I numeri binari, con molte divagazioni

Fabrizio Luccio

Museo del Calcolo, Pisa 2016

numeri decimale e binari

.. 1000										
	100	10	1	..	8	4	2	1		
	3	7	5			1	1	0	6	
1	0	0	1		1	0	0	1	9	

E ora cominciamo con le divagazioni

Il Libro dei Mutamenti
易經, Yì jīng, I Ching
è il più antico libro cinese e raccoglie i principi di saggezza scientifica e filosofica

Sopravvisse al “rogo dei libri” e alla “sepoltura degli eruditi” ordinati dall’imperatore Qin nel 213 a.C.

Un concetto primitivo di dualità: Yin e Yang

Yin	Yang
nero	bianco
terra	cielo
notte	giorno
ovest	est
freddo	caldo
acqua	fuoco
passivo	attivo
femminile	maschile

图 90 天地自然河图

Combinando i due simboli in gruppi di tre si costruiscono otto *trigrammi* che indicano otto elementi di base

Yang – maschile – è ora una linea continua
Yin – femminile – è ora una linea aperta

☰	乾 *qián*	Cielo 天
☷	坤 *kūn*	Terra 地
☳	震 *zhèn*	Tuono 雷
☵	坎 *kǎn*	Acqua 水
☶	艮 *gèn*	Monte 山
☴	巽 *xùn*	Vento 風
☲	離 *lí*	Fuoco 火
☱	兌 *duì*	Lago 泽

I trigrammi sono poi combinati a coppie in tutti i modi possibili dando luogo a sessantaquattro *esagrammi* che sono alla base dell'impiego del I Ching come mezzo di divinazione

Fuoco
Lago

Sentenza: Il fuoco divampa verso l'alto, il lago si perde verso il basso. Due sorelle che vivono insieme ma hanno volontà opposte.

Vaticinio: Contrapposizione

Molto interessante è la divinazione Ifá
della etnia Yorubá (Ilé Ifé, Nigeria)

Inserita nel 2005 dalla Unesco nella lista dei
Masterpieces of the Oral and Intangible Heritage of Humanity

è basata su eventi binari: la caduta di mezzo guscio di una noce di kola con la concavità verso l'alto o verso il basso, secondo la decisione di Eshu

Attenzione: Eshu è una divinità capricciosa e maligna e deve sempre essere rispettato

I mezzi gusci di noce sono riuniti in un opelè in due gruppi di quattro, ciasuno associato a uno dei sedici Odù maggiori

L'interpretazione dell'oroscopo è legata all'incontro dei due Odù indicati dall'opelè, secondo $16 \times 16 = 256$ possibilità

I sedici Odù maggiori

ÈJÌOGBÈ	**Ọ̀YẸ̀KÚ**	**ÌWÒRÌ**	**ÒDÍ**
● I ● I ● I ● I	○ II ○ II ○ II ○ II	○ II ● I ● I ○ II	● I ○ II ○ II ● I
ÌROSÙN	**Ọ̀WỌ̀NRIN**	**Ọ̀BÀRÀ**	**Ọ̀KÀNRÀN**
● I ● I ○ II ○ II	○ II ○ II ● I ● I	● I ○ II ○ II ○ II	○ II ○ II ○ II ● I
ÒGÚNDÁ	**Ọ̀SÁ**	**ÌKÁ**	**ÒTÚRÚPỌ̀N**
● I ● I ● I ○ II	○ II ● I ● I ● I	○ II ● I ○ II ○ II	○ II ○ II ● I ○ II
ÒTÚÁ	**ÌRẸTẸ̀**	**Ọ̀ṢẸ́**	**ÒFÚN**
● I ○ II ● I ● I	● I ● I ○ II ● I	● I ○ II ● I ○ II	○ II ● I ○ II ● I

Thomas Hariot (1560-1621)

Thomas Hariot, Mathematical calculations and annotations

Il manoscritto originale, di data incerta e mai pubblicato, si trova nel British Museum

Hariot mostra diverse tabulazioni dei numeri che hanno una stretta correlazione con la rappresentazione binaria anche se questa non è esplicitamente menzionata. La prima:

a	a	b	ab	a	b	c	ab	ac	bc	abc		
1		3						7				**etc**

ovvero i numeri tra 1 e $2^n - 1$ possono essere rappresentati con n caratteri: per esempio per n = 3, i numeri tra 1 e $2^3 - 1 = 7$ sono rappresentati con i 3 caratteri a, b, c

