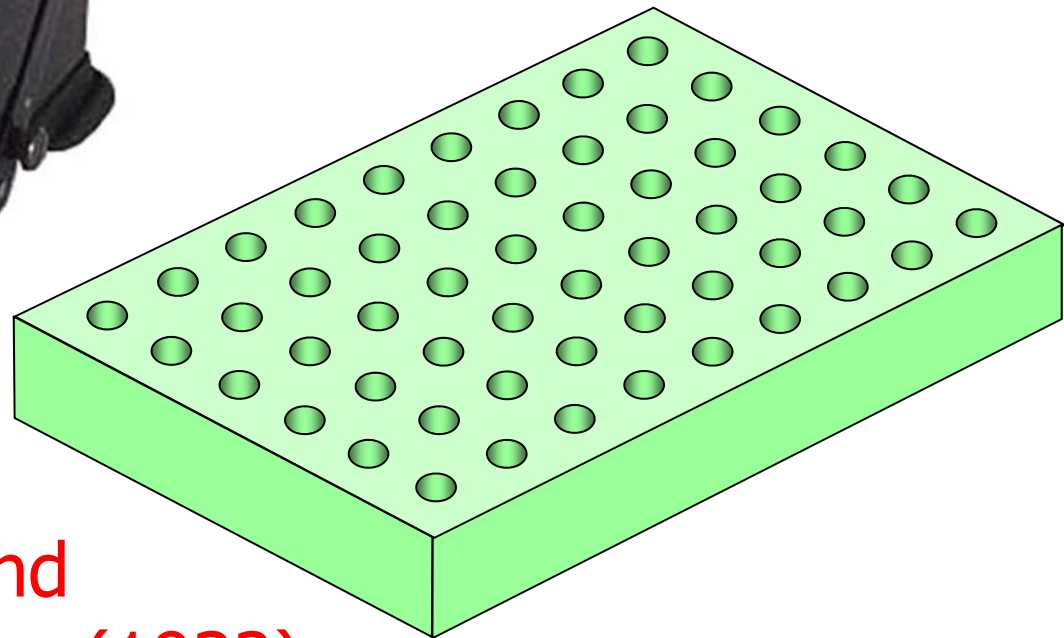
Drawback key-matrix machines:

- Complexity, size

Solution:

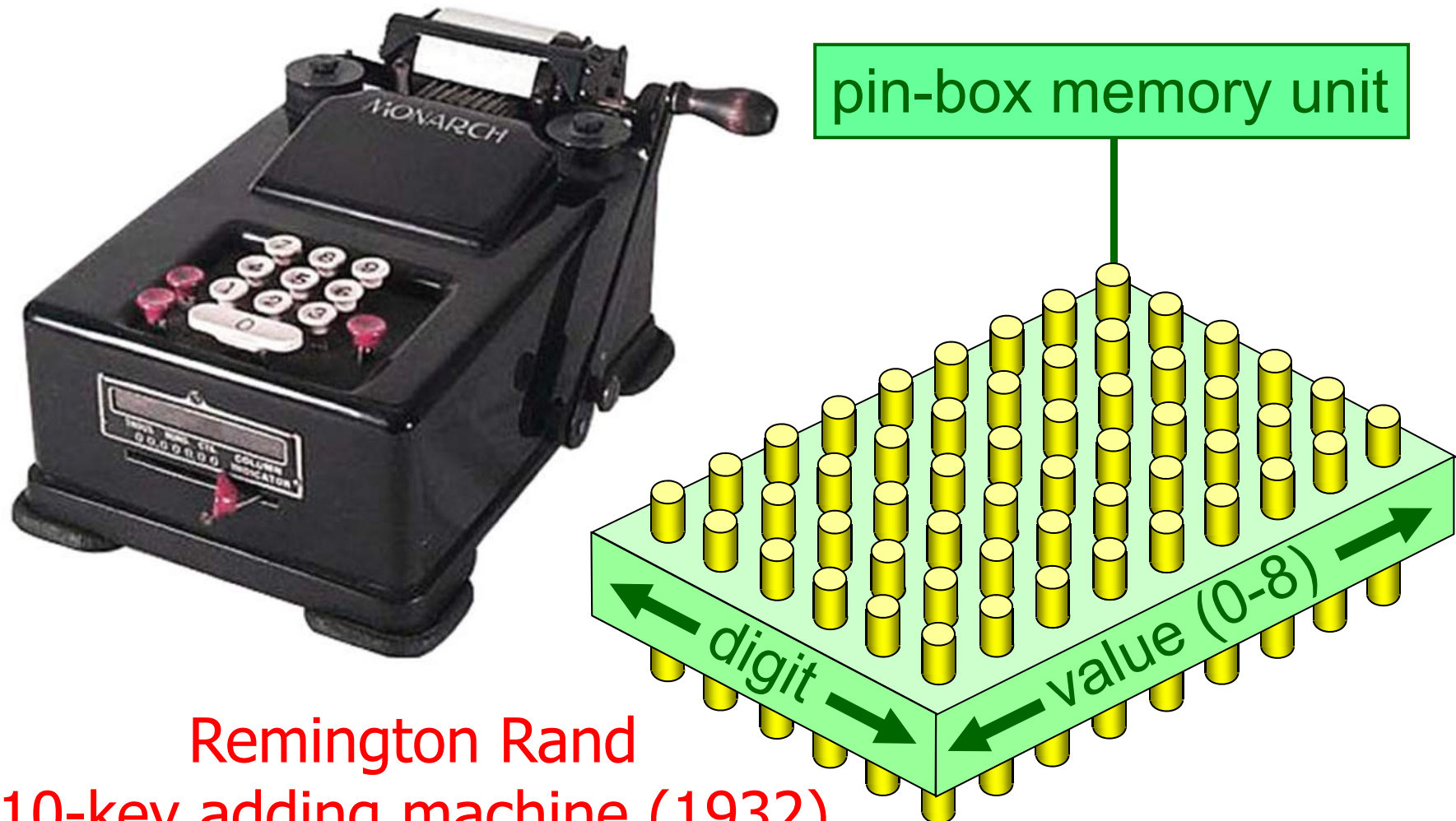
- 10-key machines

10-key machines



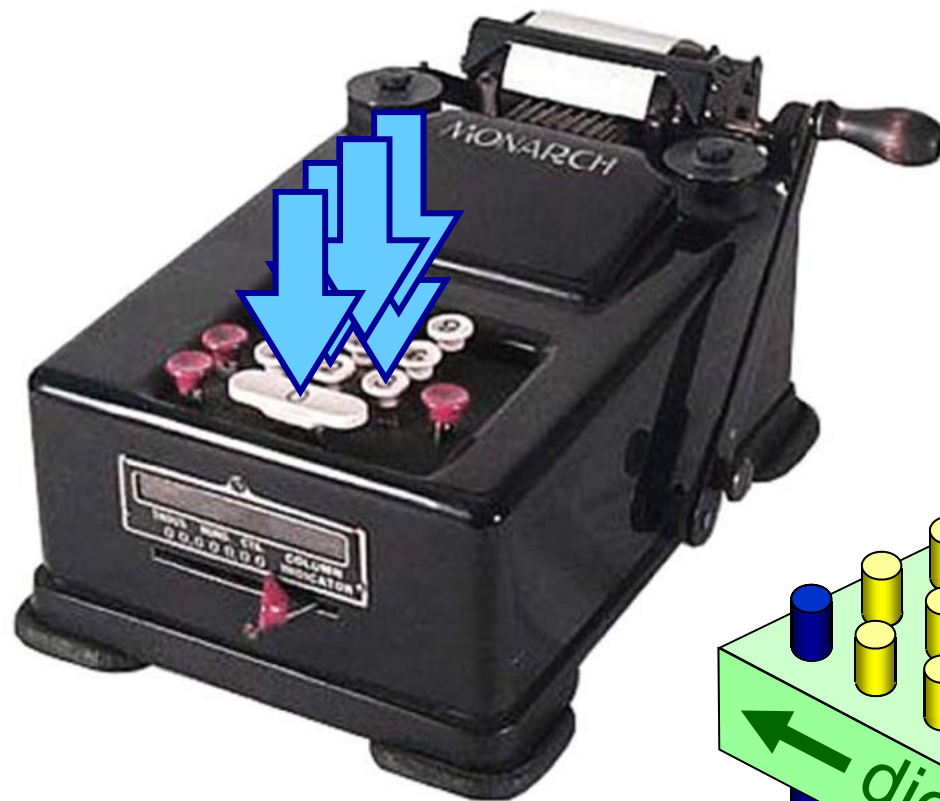
Remington Rand
10-key adding machine (1932)

10-key machines

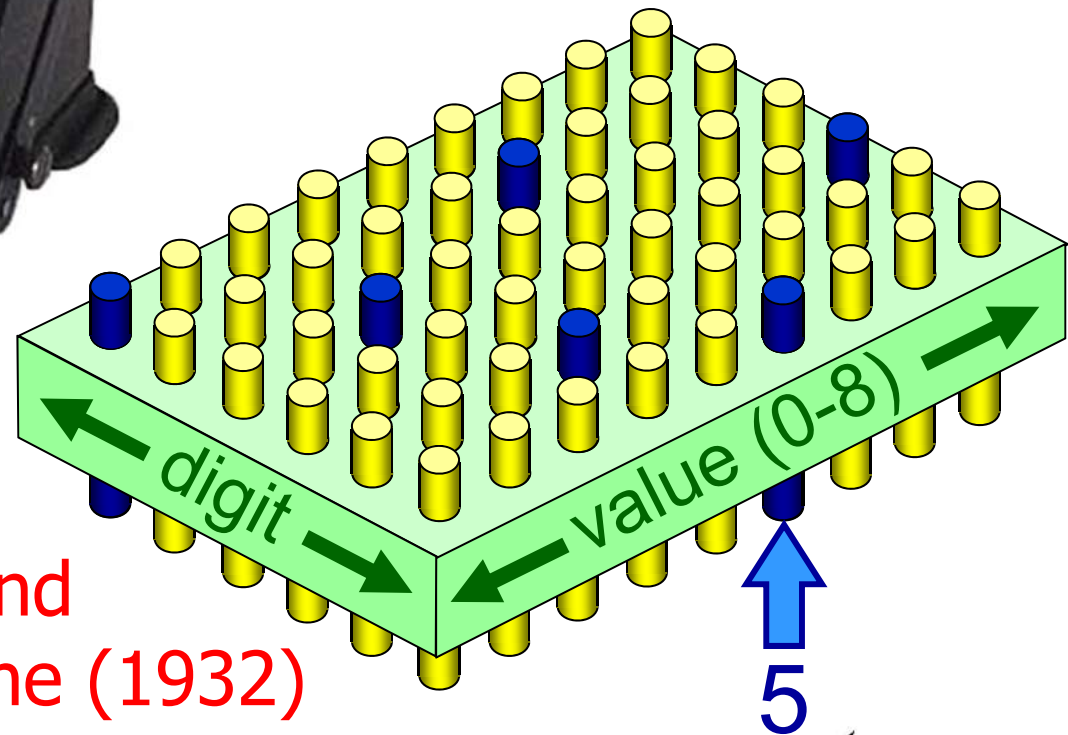


Remington Rand
10-key adding machine (1932)

