

# Definizioni e Teoremi di Algebra (senza esempi)

Canale A-L

Anno accademico 2021/2022

## Contents

<b>1</b>	<b>Capitolo 1</b>	<b>8</b>
1.1	Corrispondenza . . . . .	8
1.2	Relazione in se . . . . .	8
1.3	Relazione/Corrispondenza inversa . . . . .	8
1.4	Relazione di equivalenza . . . . .	8
1.5	Relazione banale (di uguaglianza) . . . . .	8
1.6	Relazione caotica . . . . .	8
1.7	Classe di equivalenza . . . . .	8
1.8	Insieme quoziente . . . . .	9
1.9	Partizione insiemistica . . . . .	9
1.10	Funzione/Applicazione . . . . .	9
1.11	Iniettiva . . . . .	9
1.12	Suriettiva . . . . .	10
1.13	Biunivoca (biiettiva) . . . . .	10
1.14	Funzione caratteristica . . . . .	10
1.15	Operazione binaria . . . . .	10
1.16	Assiomi di Peano . . . . .	10
1.17	Principio del buon ordinamento di $\mathbb{N}$ . . . . .	11
1.18	Teor: Divisione con resto su $\mathbb{N}$ . . . . .	11
<b>2</b>	<b>Calcolo combinatorio</b>	<b>11</b>
2.1	Notazione funzionale . . . . .	11
2.2	Fattoriale crescente . . . . .	11
2.3	Fattoriale decrescente . . . . .	11
2.4	Pigeonhole principle (principio dei cassetti) . . . . .	11
2.5	Permutazione . . . . .	11
2.6	Coefficiente binomiale . . . . .	11
2.7	Formula . . . . .	12
2.8	Relazione ricorsiva . . . . .	12
2.9	Simmetria . . . . .	12
2.10	Relazione d'ordine . . . . .	12
2.11	Proposizione - Naturali e divisibilità . . . . .	12

2.12	POSET (Partial order set) . . . . .	12
<b>3</b>	<b>I numeri</b>	<b>13</b>
3.1	Costruzione di $\mathbb{Z}$ (interi) . . . . .	13
3.2	Definizione di $\mathbb{Z}$ . . . . .	13
3.3	Classi su $\mathbb{Z}$ . . . . .	13
3.4	Sottoinsiemi di $\mathbb{Z}$ . . . . .	13
3.5	Somma su $\mathbb{Z}$ . . . . .	13
3.6	Prodotto su $\mathbb{Z}$ : . . . . .	13
3.7	Proprietà operazioni su $\mathbb{Z}$ . . . . .	13
3.8	Divisibilità . . . . .	14
3.9	Multiplo . . . . .	14
3.10	Associati . . . . .	14
3.11	Unità . . . . .	14
3.12	Irriducibile . . . . .	14
3.13	Primo . . . . .	14
3.13.1	Proposizione: in $\mathbb{Z}$ , $a$ è primo $\Rightarrow a$ irriducibile . . . . .	14
3.13.2	Proposizione: in $\mathbb{Z}$ $a$ irriducibile $\Rightarrow a$ primo . . . . .	15
3.14	Massimo comune divisore . . . . .	15
3.14.1	Teor: Esistenza del MCD tra due numeri . . . . .	15
3.14.2	Prop: se $c a$ e $c b$ allora $c$ divide ogni combinazione lineare di $a$ e $b$ . . . . .	16
3.15	Proposizione . . . . .	16
3.15.1	Lemma $MCD(m, m+1)=1$ . . . . .	16
3.16	Algoritmo di Euclide . . . . .	16
3.16.1	Lemma1: L'algoritmo termina . . . . .	16
3.16.2	Lemma2: Se $a = bq + r$ $MCD(a, b) = MCD(b, r)$ . . . . .	17
3.16.3	Corollario: $MCD(a, b) = MCD(r_n, 0) = r_n$ . . . . .	17
3.16.4	Lemma3 . . . . .	17
3.17	Coprimi . . . . .	17
3.17.1	Osservazione1 . . . . .	17
3.17.2	Osservazione 2 . . . . .	17
3.17.3	Proposizione 1 . . . . .	17
3.17.4	Proposizione 2 . . . . .	17
3.18	Equazione diofantea . . . . .	18
3.18.1	Teor: Soluzione equazione diofantea . . . . .	18
3.19	Teorema fondamentale dell'aritmetica . . . . .	18
3.19.1	Osservazione 1 . . . . .	18
3.19.2	Osservazione 2 . . . . .	18
3.19.3	Dimostrazione esistenza . . . . .	18
3.20	Dimostrazione unicità . . . . .	19
3.21	Teor. Euclide - Esistenza infiniti primi . . . . .	19