Poi, per i numeri da 1 a 7 propone:

1	1		– – +	
2	2		– + –	
3	2+1		– + +	
4	4	**poi:**	+ – –	**7**
5	4+1		+ – +	
6	4+2		+ + –	
7	4+2+1		+ + +	

che si può interpretare come

		4	2	1	
1	1	−	−	+	1
2	2	−	+	−	2
3	2+1	−	+	+	3=2+1
4	4	+	−	−	4
5	4+1	+	−	+	5=4+1
6	4+2	+	+	−	6=4+2
7	4+2+1	+	+	+	7=4+2+1

In sostanza Hariot scopre implicitamente due proprietà fondamentali legate al sistema binario:

1. gli interi tra 1 e 2^n-1 si possono rappresentare come somma di potenze di 2

2. i sottoinsiemi propri di n oggetti sono 2^n-1

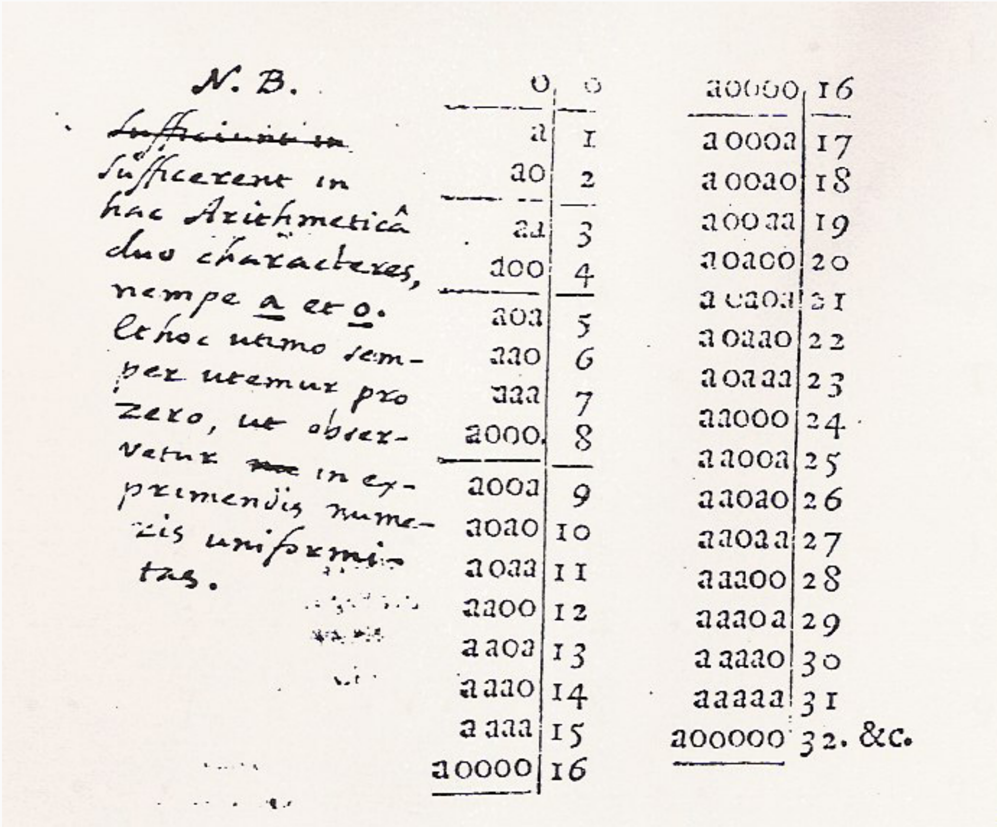
    come si può desumere dalla terza tabulazione indicata sopra

Nel *De Augmentis Scientiarum* (1623) Francis Bacon dimostrò come le lettere dell'alfabeto possano essere ridotte a sequenze di cinque caratteri scelti tra A e B (una specie di alfabeto Morse). Per esempio a era rappresentato come *AAAAA* . . .

come in Hariot, $2^4-1 = 15 < 26 < 2^5-1 = 31$

. . . . e aggiunse come il metodo potesse essere realizzato impiegando oggetti diversi "*provided those objects be capable of a twofold difference only*" .