10-key machines

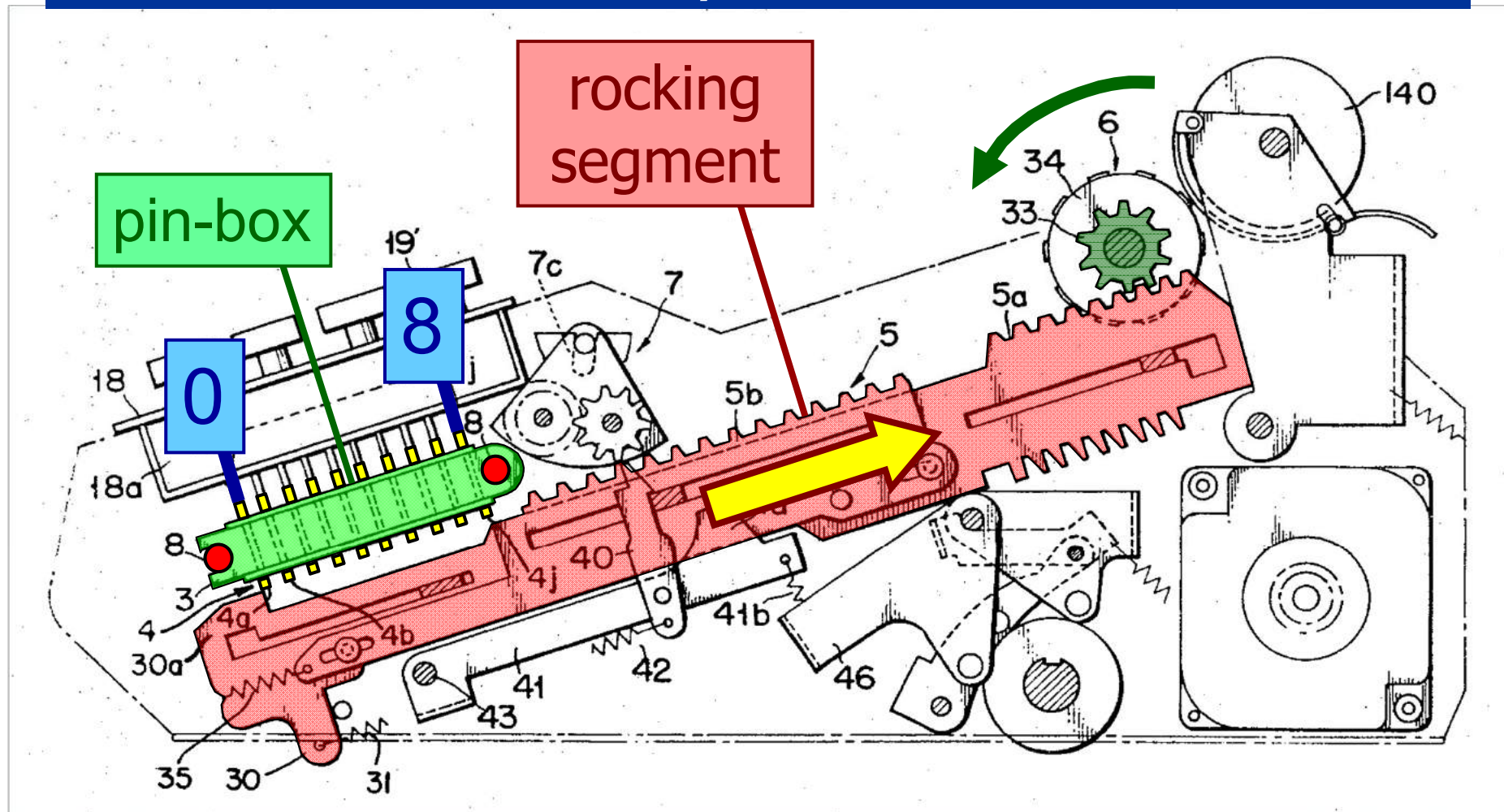


0 5 2 8 3 5



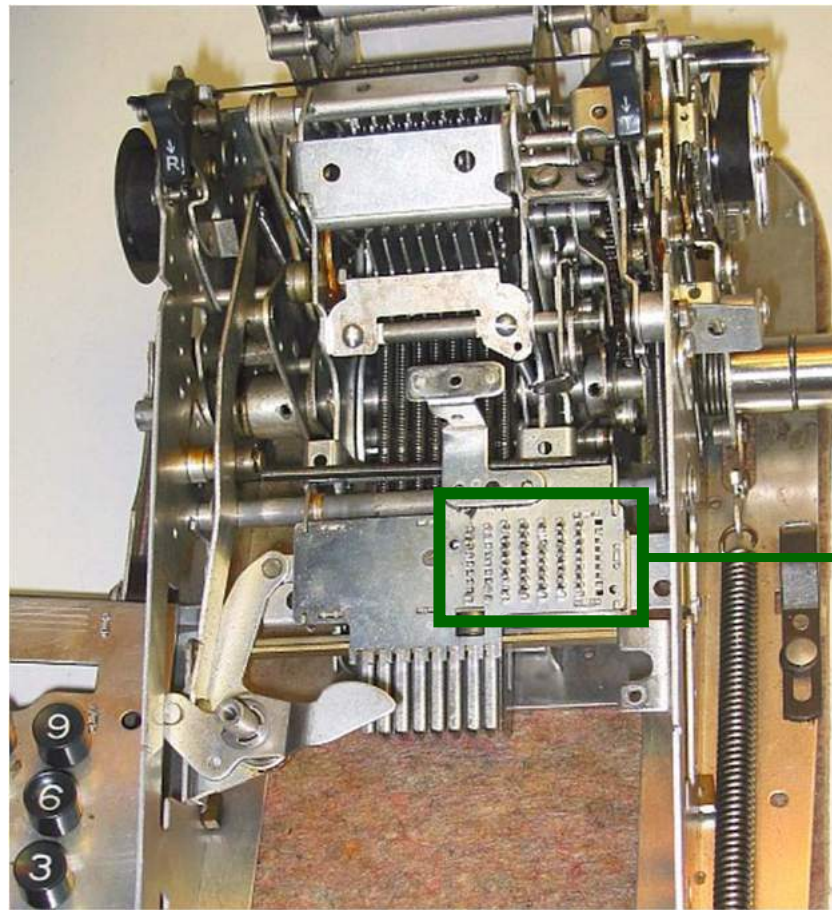
Remington Rand
10-key adding machine (1932)

10-key machines



Cross section of a 10-key adding machine

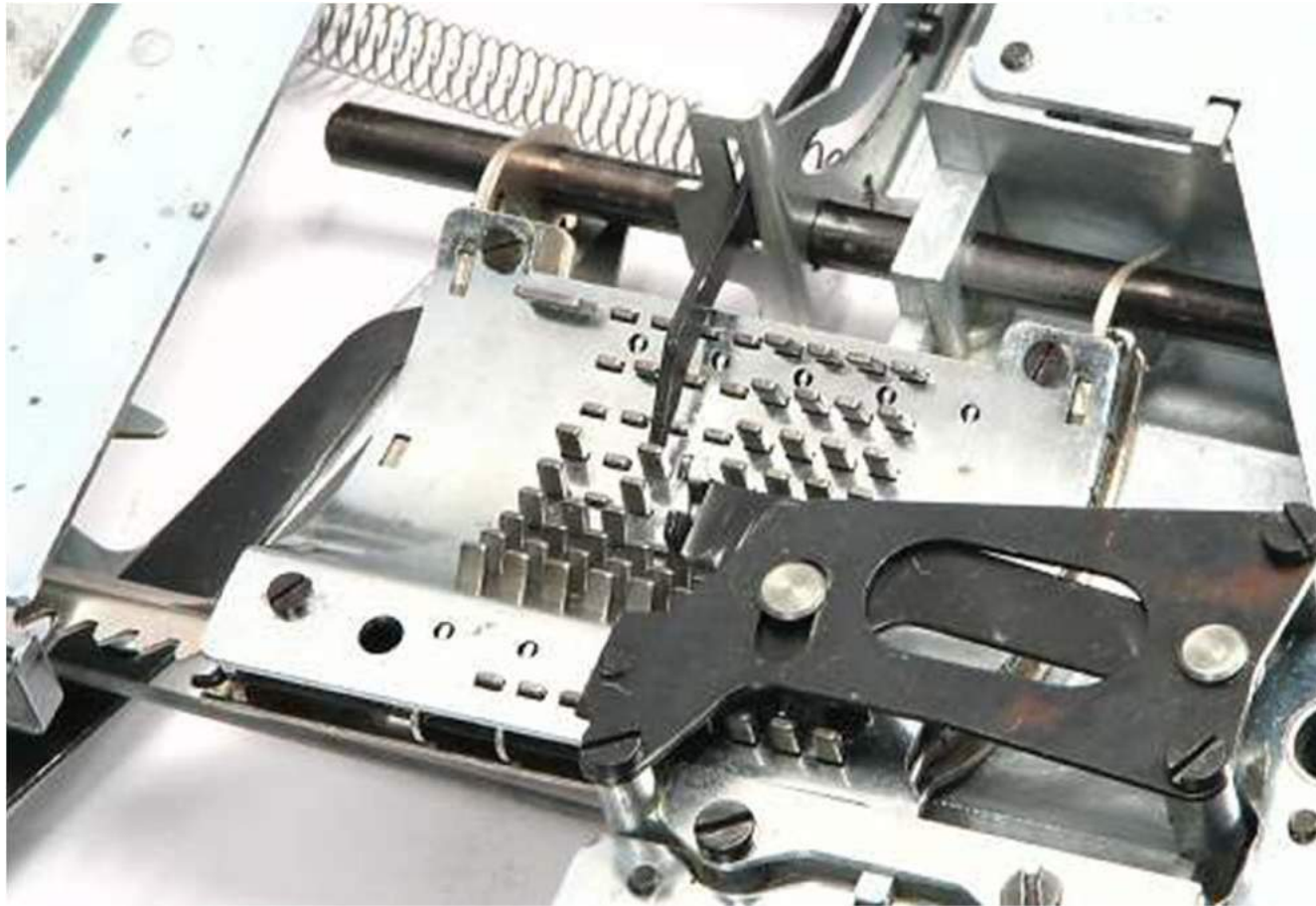
10-key machines



Pin-box

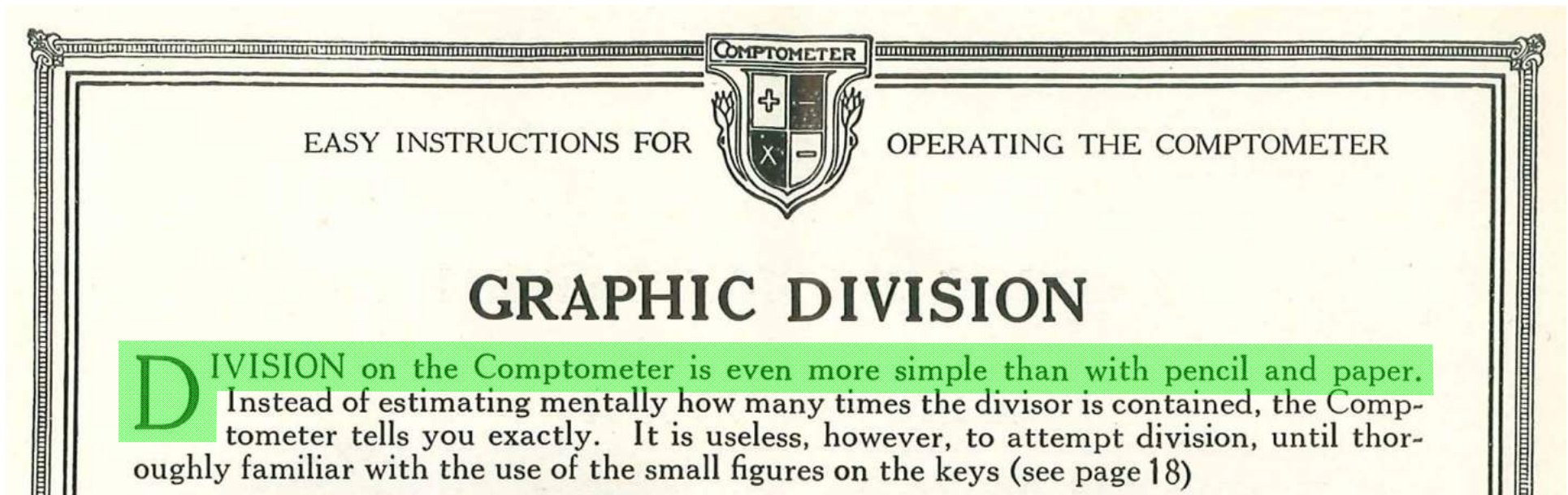
Victor Tallymaster 10-key adding machine

