

## **fondamenti di sicurezza**

- requisiti di sicurezza
- crypto
  - glossario
  - cifratura asimmetrica
  - elaborazione messaggio
  - attacchi
- cifratura classica
  - cifratura simmetrica
- cifratura moderna

## requisiti di sicurezza

- Autenticità
- Segretezza dei dati
- **Confidenzialità** (controllo degli accessi)
- **Integrità dei dati**
- Non Ripudiabilità
- **Disponibilità**

## crypto

### glossario

- testo in chiaro (plaintext) - messaggio originale
- algoritmo di cifratura (cipher) – algoritmo che trasforma il testo in chiaro in testo cifrato
- testo cifrato (ciphertext) – messaggio codificato prodotto come output dall'algoritmo di cifratura: dipende dal testo in chiaro e dalla chiave
- chiave – usata come input dell'algoritmo di cifratura, valore indipendente dal testo in chiaro:
  - cifratura simmetrica (una sola chiave)
  - cifratura asimmetrica (chiave pubblica e chiave privata)
- algoritmo di decifratura – algoritmo che trasforma il testo cifrato in testo in chiaro, prende come input la chiave

### cifratura asimmetrica

chiave pubblica e privata

Un messaggio cifrato con una chiave pubblica  
può essere decifrato solo con la corrispondente chiave privata  
e/o viceversa  
un messaggio cifrato con una chiave privata  
può essere decifrato solo con la corrispondente chiave pubblica

segretezza

## + Cifratura asimmetrica: segretezza

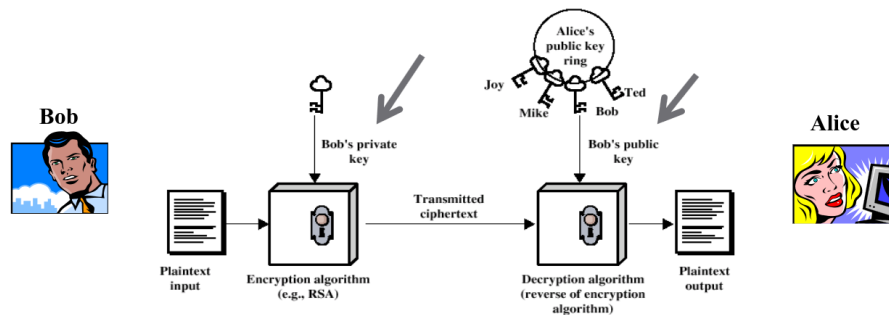
- Si vuole garantire che solo il destinatario legga il messaggio
  - Bob cifra il messaggio usando la chiave pubblica di Alice (destinatario)
  - Alice decifra il messaggio usando la propria chiave privata



autenticazione

## + Cifratura asimmetrica: autenticazione

- Si vuole garantire che il messaggio sia stato creato dal mittente (BoB)
  - Bob cifra il messaggio usando la propria chiave privata
  - Alice decifra il messaggio usando la chiave pubblica di Bob



### elaborazione messaggio

**block cipher** il plaintext viene suddiviso in blocchi di grandezza fissa ed ognuno di questi blocchi viene cifrato. Esempi:

- DES
- AES
- RSA

**stream cipher** viene cifrato un flusso continuo di dati un bit alla volta.

### attacchi

**crittoanalisi** sfrutta le caratteristiche dell'algoritmo e la conoscenza di testi in chiaro/testi cifrati per tentare di individuare la chiave o testo cifrato:

- ciphertext only
- known plaintext
- chosen plaintext

**brute force** si tenta ogni possibile chiave su un messaggio cifrato finché non si riesce ad ottenere una decifratura corretta (testo in chiaro)