La scoperta dell'aritmetica binaria: Caramuel 1670



N. B.

~~Sufficiunt in~~ Sufficerent in hac Arithmeticâ duo characteres, nempe a et o. Et hoc ultimo semper utemur pro zero, ut observetur in exprimendis numeris uniformitas.

o	o	aoooo	16
a	1	aoooa	17
ao	2	aooao	18
aa	3	aooaa	19
aoo	4	aoaoo	20
aoa	5	aoaoa	21
aao	6	aoaao	22
aaa	7	aoaaa	23
aooo	8	aaooo	24
aooa	9	aaooa	25
aoao	10	aaoao	26
aoaa	11	aaoaa	27
aaoo	12	aaaoo	28
aaoa	13	aaaoa	29
aaao	14	aaaao	30
aaaa	15	aaaaa	31
aoooo	16	aooooo	32. &c.

Johannes Caramuel

Meditatio Proemialis. Dalla: *Matesis Biceps Vetus et Nova*, 1670

("riscoperta" nel seminario di Vigevano nel 1969)

IOANNIS CARAMVELIS

MATHESIS BICEPS.

VETVS, ET NOVA.

I.	ARITHMETICA.	XXI.	LOGARITHMICA FLVENS.	
II.	אלגברא ALGEBRA.	XXII.	LOGARITHMICA REFLVENS.	
III.	GEOMETRIA GENERALIS.	XXIII.	COMBINATORIA.	
IV.	COSMOGRAPHIA.	XXIV.	KYBEIA: DE LVDIS.	
V.	GEODÆSIA.	XXV.	ARITHMOMANTICA.	
VI.	GEOGRAPHIA.	XXVI.	TRIGONOMETR. GENERALIS.	
VII.	CENTROSCOPIA.	XXVII.	TRIGONOMETR. RECVRRENS.	
VIII.	OROMETRIA.	XXVIII.	TRIGONOM. ASTRONOMICA.	
IX.	HYDROGRAPHIA.	XXIX.	ÆTHEREVS RECTANGVLVS.	
X.	HISTIODROMICA.	XXX.	ΔΙΑΒΗΤΗϹ. CIRCINVS.	
XI.	HYPOTHALATICA.	XXXI.	ARCHITECTVRA MILITARIS.	
XII.	NECTICA.	XXXII.	MVSICA.	
XIII.	NAVTICA SVBLVNARIS.	XXXIII.	METALLARIA.	
XIV.	NAVTICA ÆTHEREA.	XXXIV.	PEDARSICA.	
XV.	POTAMOGRAPHIA.	XXXV.	STATICA.	
XVI.	HYDRAVLICA.	XXXVI.	HYDROSTATICA.	
XVII.	AEROGRAPHIA.	XXXVII.	METEOROLOGIA.	
XVIII.	ANEMOMETRIA.	XXXVIII.	SPHOERICÆ	Planetarum Hypotheses.
XIX.	PTETICA.	XXXIX.	OSCILLATORIÆ	
XX.	SCIOGRAPHIA.	XL.	RECTILINEÆ	

IN OMNIBVS, ET SINGVLIS

Veterum, & Recentiorum Placita examinantur; interdum corriguntur, semper dilucidantur: & pleraque omnia Mathemata reducuntur speculativè & practicè ad facillimos, & expeditissimos Canones.

ACCEDENT ALII TOMI, VIDELICET:

ARCHITECTVRA RECTA, symmetrias à Veteribus traditas corrigens & exornans.

ARCHITECTVRA OBLIQVA, de quâ nemo scripsit hucusque. Est Ars sūmè necessaria, ut errores à Iunioribus passim admissi cognoscātur.

ARCHITECTVRA MILITARIS, Canones Artificum ingenio & captui attemperans, reducensque ad exquisitissimam facilitatem.

MVSICA, Vocalis, & Organica, rejectis Guidonis Aretini Mutationibus per viam liberam & expeditam Philomusos conducens.

ASTRONOMIA PHYSICA, multos Tractatus & Dissertationes de motibus Astrorum continens.

CAMPANIAE,

In Officinâ Episcopali Anno M.DC.LXX. *SVPERIORVM PERMISSV.*
Prostant Lugduni apud Laurentium Anisson.

N. B.

~~Sufficiunt in~~ Sufficerent in hac Arithmetica duo characteres, nempe a et o. Et hoc ultimo semper utemur pro Zero, ut observetur ~~...~~ in exprimendis numeris uniformitas.