10-key machines



Facit CA2-16 – multiplier pinbox

10-key machines

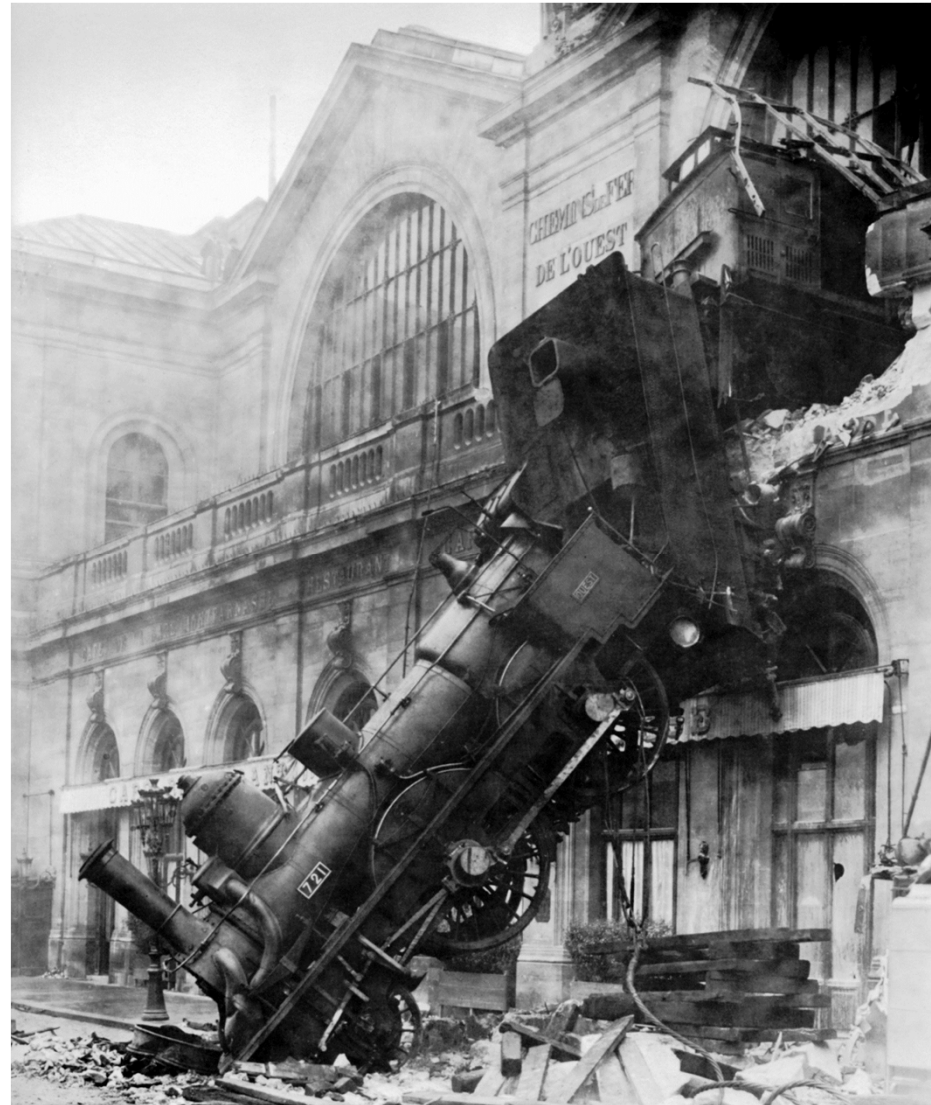


Multiplication & division
is awkward on adding machines

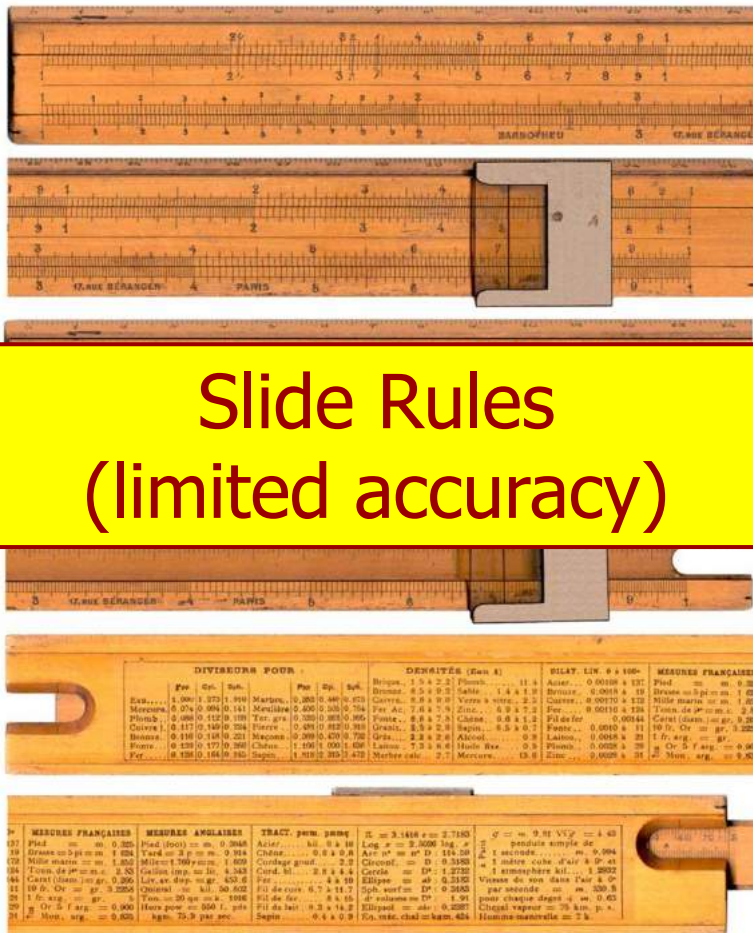
10-key machines

19th Century
Industrial Revolution

Need for complex
calculations
(sin,cos,tan,log,e^x,...)



Difference Engine



Slide Rules
(limited accuracy)

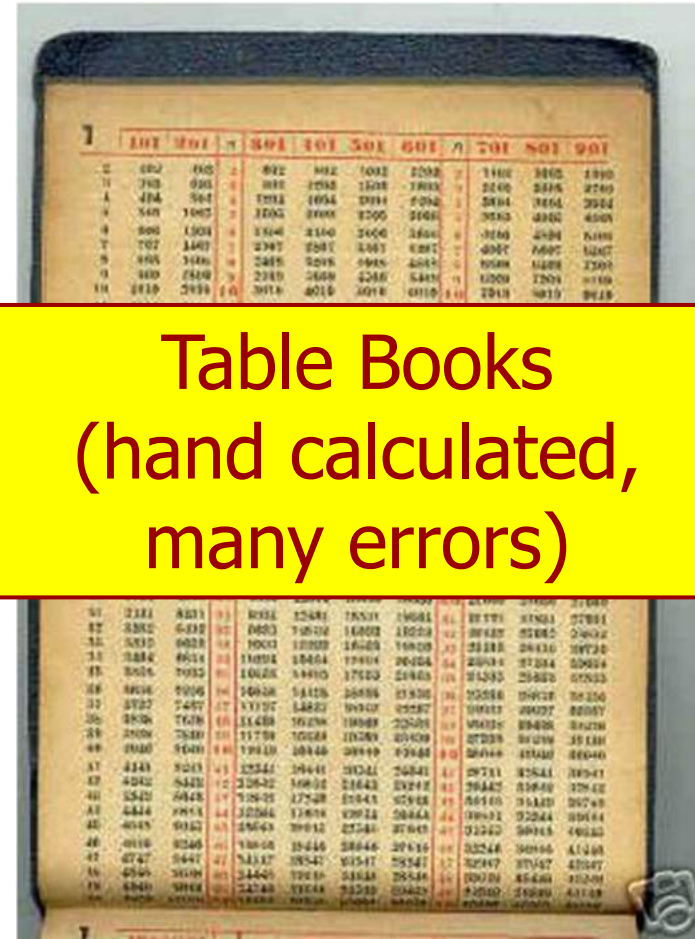


Table Books
(hand calculated,
many errors)

19th century tools for complex calculations

Pascaline

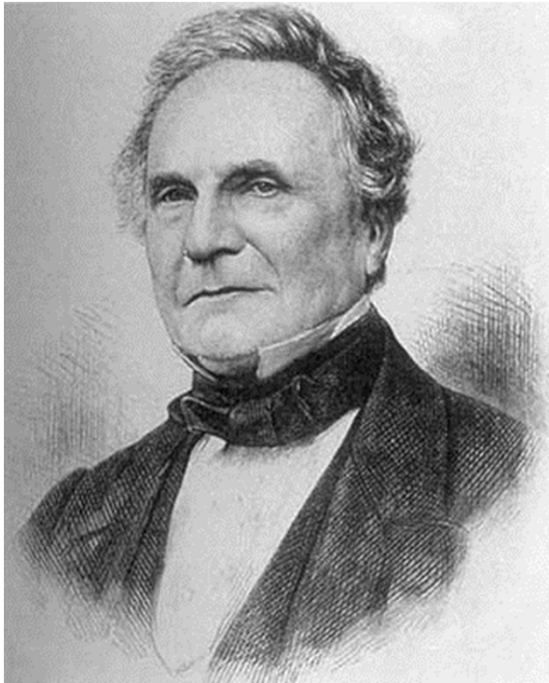
Comptometer

10-key

Difference

Summary

Difference Engine



Babbage
(1791-1871)

- Genius mathematician
- Inventor of the computer
- Machine too complex for 19th century (~20,000 parts)
- Machine finally built in 1991

Goal Difference Engine:
calculating & printing
values of *any*
mathematical function

P2

Charles Babbage (26 december 1791 – 18 oktober 1871) was een Brits uitvinder en werd bekend als de ontwerper van de eerste geautomatiseerde, programmeerbare, mechanische rekenmachine, de voorloper van de elektronische computer.

Difference Engine No. 1:

Babbage ontwierp in 1821 een mechanische, automatische rekenmachine, de Difference Engine, om wiskundige tabellen te genereren. In die tijd werden deze tabellen door mensen gegenereerd, wat fouten in de hand werkte. De machine werd echter maar voor een deel gebouwd en heeft daardoor nooit volledig gewerkt. Afgebouwd zou hij uit 25.000 delen hebben bestaan en 15 ton hebben gewogen.