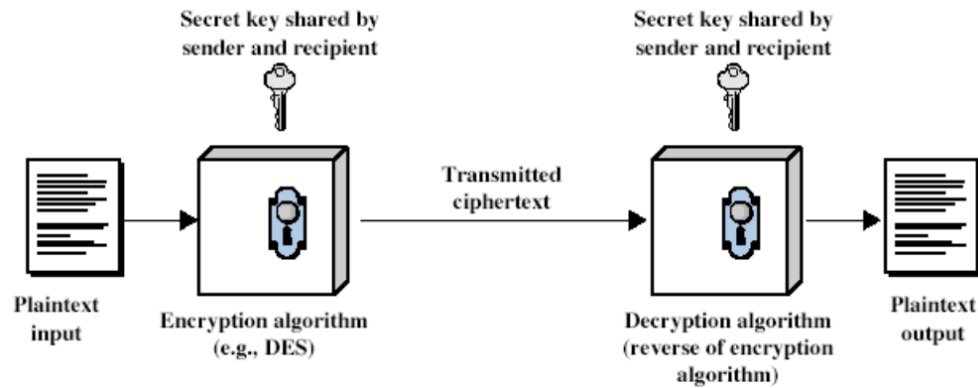
Key Size (bits)	Number of Alternative Keys	Time required at 1 decryption/ $\mu$ s	Time required at $10^6$ decryptions/ $\mu$ s
32	$2^{32} = 4.3 \times 10^9$	$2^{31} \mu$ s = 35.8 minutes	2.15 milliseconds
56	$2^{56} = 7.2 \times 10^{16}$	$2^{55} \mu$ s = 1142 years	10.01 hours
128	$2^{128} = 3.4 \times 10^{38}$	$2^{127} \mu$ s = $5.4 \times 10^{24}$ years	$5.4 \times 10^{18}$ years
168	$2^{168} = 3.7 \times 10^{50}$	$2^{167} \mu$ s = $5.9 \times 10^{36}$ years	$5.9 \times 10^{30}$ years
26 characters (permutation)	$26! = 4 \times 10^{26}$	$2 \times 10^{26} \mu$ s = $6.4 \times 10^{12}$ years	$6.4 \times 10^6$ years

**incondizionatamente sicuro** Indipendentemente dalla potenza computazionale a disposizione non è possibile risalire alla chiave, in quanto il testo cifrato non contiene informazioni sufficienti per determinare il testo in chiaro

**Computazionalmente sicuro** Non è possibile risalire alla chiave con le risorse computazionali attualmente a disposizione in un tempo utile per l'attacco (ad esempio il tempo necessario è maggiore del tempo d'utilizzo della chiave)

## cifratura classica

### cifratura simmetrica



### requisiti

- deve essere pubblico (la robustezza non deve dipendere dalla segretezza del codice dell'algoritmo)
- deve essere forte (resistente agli attacchi noti)
- Chiave segreta conosciuta solo dal mittente e dal ricevente:
  - $C = E(P, K)$
  - $P = D(C, K)$
- Necessità di un canale sicuro per distribuire la chiave

Tutti gli algoritmi di cifratura simmetrica si basano su due semplici operazioni:

- Sostituzioni → Es. BARBARA -> EDUEDUD
- Trasposizioni → Es. BARBARA -> ARBBARA

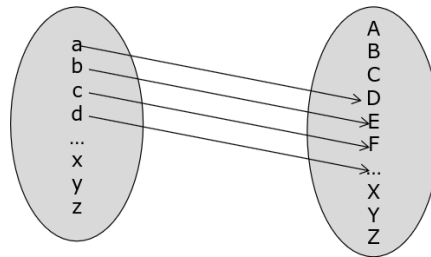
### sostituzione

**ceaser cipher** Sostituisce ogni lettera dell'alfabeto con la lettera che si trova a 3 posizioni di distanza

- Il cifrario di Cesare è un esempio di cifratura **monoalfabetica**



- Si utilizza un unico alfabeto (mapping) per le sostituzioni
- La chiave è la funzione sull'alfabeto che associa ad ogni lettera dell'alfabeto plaintext una lettera dell'alfabeto ciphertext.



39

anche se mappiamo ad ogni carattere del plaintext un arbitrario carattere nel ciphertext lo schema generato non è sicuro perché vulnerabile all'attacco delle frequenze.

- **Le sostituzioni monoalfabetiche non cambiano la frequenza relativa delle lettere**
- Si possono fare attacchi basati sul calcolo della frequenza delle lettere nel testo cifrato
- **Alternativa:** sostituire la stessa lettera con **più sostituti (omofoni)**, assegnati a rotazione o casualmente
  - se il numero di omofoni associati ad ogni lettera è proporzionale alla sua frequenza, allora si potrebbe celare la frequenza della singola lettera.

poligrammi   playfair

- Il testo in chiaro è sostituito due lettere alla volta (digramma)
- Ogni lettera ha più sostituti (omofoni), scelti in base al digramma d'appartenenza

- Algoritmo utilizza una matrice 5X5 di lettere:
  - Si inserisce la parola chiave (senza duplicati) da sinistra a destra e dall'alto verso il basso
  - Si riempie il resto della matrice con le rimanenti lettere dell'alfabeto
- Esempio usando la parola chiave MONARCHY