0	0
a	1
ao	2
aa	3
aoo	4
aoa	5
aao	6
aaa	7
aooo	8
aooa	9
aoao	10
aoaa	11
aaoo	12
aaoa	13
aaao	14
aaaa	15
aoooo	16

aoooo	16
aoooa	17
aooao	18
aooaa	19
aoaoo	20
aoaoa	21
aoaao	22
aoaaa	23
aaooo	24
aaooa	25
aaoao	26
aaoaa	27
aaaoo	28
aaaoa	29
aaaao	30
aaaaa	31
aooooo	32. &c.

An, et cur Binaria Arithmetica sit rejicienda?

Hanc periodum ſtatim reprobaret aliquis tanquam nimis pauperem, quoniã ſæpe recurreret,& multiplicatis revolutionibus eſſet nimis moleſta. At hæc ratio non urget: quoniam, ſi in initio haberet aliquam veritatis imaginem, poſtea in progreſſu periodos haberet ſatis magnas. Nam,ſi ideò reprobandæ illæ veniãt, quòd nimis breves ſint; æquo, aut etiam potiori jure, communis Arithmetica reprobari deberet, nam habet periodos nimis longas. Coopteınus utramque, & qualibus communis paſſibus in finem Politicæ numerationis ſe præcipitet, conſideremus.

Cum Communi componitur, ut differentia clarius cognosci possit.

Revolutiones Arithmeticæ,

Binariæ. Diff.		*Communis.*	Diff.
	0	E 0	
<			> 1 H
	1	1	
1 <			> 9
	2	10	
2 <			> 90
	4	100	
4 <			> 900
	8	1,000	
D 8 <			> 9,000
	16	10,000	
16 <			> 90,000
	32	100,000	
H 32 <			> 900,000 G
	64	1000,000 F	

Et quis non videat ſtadia ab F ad E, & ab H

ÆQVISONANTIÆ MUSICAE.

Per quinquaginta Octavas descendentes.

Omnes hi Numeri sonant *Vt*: & notantur literâ C. &, si Cantum mollē à cæteris distinguere placeat, notabūtur literâ *F*.

Sed demonstrabit nostra Musica unicum esse tantummodo Cantum, et hunc à Molli ~~...~~ non nisi scriptione distingui.

1	0
2	1
4	2
8	3
16	4
32	5
64	6
128	7
256	8
512	9
1,024	10
2,048	11
4,096	12
8,192	13
16,384	14
32,768	15
65,536	16
131,072	17
262,144	18
524,288	19
1;048,576	20
2;097,152	21
4;194,304	22
8;388,608	23
16;777,216	24
33;554,432	25
67;108,864	26
134;217,728	27
268;435,456	28
536;870,912	29
1,073;741,824	30
2,147;483,648	31
4,294;967,296	32
8,589;934,592	33
17,179;869,184	34
34,359;738,368	35
68,719;476,736	36
137,438;953,472	37
274,877;906,944	38
549,755;813,888	39
1:099,511;627,776	40
2:199,023;255,552	41
4:398,046;511,104	42
8:796,093;022,208	43
17:592,186;044,416	44
35:184,372;088,832	45
70:368,744;177,664	46
140:737,488;355,328	47
281:474,976;710,656	48
562:949,953;421,312	49
1,125:899,906;842,624	50

N. B:

Illud Axioma. Sicut ~~longitud~~ Chorda ad Chordam sic Vox ad Vocem. si bene exponatur, est verum: quoniam Chordæ longitudo Vocis gravitatem (non acutiem) metitur: quam ob rem posset illud ad hæc verba reduci. In Chordis datur longitudo et Vocis gravitas. Hæ ita cohærent, ut quò major sit altera, erit et major altera: quò enim Chorda sit longior, eò Vox Chordæ debet esse profundior.

Si agatur de Vocis acutie debet esse inversa proportio, ut quantò longior sit Chorda, tantò minor sit Vocis acuties.

...do duo, pro tertio quatuor, et sic deinceps.

Quæritur. An illos equos Dimarsius habuerit vili pretio?