Analytical Engine:

Van 1834 tot aan zijn dood in 1871 was Babbage bezig met het concept van de eerste programmeerbare (mechanische) rekenmachine, die hij de analytische machine noemde (Analytical Engine). Een waardige voorloper van de elektronische computer zoals wij die nu kennen, omdat hij in principe de basisfuncties van een eenvoudige computer zou hebben. Hij zou met ponskaarten werken, beslissingen nemen, berekeningen maken en uitkomsten onthouden. Als hij zou zijn gebouwd zou het een gigantisch apparaat geweest zijn, opgebouwd uit mechanische onderdelen als tandwielen en assen, dat zou moeten worden aangedreven door een stoommachine.

Difference Engine No. 2:

In de periode van 1841 tot 1849 ontwierp Babbage, geïnspireerd door zijn nieuwe inzichten opgedaan bij het ontwerpen van de Analytical Engine, de Difference Engine 2, die door optimalisatie van het ontwerp veel kleiner zou zijn geweest dan de eerste versie (4000 delen, 2,6 ton).

De Difference Engines en Analytical Engines zijn tijdens Babbage leven nooit (volledig) gebouwd. Redenen hiervoor zijn:

- * Babbage bracht voortdurend veranderingen en verfijningen aan in zijn ontwerpen. Zo is er nooit een gefinaliseerd ontwerp gemaakt van de Analytical Engine, er staan allerlei versies op papier met diverse specificaties. Alleen van Difference Engine 2 maakte hij een min of meer compleet ontwerp.
- * Een voortdurend gebrek aan fondsen.
- * Tegenwerking van de Britse regering, die aanvankelijk het bouwen van de eerste Difference Engine financierde maar zich door gebrek aan resultaten terugtrok, en vanwege animositeit van personen in regeringskringen jegens Babbage.
- * Doordat gestandaardiseerde onderdelen zoals we die nu kennen nog niet waren uitgevonden, was een voldoende hoog productietempo van de verschillende onderdelen niet haalbaar, omdat het niet mogelijk was meerdere fabrieken deze onderdelen te laten fabriceren aangezien elke fabriek volgens eigen methoden en maten werkte.

Ook was er lange tijd discussie over de vraag of de Engines destijds volledig zouden hebben kunnen werken, omdat het niet zeker was dat de onderdelen met de stand van de techniek in die tijd met voldoende nauwkeurigheid gemaakt hadden kunnen worden.

Ada Lovelace schreef voor de Analytical Engine van Babbage het eerste computerprogramma. Het feit dat een vrouw zich hiermee bezig hield was voor die tijd zeer bijzonder. Vrouwen werden in het onderwijs buitengesloten. Ada Lovelace was evenwel door privéleraren tot wiskundige opgeleid en raakte in de jaren 30 van de 19e eeuw goed bevriend met Babbage. Omdat de machine niet gebouwd is, heeft ze haar programma's nooit zien werken. Een door Jean Ichbiah van Honeywell Bull onder de codenaam Groen voor het Amerikaanse ministerie van defensie ontwikkelde programmeertaal, werd in mei 1979 naar haar vernoemd. Op 10 december 1980, haar 165e geboortedag, volgde de officiële goedkeuring van het gebruikershandboek voor het nieuwe Ada.

Difference Engine alsnog gebouwd:

Het Science Museum in Londen heeft in de periode 1985-1991 ter ere van de 200e geboortedag van Charles Babbage de Difference Engine No. 2 gebouwd en deze werkte inderdaad. Bij het bouwen heeft men zoveel mogelijk volgens de technieken uit de tijd van Babbage gewerkt, om aan te tonen dat wanneer de Engine volledig in de 19e eeuw zou zijn gebouwd, deze ook gewerkt zou hebben. In 2001 voltooiden men een eveneens door Babbage ontworpen printer, die wordt aangestuurd door Difference Engine No. 2.

Hoewel de ontwerpen van Babbage opmerkelijke parallellen vertonen met de architectuur van hedendaagse computers, zo ontwierp hij de Analytical Engine al met een CPU (de "mill" in Babbage-terminologie) en geheugen (de "store") die van elkaar gescheiden waren, invloed op de ontwikkeling van de elektronische computers in de twintigste eeuw heeft Babbage niet gehad. Na zijn dood raakten zijn ideeën en ontwerpen in de vergetelheid, met name door een gebrek aan publicaties over zijn ideeën van de kant van Babbage zelf. Daardoor moesten de ontwerpers van de elektronische computers de door Babbage al beschreven principes zelf opnieuw uitvinden.

Bron: http://nl.wikipedia.org/wiki/Charles_Babbage

Breedveld; 6-4-2008

Difference Engine

Polynomial expansion:

$$f(x) \approx a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + a_3 x^3 + \dots + a_n x^n$$

If $x \geq n$ then $f(x+1)$ can be calculated from previous n values of $f(x)$ plus a constant

$$n=1: f(x+1) = f(x) + c \quad \text{for } x \geq 1$$

$$f(2) = f(1) + c$$

$$f(3) = f(2) + c, \text{ etc.}$$

Difference Engine

Polynomial expansion:

$$f(x) \approx a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + a_3 x^3 + \dots + a_n x^n$$

If $x \geq n$ then $f(x+1)$ can be calculated from previous n values of $f(x)$ plus a constant

$$n=1: f(x+1) = f(x) + c \quad \text{for } x \geq 1$$

$$n=2: f(x+1) = 2f(x) - f(x-1) + c \quad \text{for } x \geq 2$$

Difference Engine

$$n=2: f(x+1) = 2f(x) - f(x-1) + c$$

Difference Engine

$$n=2: f(x+1) = 2f(x) - f(x-1) + c$$

$$f(x+1) = f(x) + d(x) + c$$

$$d(x) = f(x) - f(x-1)$$

Difference Engine

$$n=2: f(x+1) = f(x) + d(x) + c$$

$$f(3) = f(2) + d(2) + c$$

$$f(4) = f(3) + d(3) + c, \text{ etc.}$$

$$d(3) = f(3) - f(2)$$

Difference Engine

$$n=2: f(x+1) = f(x) + d(x) + c$$

$$f(3) = f(2) + d(2) + c$$

$$f(4) = f(3) + d(3) + c, \text{ etc.}$$

$$n=7: f(x+1) = f(x) + d(x) + \dots + d(x-5) + c$$

$$f(8) = f(7) + d(7) + \dots + d(2) + c$$

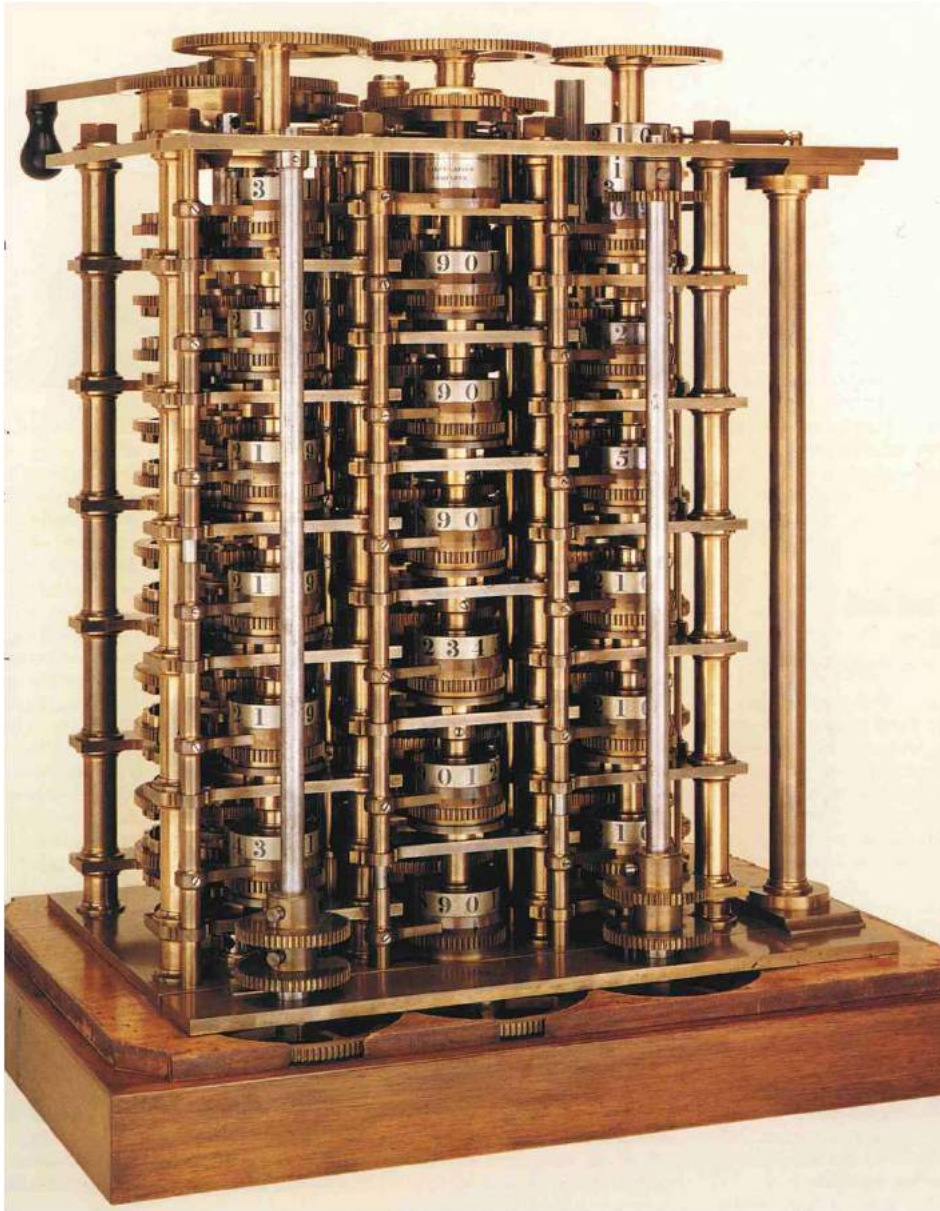
$$f(9) = f(8) + d(8) + \dots + d(3) + c, \text{ etc.}$$

Difference Engine

Difference Engine No. 1: $n = 2$

$$f(3) = f(2) + d(2) + c$$

- Choose parabola
- Calculate $f(2)$, $d(2)$ & c by hand
- Put these values in memory
- Machine calculates $f(3)$, $f(4)$, etc.