<b>M</b>	<b>O</b>	<b>N</b>	<b>A</b>	<b>R</b>
<b>C</b>	<b>H</b>	<b>Y</b>	B	D
E	F	G	I/J	K
L	P	Q	S	T
U	V	W	X	Z

Il testo in chiaro è sostituito due lettere alla volta:

- Se entrambe le lettere cadono nella **stessa riga**, si sostituiscono con le lettere che seguono a destra:  
esempio "ar" è cifrato come "RM"
- Se entrambe le lettere cadono nella **stessa colonna**, si sostituiscono con le lettere sottostanti:  
esempio "mu" è cifrato con "CM"

<b>M</b>	<b>O</b>	<b>N</b>	<b>A</b>	<b>R</b>
<b>C</b>	<b>H</b>	<b>Y</b>	B	D
E	F	G	I/J	K
L	P	Q	S	T
U	V	W	X	Z

Il testo in chiaro è sostituito due lettere alla volta:

- Se le lettere **non** sono nella **stessa riga/colonna**, ciascuna lettera viene sostituita con la lettera che si trova sulla stessa riga e nella colonna occupata dall'altra lettera in chiaro (**vertici della sottomatrice**):

esempio "hs" è cifrato con "BP", e "ea" con "IM" o "JM"

- La coppia di lettere doppie è tradotta separatamente aggiungendo una lettera di riempimento (ad. Esempio x):

esempio parola ballon viene trattata come ba lx lo on

<b>M</b>	<b>O</b>	<b>N</b>	<b>A</b>	<b>R</b>
<b>C</b>	<b>H</b>	<b>Y</b>	B	D
E	F	G	I/J	K
L	P	Q	S	T
U	V	W	X	Z

- Ogni lettera ha più sostituti (omofoni), scelti in base al digramma d'appartenenza (analisi della frequenza della singola lettera è più difficile)
  - AB -> BI o BJ
  - AO -> RN
  - AP -> OS
  - AQ -> NS
  - AL -> MS
  - ....
- La sicurezza è migliorata in quanto 26 lettere ci porta alla definizione di  $26 \times 26 = 676$  digrammi (individuazione singolo digramma più difficile)
- È stato considerato per lungo tempo molto sicuro (adottato dall'esercito inglese durante la prima guerra mondiale)
- ...ma mantiene ancora diverse informazioni sulla struttura del testo



## hill cipher

- Cifrario di Hill è un cifrario basato sull'algebra lineare

- Si assegna ad ogni lettera un valore numerico:

a b c d e f g h i j k l m n o p q r s t u v w x y z  
0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25

- Si sostituiscono n-grammi, modellati come vettori di n elementi

- Es. n=3, plaintext p= 'cat'  $p = \begin{pmatrix} 2 \\ 0 \\ 19 \end{pmatrix}$

- La chiave K è definita come una matrice invertibile di dimensione n x n. Es  $K = \begin{pmatrix} 2 & 4 & 1 \\ 1 & 3 & 2 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$

- La cifratura è il prodotto matriciale di K x p

$$\begin{pmatrix} 2 & 4 & 1 \\ 1 & 3 & 2 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 2 \\ 0 \\ 19 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2 \cdot 2 + 4 \cdot 0 + 1 \cdot 19 \\ 1 \cdot 2 + 3 \cdot 0 + 2 \cdot 19 \\ 1 \cdot 2 + 0 \cdot 0 + 0 \cdot 19 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 4 + 0 + 19 \\ 2 + 0 + 38 \\ 2 + 0 + 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 23 \\ 40 \\ 2 \end{pmatrix} \pmod{26}. \quad c = \begin{pmatrix} 23 \\ 14 \\ 2 \end{pmatrix}$$

- La decifratura è il prodotto matriciale di  $K^{-1} \times c$

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ \frac{2}{5} & \frac{-1}{5} & \frac{-3}{5} \\ \frac{-3}{5} & \frac{4}{5} & \frac{2}{5} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 23 \\ 40 \\ 2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \cdot 23 + 0 \cdot 40 + 1 \cdot 2 \\ \frac{2}{5} \cdot 23 + \frac{-1}{5} \cdot 40 + \frac{-3}{5} \cdot 2 \\ \frac{-3}{5} \cdot 23 + \frac{4}{5} \cdot 40 + \frac{2}{5} \cdot 2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2 \\ 0 \\ 19 \end{pmatrix}$$

$$K^{-1} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ \frac{2}{5} & \frac{-1}{5} & \frac{-3}{5} \\ \frac{-3}{5} & \frac{4}{5} & \frac{2}{5} \end{pmatrix}$$