Respondeo, equum habere quatuor ferras, et in singulis 8 clavos: ergo in ~~...~~ omnibus clavos 32. Porrò in ~~numero~~ gradu 32. Tabula adjacens dat numerum 4,294;967,296. Tot ergo grana debuit Dimarsius solvere: adeoque argenteos 429;496,729 $\frac{6}{10}$: seu ducata ~~...~~ 42;949,672 $\frac{96}{100}$: quæ divisa per 100. equos, relinquit singulis pretium ducatorum 429,496 $\frac{7296}{10000}$: Ergo ex pacto Dimarsius quadringentis viginti novem millibus, quadringentis nonaginta sex ducatis ~~...~~ singulos equos emit.

tertiæ

Nervi, qui διὰ πασῶν

0	0. M.	aaab	41
a	1	aabo	42
b	2	aaba	43
ao	3. N.	aabb	44
aa	4	aboo	45
ab	5	aboa	46
bo	6	abob	47
ba	7	abao	48
bb	8	abaa	49
aoo	9. P	abab	50
aoa	10	abbo	51
aob	11	abba	52
aao	12	abbb	53
aaa	13	booo	54. &c.
aab	14	aoooo	81
abo	15	aoooa	82
aba	16	aoooc	83
abb	17	aooao	84
boo	18	aooaa	85
boa	19	aooae	86
bob	20	aooco	87
bao	21	aooca	88
baa	22	aooee	89
bab	23	aoaoo	90
bbo	24	aoaoa	91
bba	25	aoaoc	92. &c.
bbb	26	aooooo	243
aooo	27. Q.	aooooa	244
aooa	28	aooooc	245
aoob	29	aoooao	246
aoao	30	aoooaa	247
aoaa	31	aoooae	248
aoab	32	aoooco	249
aobo	33	aoooca	250
aoba	34	aoooce	251
aobb	35	aooaoo	252
aaoo	36	aooaoa	253
aaoa	37	aooaoc	254. &c.
aaob	38		
aaao	39		
aaaa	40		

N. B.

Calculus hic per ternas Unitates procedit. Primò enim numerat tres Unitates ab M. ad N. Posteà Ternarios ab N. ad P. et hinc ad Q. Ternariorum Ternarios. Et à Q ulterius Ternariorum Ternariorum Ternarios.

Posset et Arithmeticus, qui vellet per Ternarios procedere, imitari Astronomos, qui per sexagenas procedunt, et has, si simplices sint, primas vocant; et sexagenarum sexagenas vocant secundas: et sexagenarum sexagenarum sexagenas appellant tertias. Possent igitur simili modo Ternarios simplices vocare primos, Ternarios Ternariorum secundos, Ternarios Ternariorum Ternariorum tertios, etc.

Et hic loquendi modus etiam in aliis Arithmeticis et Numeris servari posset.

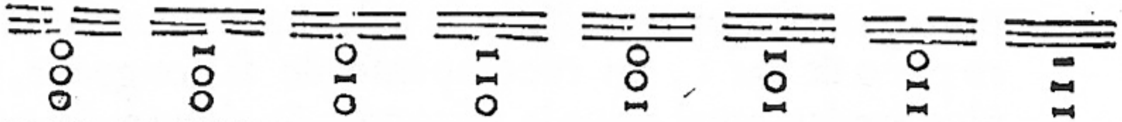
onem juvent, & antè suppositi fuerint, cujus-

Il saggio di Leibnitz: 1703

Explication de l'arithmétique binaire.

Gottfried Wilhelm von Leibnitz, 1703

res Lineaires qu'on lui attribue. Elles reviennent toutes à cette Arithmétique; mais il ſuffit de mettre ici *la Figure de huit Cova* comme on l'appelle, qui paſſe pour fondamentale, & d'y joindre l'explication qui eſt manifeſte, pourvû qu'on remarque premierement qu'une ligne entiere ——— ſignifie l'unité ou 1, & ſecondement qu'une ligne briſée — — ſignifie le zero ou 0.



0	1	10	11	100	101	110	111
0	1	2	3	4	5	6	7

EXPLICATION
DE L'ARITHMETIQUE
BINAIRE,

Qui ſe ſert des ſeuls caracteres 0 & 1 ; avec des Remarques ſur ſon utilité, & ſur ce qu'elle donne le ſens des anciennes figures Chinoiſes de Fohy.

PAR M. LEIBNITZ.

LE calcul ordinaire d'Arithmétique ſe fait ſuivant la progreſſion de dix en dix. On ſe ſert de dix caracteres, qui ſont 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, qui ſignifient zero, un, & les nombres ſuivans juſqu'à neuf incluſivement. Et puis allant à dix, on recommence, & on écrit *dix* ; par 10 ; & dix fois dix, ou *cent*, par 100 ; & dix fois cent, ou *mille*, par 1000 ; & dix fois mille, par 10000. Et ainſi de ſuite. 1703. 5. Mai.