Difference Engine No. 1 (demo model)

Pascaline

Comptometer

10-key

Difference

Summary



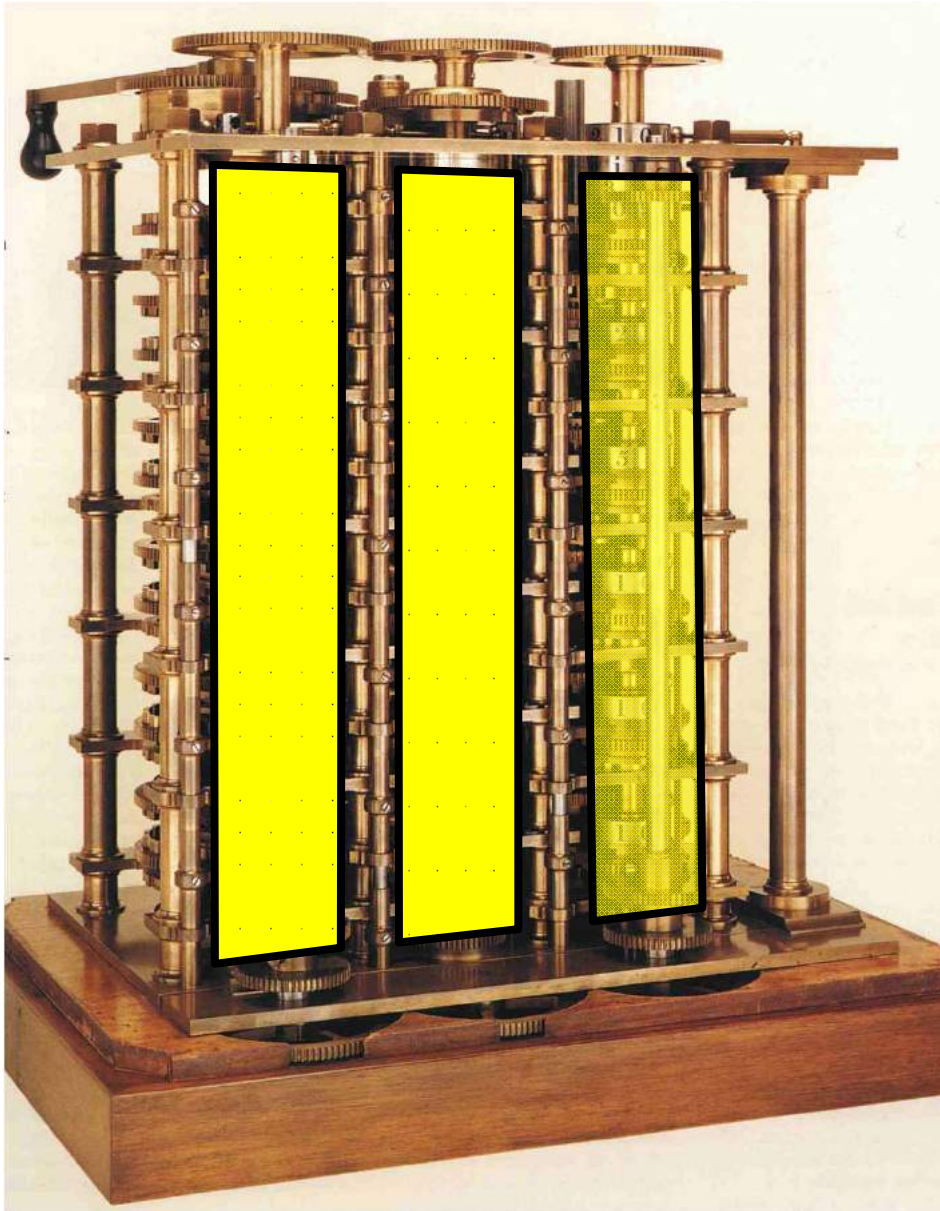
Pascaline

Comptometer

10-key

Difference

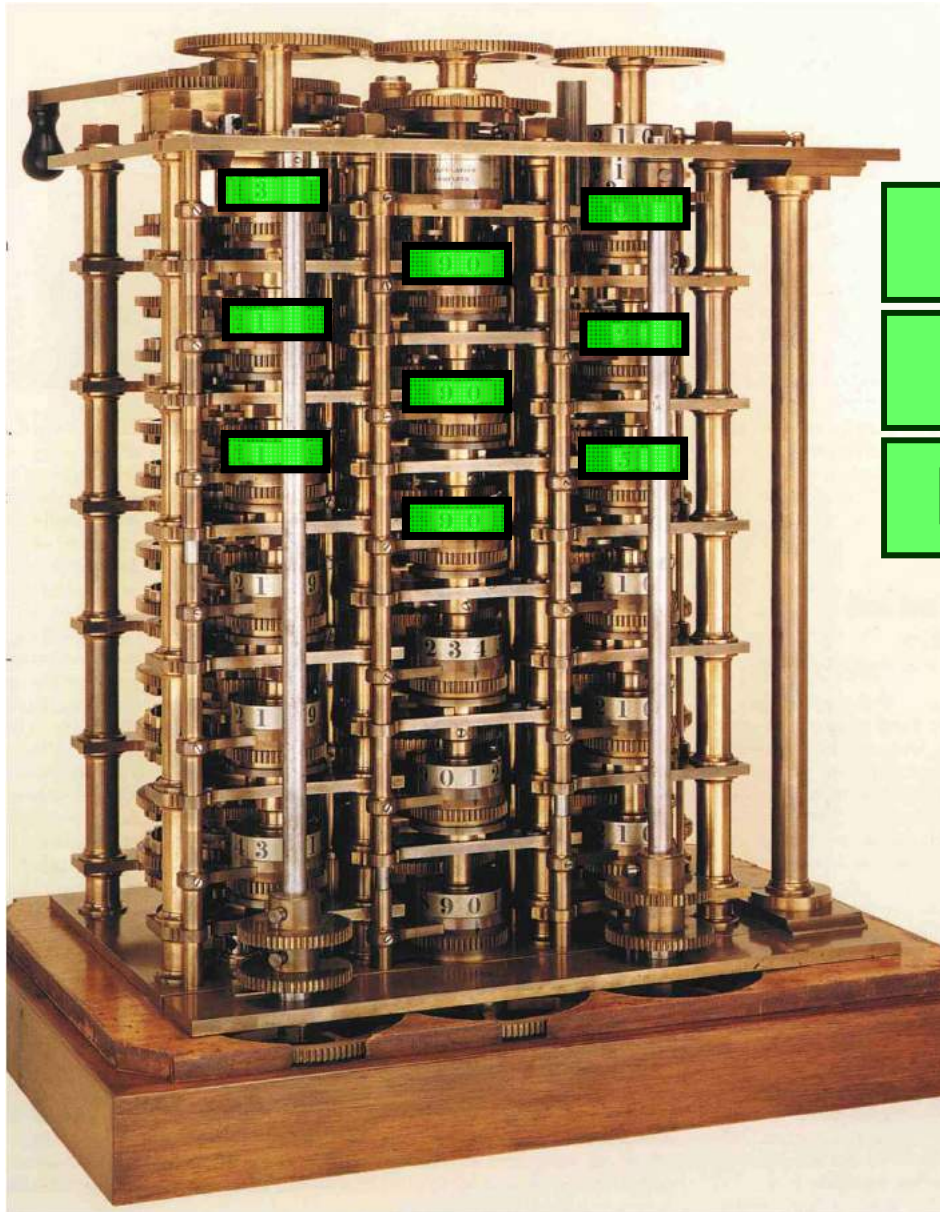
Summary



$$f(3)=f(2)+d(2)+c$$

3 memory registers

Initialisation:
Put $f(2)$, $d(2)$ and c
into these registers



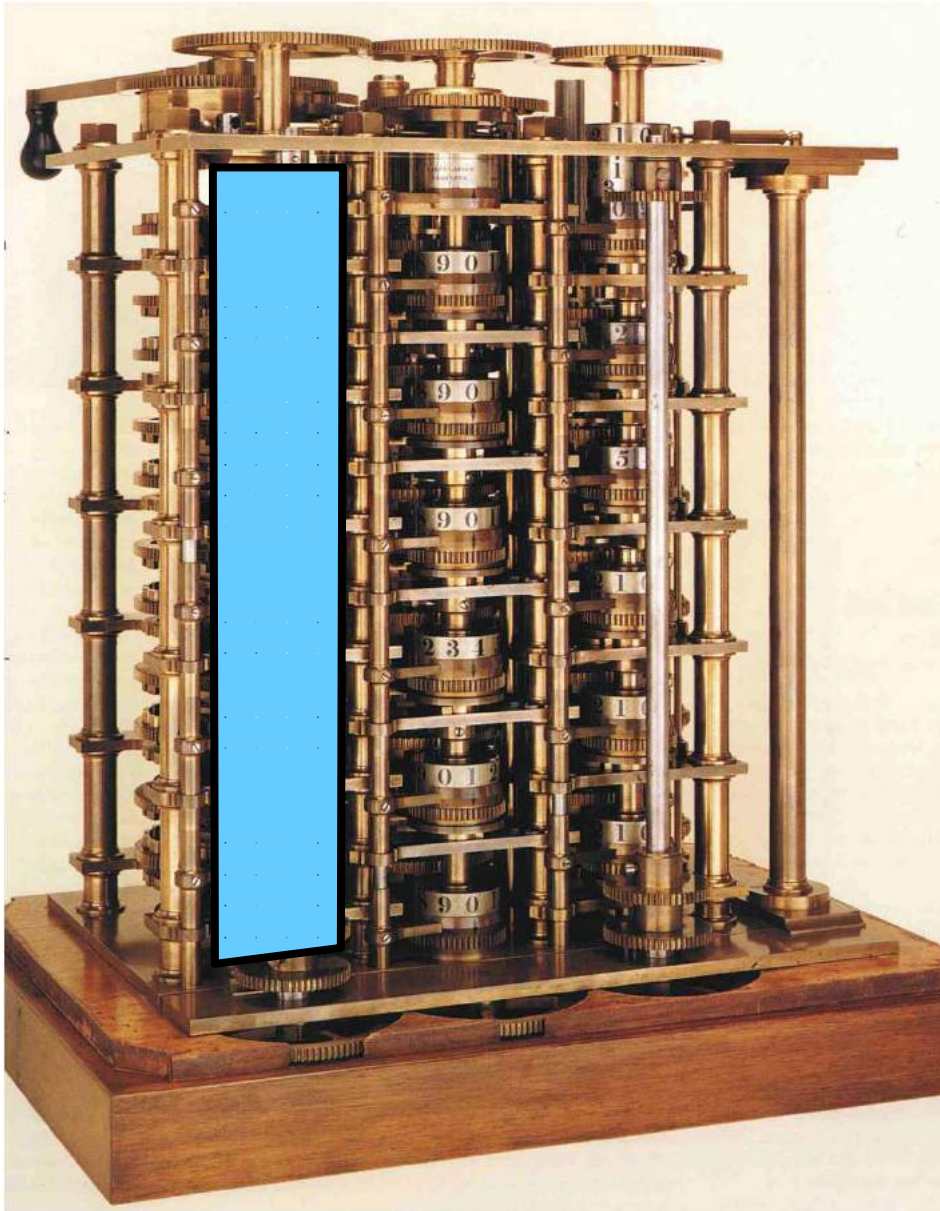
$$f(3)=f(2)+d(2)+c$$

units

tens

hundreds

6 digits



$$f(3)=f(2)+d(2)+c$$

1 result register

Result:

1st turn gives $f(3)$
2nd turn gives $f(4)$
3rd turn gives $f(5)$
etc.

Example:

$$f(x) = x^2 - 2x + 4$$

$$f(6) = f(5) + d(5) + c$$

$$f(3) = 4 + 1 + 2 = 7$$

$$f(4) = 7 + 3 + 2 = 12$$

$$f(5) = 12 + 5 + 2 = 19$$

etc...