## polialfabetico

- Idea base: si utilizzano diverse sostituzioni monoalfabetiche, in modo che ogni lettera del plaintext sia cifrata con un cifrario monoalfabetico diverso

- Ogni cifratura polialfabetica specifica:

- Un insieme di sostituzioni monoalfabetiche
- Come utilizzare la chiave per determinare quale sostituzione applicare

- Esempio di cifratura polialfabetica più noto: cifratura di Vigenère

## vigenere cipher

### ■ Vigenère cipher:

- Come insieme di sostituzioni monoalfabetiche si considerano 26 cifrari di Cesare (ottenuti con  $K=0,1,\dots,25$ )
- Regola: L'n-esima lettera della chiave indica quale alfabeto bisogna utilizzare per sostituire l'n-esima lettera del plaintext
- La chiave deve essere lunga quanto il plaintext.
  - La si ottiene ripetendo la chiave finché non è della lunghezza desiderata.

Key: test  
testtesttesttesttesttes

Plaintext:  
meetmeafterthetogaparty

Ciphertext:  
**FIWMFISYMIJMAILHZEHTKXQ**

	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p	q	r	s	t	u	v	w	x	y	z
a	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z
b	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	A
c	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	A	B
d	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	A	B	C
e	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	A	B	C	D
f	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	A	B	C	D	E
g	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	A	B	C	D	E	F
h	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	A	B	C	D	E	F	G
i	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	A	B	C	D	E	F	G	H
j	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	A	B	C	D	E	F	G	H	I
k	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
l	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
m	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
n	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
o	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
p	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
q	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
r	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
s	S	T	U	V	W	X	Y	Z	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R
t	T	U	V	W	X	Y	Z	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S
u	U	V	W	X	Y	Z	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T
v	V	W	X	Y	Z	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U
w	W	X	Y	Z	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V
x	X	Y	Z	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W
y	Y	Z	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X
z	Z	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y

## vigenere weakness

la chiave è ripetuta, quindi si riutilizzano più volte le sostituzioni monoalfabetiche corrispondenti alle lettere ripetute della chiave (analogo a many time pad)

### one time pad

- L'unico cifrario per cui è possibile dimostrare la sua sicurezza incondizionata.

A	B	A XOR B
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

- Utilizzo l'operatore XOR:

- proprietà XOR:

- $(A \text{ XOR } B) \text{ XOR } B = A$

- Le lettere del plaintext (bits) sono combinate in XOR con le corrispondenti lettere (bits) della chiave

- Cifratura:  $P \text{ XOR } K = C$

- Decifratura:  $C \text{ XOR } K = P$

- La chiave è lunga quanto il plaintext

- L'unico cifrario per cui è possibile dimostrare la sua sicurezza incondizionata.

- *Cifrario perfetto* - Teorema di Shannon. Claude E. Shannon, A Mathematical Theory of Communication, *Bell System Technical Journal* (July 1948)

- Ipotesi: la chiave deve essere casuale e lunga quanto il messaggio da cifrare

- La casualità della chiave garantisce che il ciphertext non mantenga informazioni sulle correlazioni interne presenti nel plaintext (i.e., frequenze di lettere, digrammi, etc.)

- Shannon dimostrò che questo tipo di cifrario è inviolabile anche da attacchi a forza bruta:

- Ad un ciphertext c possono corrispondere più plaintext m, utilizzando chiavi diverse

**drawbacks** → Generazione di chiave casuale AND Distribuzione della chiave, lunga quanto il messaggio

### trasposizione

- permutazione delle lettere nel testo in chiaro
- esse non vengono modificate
- la trasposizione non cambia la frequenza delle lettere utilizzate

### **rail fence (staccionata)**

- Il testo in chiaro viene scritto come una sequenza di diagonali e poi letto come una sequenza di righe

■ **Messaggio:** meet me after the toga party

- **Profondità due:**

```
m e m a t r h t g p r y  
e t e f e t e o a a t
```

- **Testo cifrato:**

```
MEMATRHTGPRYETEFETEOAAT
```

### **cifratura moderna**