Mais au lieu de la progreſſion de dix en dix, j'ai employé depuis pluſieurs années la progreſſion la plus ſimple de toutes, qui va de deux en deux ; ayant trouvé qu'elle ſert à la perfection de la ſcience des Nombres. Ainſi je n'y employe point d'autres caracteres que 0 & 1, & puis allant à deux, je recommence. C'eſt pourquoi *deux* s'écrit ici par 10, & deux fois deux ou *quatre* par 100 ; & deux fois quatre ou *huit* par 1000 ; & deux fois huit ou *ſeize* par 10000, & ainſi de ſuite. Voici *la Table des Nombres* de cette façon, qu'on peut continuer tant que l'on voudra.

On voit ici d'un coup d'œil la raiſon d'une *propriété célébre de la progreſſion Géométrique double* en Nombres entiers, qui porte que ſi on n'a qu'un de ces nombres de chaque degré, on en peut compoſer tous les autres nom-

TABLE DES NOMBRES.

0 0 0 0 0 0	0
0 0 0 0 0 1	1
0 0 0 0 10	2
0 0 0 0 11	3
0 0 0 100	4
0 0 0 101	5
0 0 0 110	6
0 0 0 111	7
0 0 1000	8
0 0 1001	9
0 0 1010	10
0 0 1011	11
0 0 1100	12
0 0 1101	13
0 0 1110	14
0 0 1111	15
0 10000	16
0 10001	17
0 10010	18
0 10011	19
0 10100	20
0 10101	21
0 10110	22
0 10111	23
0 11000	24
0 11001	25
0 11010	26
0 11011	27
0 11100	28
0 11101	29
0 11110	30
0 11111	31
100000	32
&c.	

bres entiers au-deſſous du double du plus haut degré. Car ici, c'eſt comme ſi on diſoit, par exemple, que 111 ou 7 eſt la ſomme de quatre, de deux & d'un.

100	4
10	2
1	1
111	7

Et que 1101 ou 13 eſt la ſomme de huit, quatre & un. Cette propriété ſert aux Eſſayeurs pour peſer toutes ſortes de maſſes avec peu de poids, & pourroit ſervir dans les monnoyes pour donner pluſieurs valeurs avec peu de piéces.

1000	8
100	4
1	1
1101	13

Cette expreſſion des Nombres étant établie, ſert à faire très-facilement toutes ſortes d'opérations.

Pour l'*Addition* par exemple. ↄ

110	6	101	5	1110	14
111	7	1011	11	10001	17
1101	13	10000	16	11111	31

Pour la *Souſtraction.*

1101	13	10000	16	11111	31
111	7	1011	11	10001	17
110	6	101	5	1110	14

Pour la *Multiplication.* ⊙

11	3	101	5	101	5
11	3	11	3	101	5
11		101		101	
11		101		1010	
1001	9	1111	15	11001	25

Pour la *Diviſion.*

15	⁎⁎11	∫	101	5
3	⁎⁎⁎1			
	⁎1			

Et toutes ces opérations ſont ſi aiſées, qu'on n'a jamais beſoin de rien eſſayer ni deviner, comme il faut faire dans la diviſion ordinaire. On n'a point beſoin non plus de rien apprendre par cœur ici, comme il faut faire dans le calcul ordinaire, où il faut ſçavoir, par exemple, que 6 & 7 pris enſemble font 13; & que 5 multiplié par 3 donne 15, ſuivant la Table d'*une fois un eſt un*; qu'on appelle Pythagorique. Mais ici tout cela ſe trouve & ſe prouve de ſource, comme l'on voit dans les exemples précédens ſous les ſignes ↄ & ⊙.

Un'altra divagazione: la comunicazione

Il fenomeno della crescita esponenziale ci permette di comunicare, purché il nostro alfabeto contenga almeno due caratteri.

Le sequenze binarie
lunghe n sono 2^n

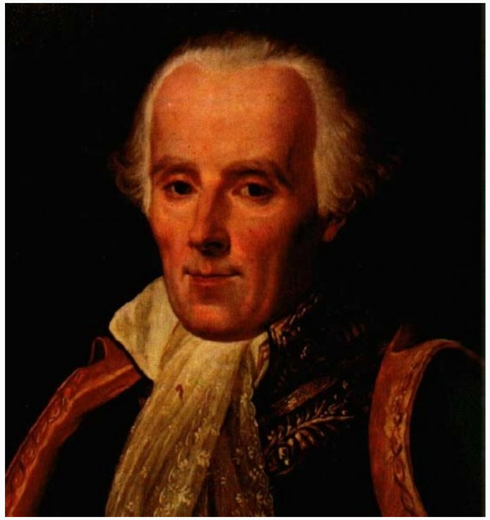
$2^3 = 8$

0 0 0
0 0 1
0 1 0
0 1 1
1 0 0
1 0 1
1 1 0
1 1 1

Le sequenze lunghe n costruite con
k caratteri sono lunghe sono k^n

Per esempio con i 26 dell'alfabeto
si possono costruire $26^3 > 17.000$ parole diverse