In Memory:

$$f(2) = 4 \quad d(2) = 1 \quad c = 2$$

$$d(5) = f(5) - f(4)$$

$$d(3) = 7 - 4 = 3$$

$$d(4) = 12 - 7 = 5$$

$$d(5) = 19 - 12 = 7$$

Simply adding, subtracting & memorizing

Difference Engine

$$n=2: f(x+1) = f(x) + d(x) + c$$

$$f(3) = f(2) + d(2) + c$$

$$f(4) = f(3) + d(3) + c, \text{ etc.}$$

$$n=7: f(x+1) = f(x) + d(x) + \dots + d(x-5) + c$$

$$f(8) = f(7) + d(7) + \dots + d(2) + c$$

$$f(9) = f(8) + d(8) + \dots + d(3) + c, \text{ etc.}$$

Difference Engine

Difference Engine No. 2: $n = 7$

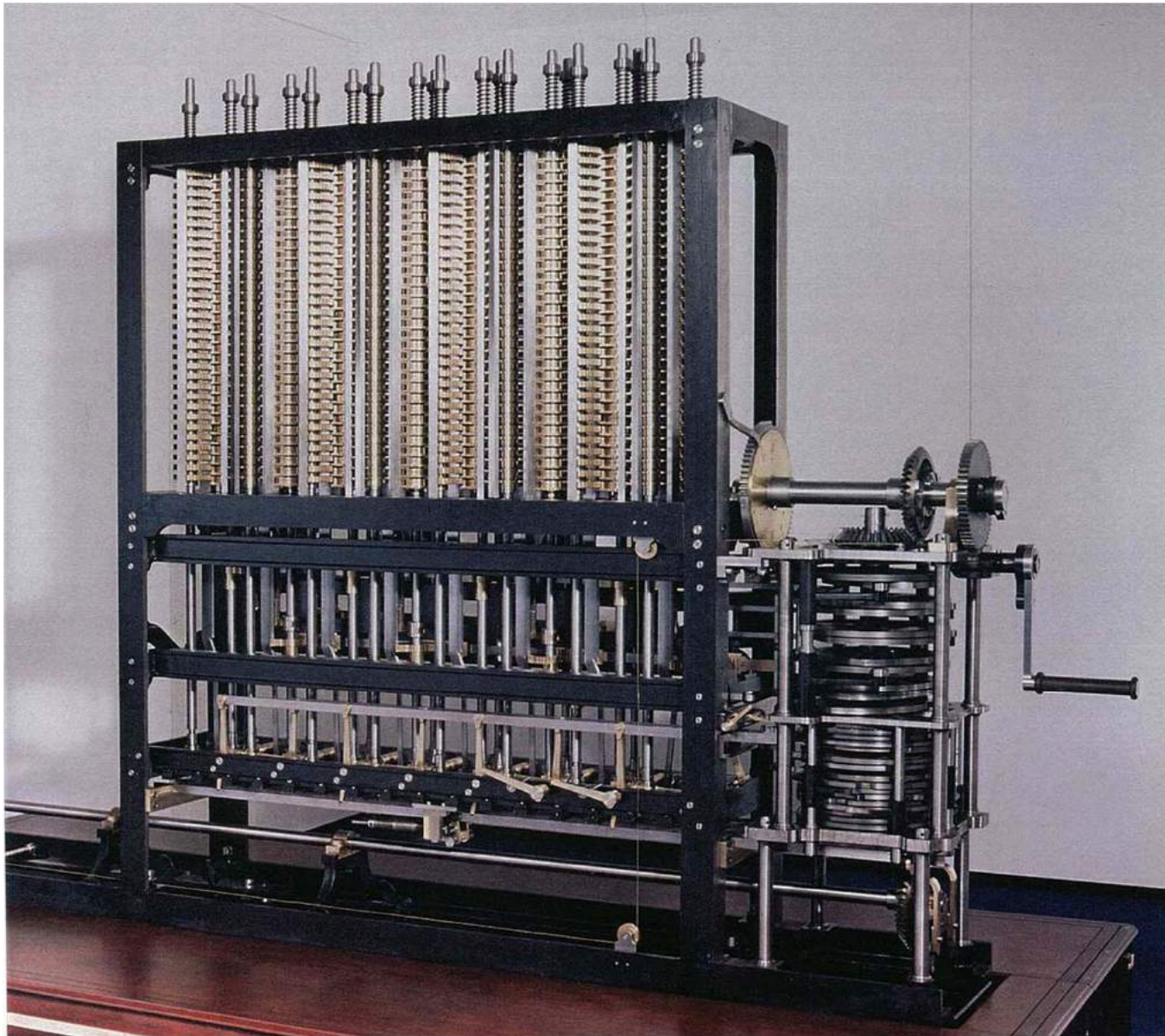
$$f(8) = f(7) + d(7) + \dots + d(2) + c$$

Difference Engine

Difference Engine No. 2: $n = 7$

$$f(8) = f(7) + d(7) + \dots + d(2) + c$$

- Choose polynoma with $n=7$
- Calculate $f(7)$, $d(7)$.. $d(2)$ & c by hand
- Put these values in memory
- Machine calculates $f(8)$, $f(9)$, etc.