Dopo Leibnitz gli eventi binari furono studiati in matematica solo nel calcolo delle probabilità



Pierre-Simon de Laplace (1814)
Essay philosophique sur les probabilités

L' "esperimento" di Laplace

C C C C C C C C C C C C C C C C C C C C la di

C P P C C C P C P C P C C P P P C C P C

Regola crizione: ??

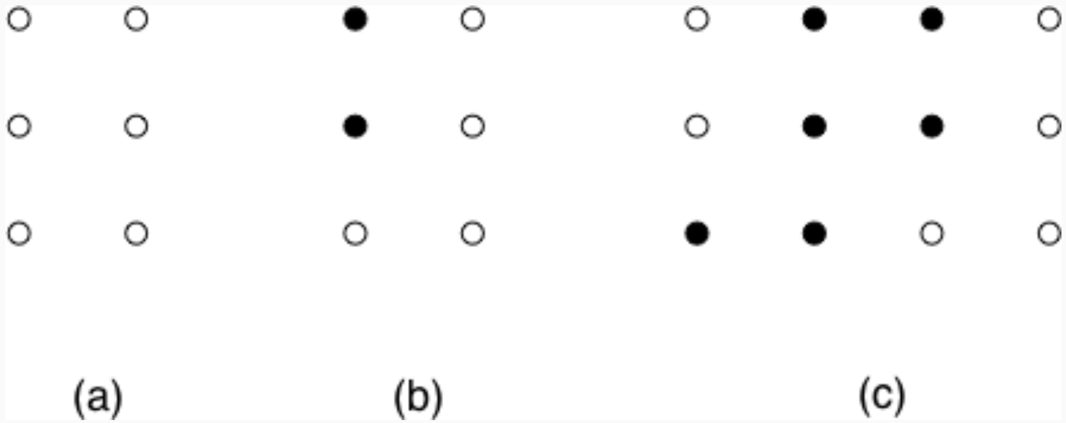
Eseguendo 20 lanci casuali di una moneta queste due sequenze hanno la stessa probabilità di apparire:

$$p = 1/2^{20} < 1/1.000.000$$

. . . . eppure le due sequenze ci appaiono molto diverse

Questo concetto condusse nella metà nel XX secolo a una nuova fondamentale definizione degli "eventi casuali" basata sulle proprietà delle sequenze anziché sulla casualità dlla sorgente

Luis Braille (1824): un codice binario sorprendente



(a) le posizioni dei sei punti

(b) la lettera b: i punti in rilievo sono in nero

(c) il numero 2, composto da un “segno numeri” seguito dalla lettera b.

Poi è arrivata l'informatica !

Il sapere contenuto in tutti i nostri documenti, scrittura, immagine o suono, si registra come un'immensa sequenza di caratteri di un alfabeto binario (bit) rappresentati per convenzione con 0 e 1 .

Le immagini sono rappresentate come insiemi di *pixel*, percepiti dall'occhio umano come forme continue. Una sequenza di 24 bit rappresenta il colore di un pixel.

0000 0000 0000 0000 0100 0000

rappresenta il colore blu di questa scritta

La reazione dell'uomo davanti al Braille non è diversa dalla reazione dei circuiti elettronici

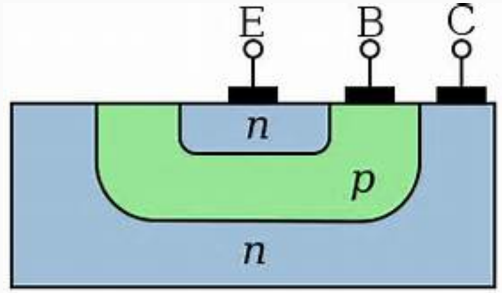
L'informazione è rappresentata in un circuito attraverso una sequenza *S* di tensioni o correnti elettriche, o attraverso le cariche di una serie di condensatori.