Difference Engine No. 2

Science
Museums
London &
Seattle

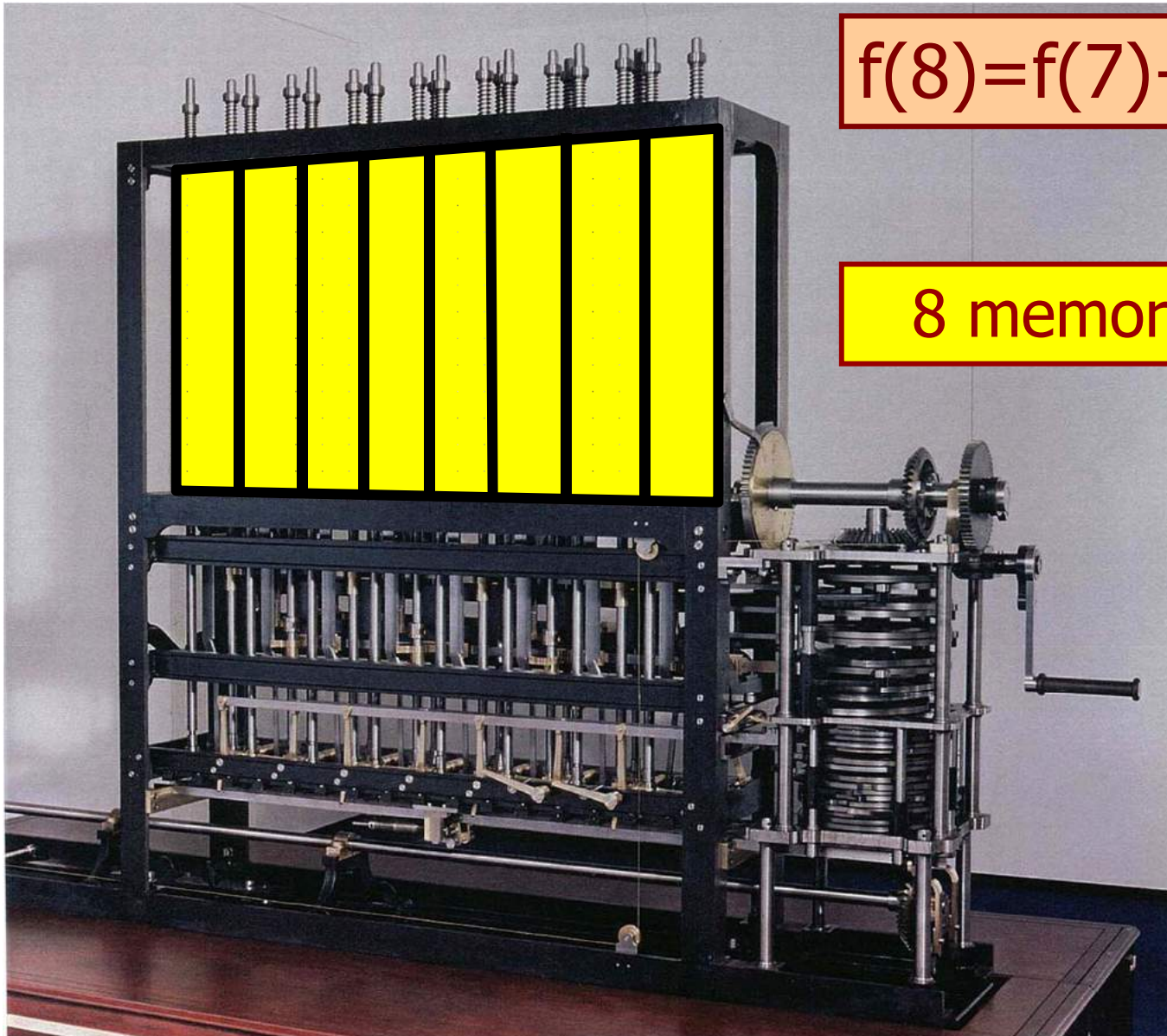
Pascaline

Comptometer

10-key

Difference

Summary



$$f(8) = f(7) + d(7..2) + c$$

8 memory registers

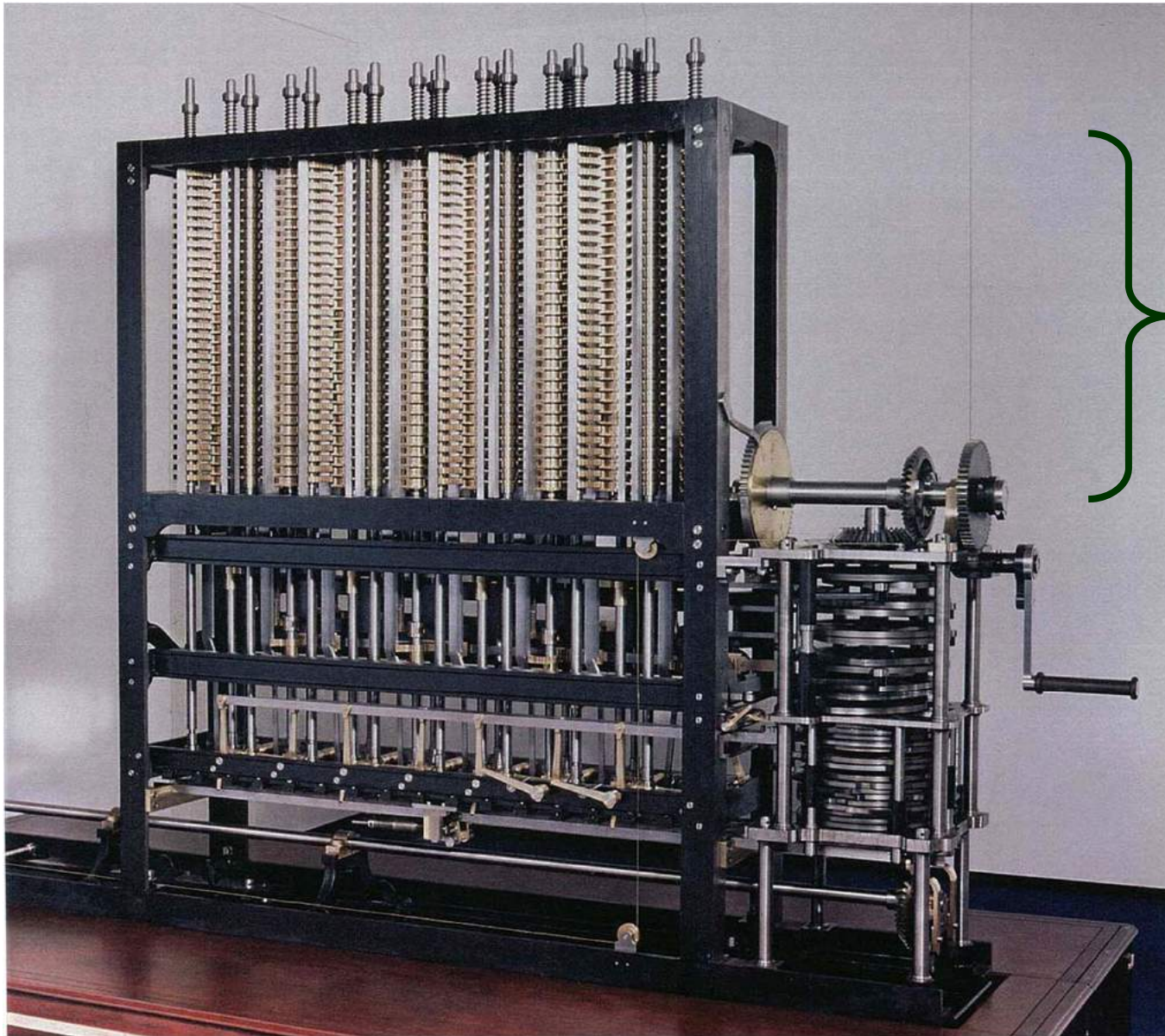
Pascaline

Comptometer

10-key

Difference

Summary



31 digits

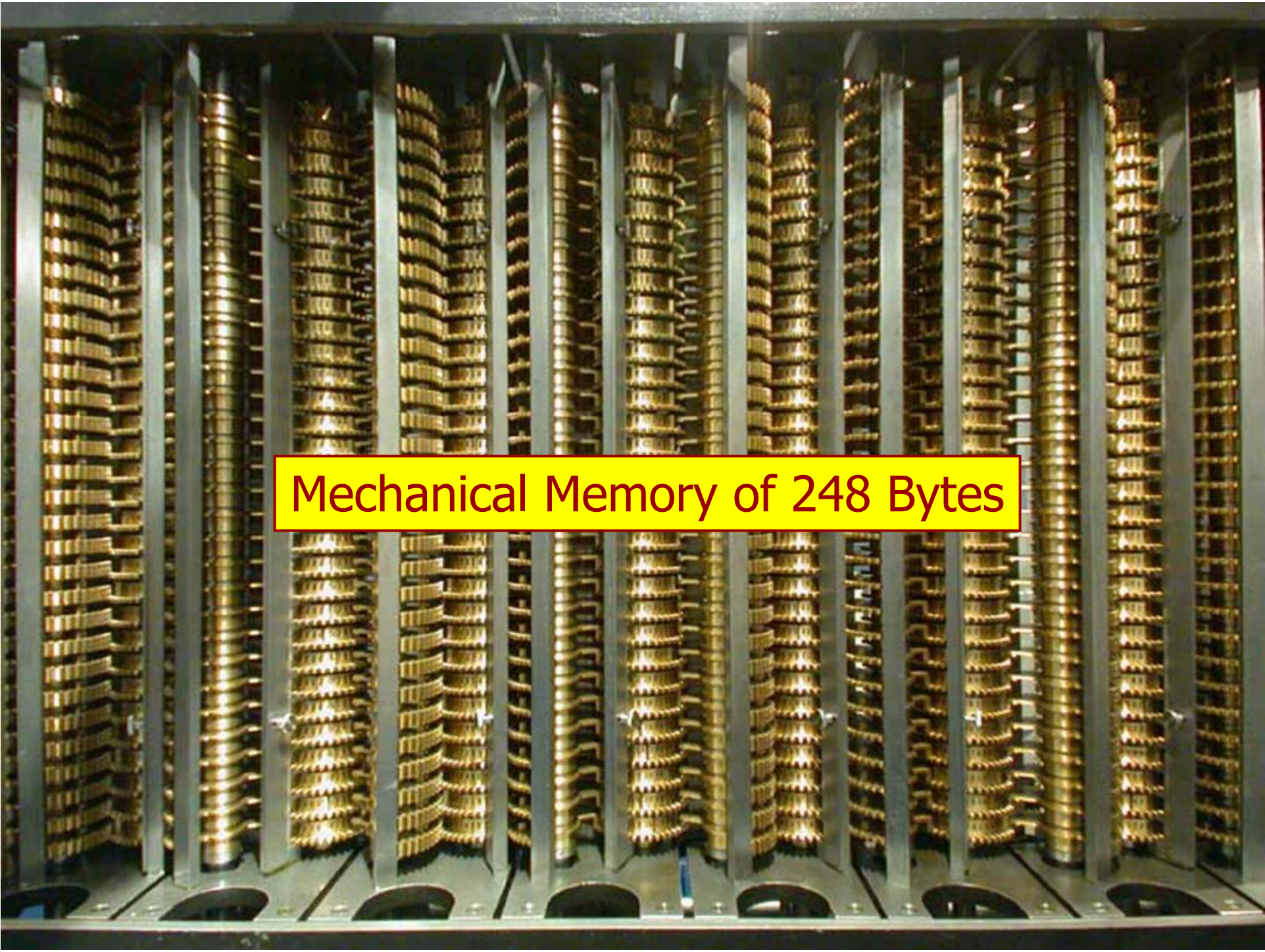
Pascaline

Comptometer

10-key

Difference

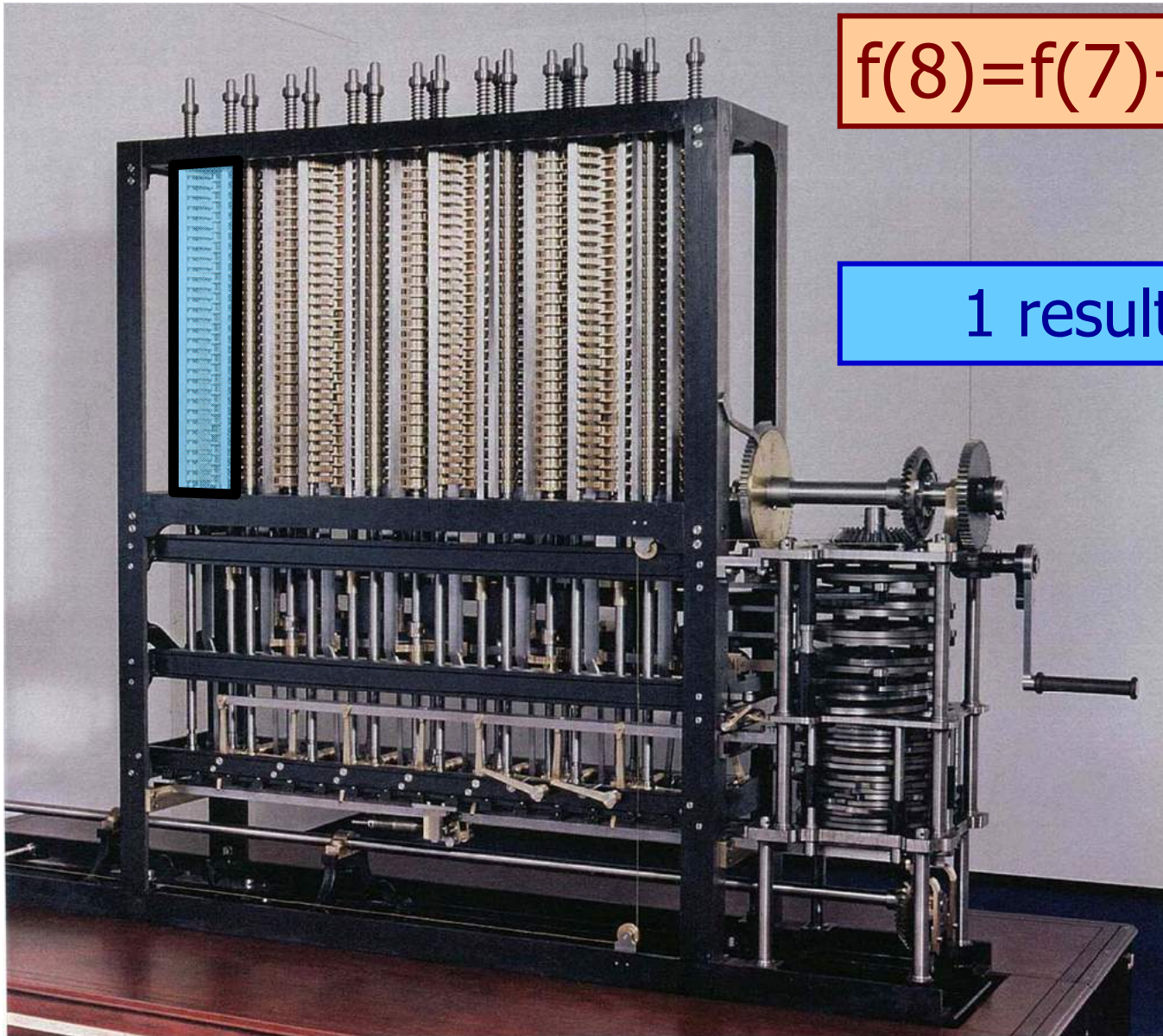
Summary

A photograph of a mechanical memory device, likely a core memory or a similar early computer storage technology. It features a series of vertical metal strips, each holding a stack of small, cylindrical components (cores) connected by horizontal wires. The components are arranged in a grid-like pattern, with the vertical strips acting as bus lines. The overall structure is complex and dense, typical of early computer hardware.

Mechanical Memory of 248 Bytes

$$f(8) = f(7) + d(7..2) + c$$

1 result register



Pascaline

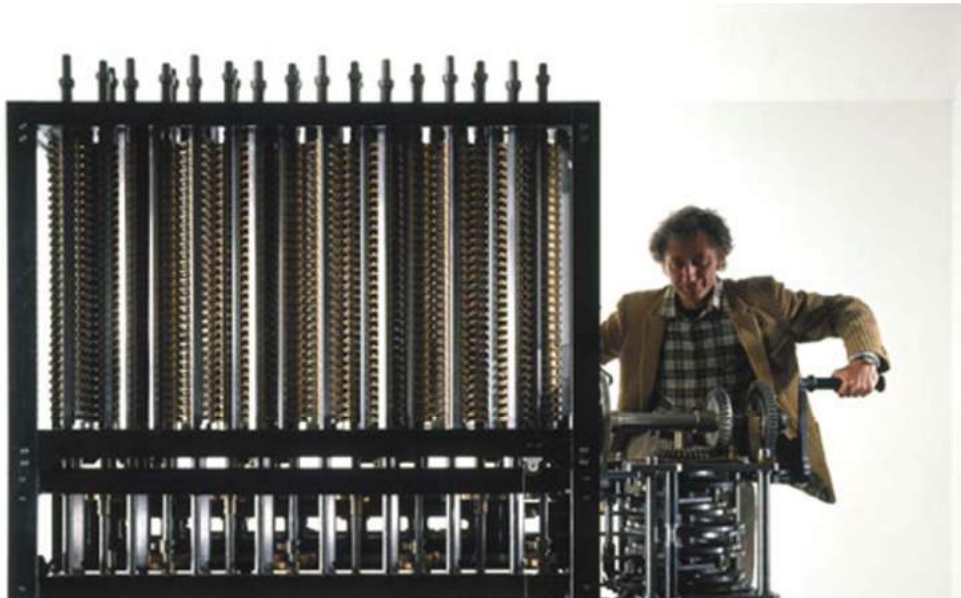
Comptometer

10-key

Difference

Summary

Difference Engine



- Nowadays very ingenious
- In time of Babbage a failure

- Life of Charles Babbage:

<http://www.sciencemuseum.org.uk/onlinestuff/stories/babbage.aspx>

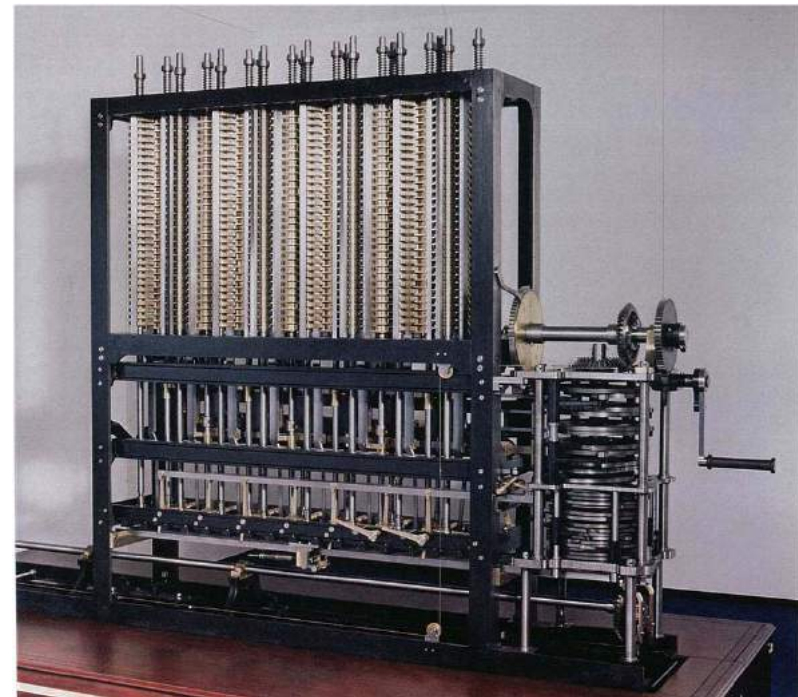
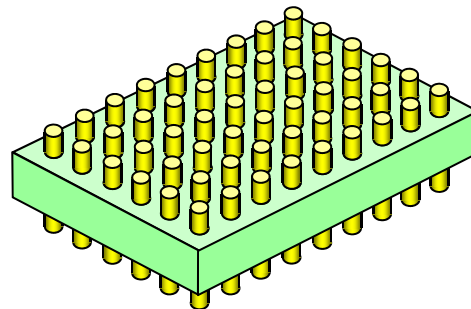
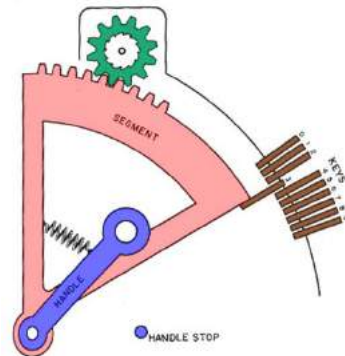
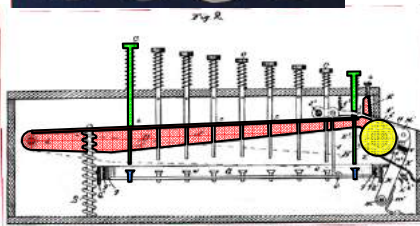
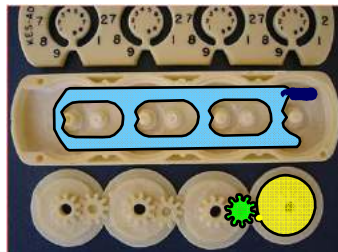
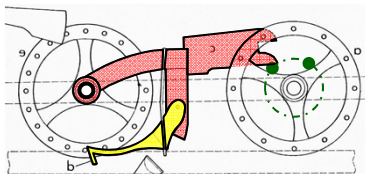
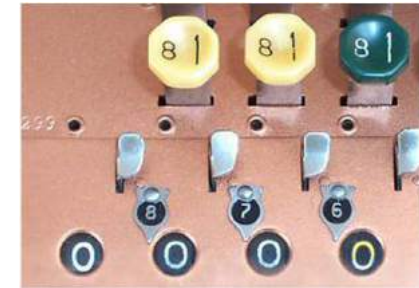
- Detailed description of the mechanism:

<http://www.satyam.com.ar/Babbage/en/index.html>

- Difference Engine at Science Museum London

<http://www.sciencemuseum.org.uk/visitmuseum/galleries/computing/ondisplay.aspx>

Summary



Pascaline

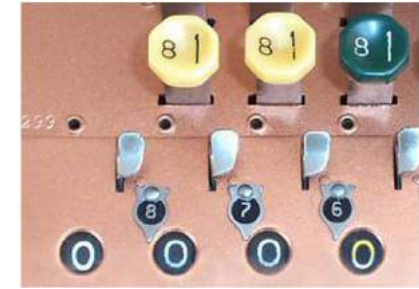
Comptometer

10-key

Difference

Summary

Summary



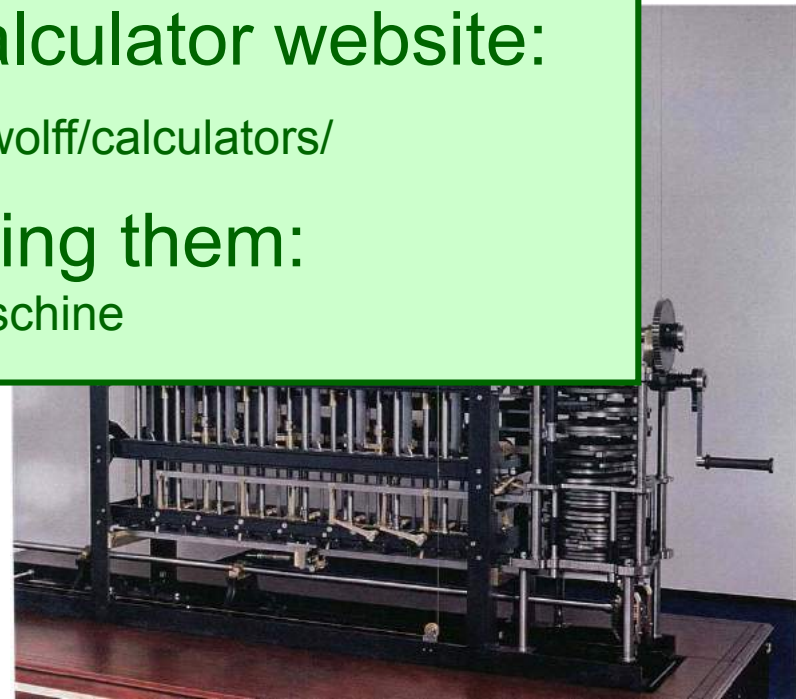
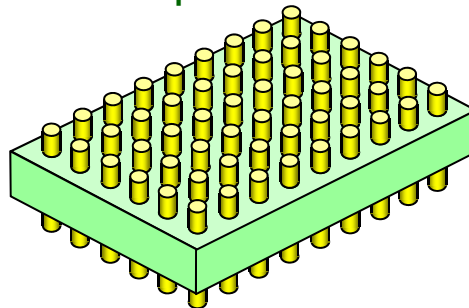
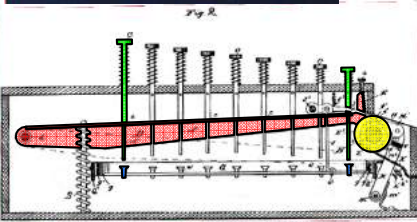
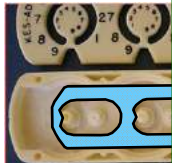
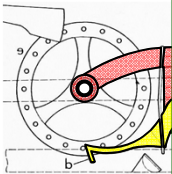
- Best mechanical calculator website:

<http://home.vicnet.net.au/~wolff/calculators/>

- Best chance of buying them:

www.eBay.de – Rechenmaschine

www.marktplaats.nl



Pascaline

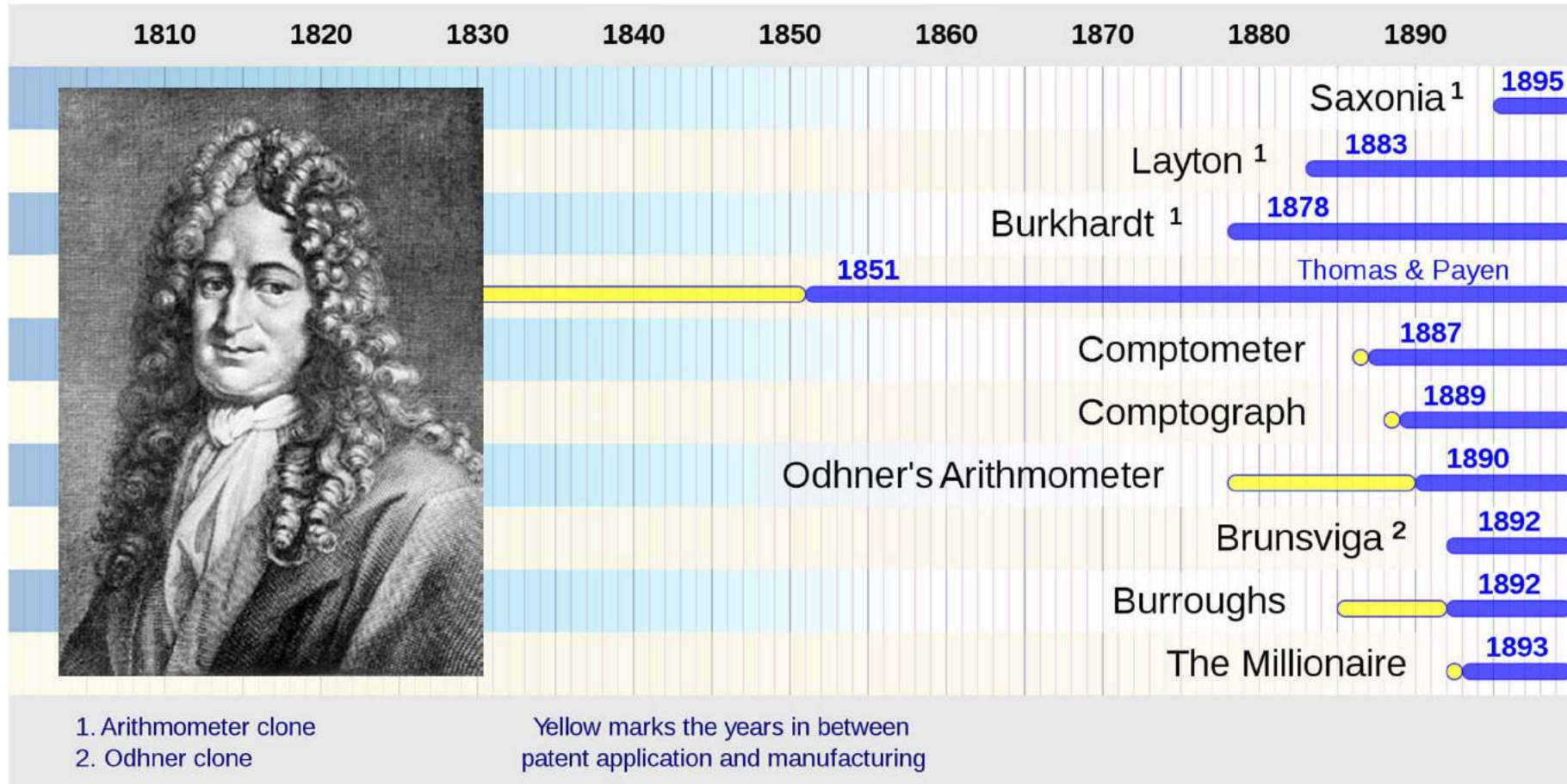
Comptometer

10-key

Difference

Summary

To be continued..



Industrial developments between 1800-1900

Pascaline

Comptometer

10-key

Difference

Summary

Summary



To be continued ...

Leibniz
(1646-1716)