Più sono numerosi i "caratteri" impiegati, più è breve la sequenza *S*. Per esempio la rappresentazione di un numero in notazione decimale è lunga circa un terzo di quella in binario. Però:

La rapidità e la sicurezza di “interpretazione” di un carattere binario (presenza o assenza di corrente, ecc.) è talmente superiore a quella per qualsiasi altro “alfabeto”, da consentire una velocità di elaborazione assai più alta anche se le sequenze sono più lunghe.

Inoltre molti fenomeni fisici su cui si basa il calcolo hanno natura sostanzialmente binaria.

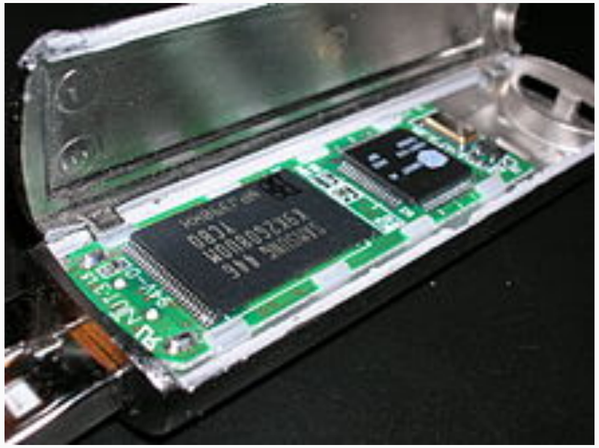
Brattain, Shockley e Bardeen
Premi Nobel per la Fisica, 1956
per l'ivenzione del transistor

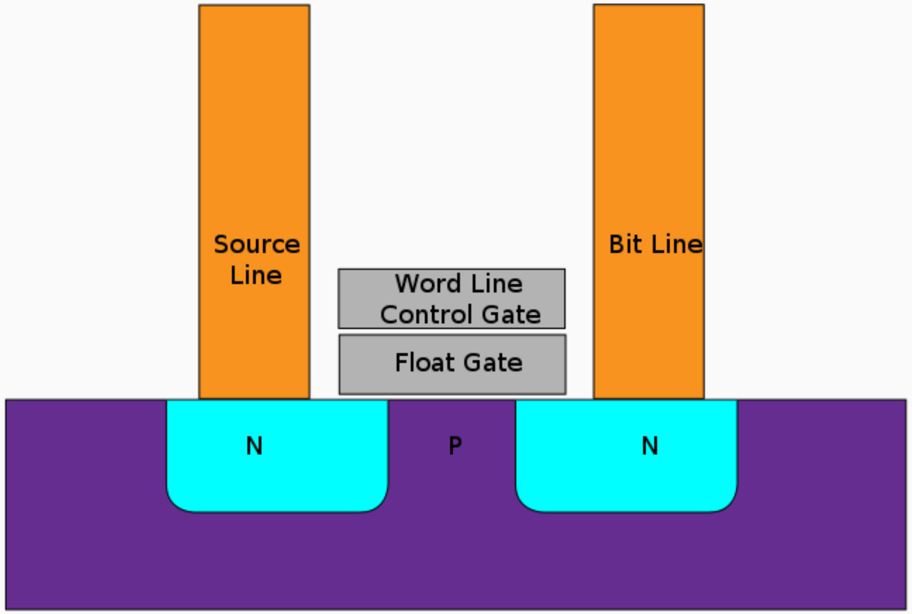


Oggi si costruiscono "chip" contenenti 10-20 miliardi di transistor con tecnologia 10-20 nm

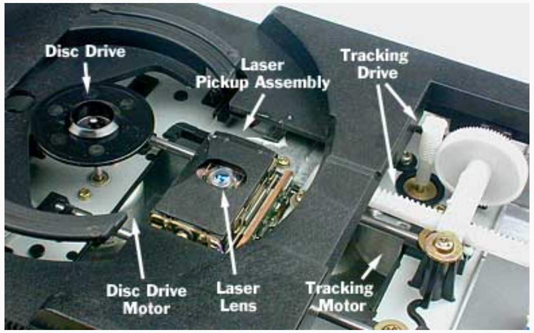
Con la stessa tecnologia si costruiscono i micro-condensatori per le memorie "volatili" (DRAM)

Le memorie *flash*





Inoltre molti fenomeni fisici su cui si basa il calcolo hanno natura sostanzialmente binaria.



Disco magnetico

DVD

Godfrey Harold Hardy

No one should ever be bored . . .
One can be horrified, or disgusted,
but one can't be bored