<b>4</b>	<b>Congruenze</b>	<b>20</b>
4.1	Congruenza modulo $n$	20
4.2	Proposizione	20
4.3	Quoziente	20
4.4	Proposizione - Resto	20
4.5	Osservazione	21
4.6	Proposizione somma	21
4.7	Dimostrazione prodotto	21
4.8	Proposizione - Invertibilità	21
4.9	Classi resto invertibili	22
4.10	Teorema Uguaglianza sbagliata	22
4.10.1	Grande teorema di Fermat	23
4.10.2	Piccolo teorema di Fermat	23
4.11	Teorema Eulero-Fermat	24
4.12	Corollario	24
<b>5</b>	<b>Polinomi a coefficienti reali in 1 indeterminata</b>	<b>25</b>
5.1	Descrizione	25
5.2	Somma di polinomi	25
5.3	Rappresentazione come successioni	25
5.3.1	Somma di polinomi	25
5.4	Teorema: $(\mathbb{R}[x], +)$ è un gruppo (commutativo)	25
5.5	Prodotto di polinomi	26
5.6	Teorema $(\mathbb{R}, +, \cdot)$ è un anello	26
5.7	Grado del prodotto	26
5.8	Fatti importanti	26
<b>6</b>	<b>Strutture algebriche</b>	<b>27</b>
6.1	Gruppo	27
6.2	Gruppo commutativo (abeliano)	27
6.3	Anello	27
6.3.1	Anello commutativo	27
6.3.2	Anello unitario	27
6.3.3	Divisore dello zero	27
6.3.4	Dominio di integrità	28
6.3.5	Legge di annullamento del prodotto	28
6.4	Campo	28
6.5	Semigrupp	28
6.5.1	Monoide	28
6.6	Elenco gruppi	28
6.7	Gruppo simmetrico	29
6.7.1	Permutazione	29
6.7.2	$S_n$	29
6.7.3	Proposizione	29
6.7.4	Proposizione	29
6.7.5	$3^a$ notazione: Permutazione come prodotto di cicli disgiunti	29

6.7.6	Orbita . . . . .	29
6.7.7	Proposizione . . . . .	30
6.7.8	Permutazione ciclica . . . . .	30
6.7.9	Teorema prodotto di scambi . . . . .	30
6.7.10	Teorema parità . . . . .	30
6.7.11	Pari, dispari . . . . .	30
6.7.12	Gruppo alterno . . . . .	30
6.7.13	Segno . . . . .	30
6.8	Classi coniugate in $S_n$ . . . . .	31
6.8.1	Definizione . . . . .	31
6.8.2	Proposizione . . . . .	31
6.9	Definizione multinsieme . . . . .	31
6.10	Gruppi finiti . . . . .	31
6.10.1	Proprietà 1 . . . . .	31
6.10.2	Proprietà 2 . . . . .	31
6.11	Sottogruppi . . . . .	32
6.11.1	Definizione . . . . .	32
6.11.2	Criteri di verifica . . . . .	32
6.11.3	Notazione . . . . .	32
6.11.4	Proposizione . . . . .	33
6.12	Proposizione: intersezione di sottogruppi . . . . .	33
6.13	Proposizione 1 . . . . .	34
6.14	Proposizione 2 . . . . .	34
<b>7</b>	<b>Sottogruppo generato</b>	<b>34</b>
7.1	Definizione . . . . .	34
7.2	Notazione . . . . .	34
7.3	Proposizione . . . . .	34
7.4	$\langle X \rangle$ è il più piccolo sottogruppo che contiene $X$ . . . . .	34
7.5	Definizione: ordine (periodo) . . . . .	35
7.6	Definizione: gruppo ciclico . . . . .	35
7.7	Proposizione . . . . .	35
7.8	Proposizione . . . . .	35
7.9	Proposizione: sottogruppi di un gruppo ciclico . . . . .	36
7.10	Osservazione . . . . .	36
7.11	Proposizione . . . . .	36
7.12	Proposizione - Generatori gruppo ciclico . . . . .	36
7.13	Teorema di Lagrange . . . . .	36
7.13.1	Corollario 1 . . . . .	37
7.13.2	Corollario 2 . . . . .	37
7.14	Definizione: indice di un sottogruppo . . . . .	37

<b>8</b>	<b>Classi laterali di un sottogruppo</b>	<b>38</b>
8.1	Definizione: congruenza destra modulo . . . . .	38
8.2	Proposizione . . . . .	38
8.3	Insieme quoziente . . . . .	38
8.4	Proposizione . . . . .	39
8.5	Definizione: congruenza sinistra modulo . . . . .	39
<b>9</b>	<b>Omomorfismi</b>	<b>40</b>
9.1	Isomorfismo . . . . .	40
9.2	Omomorfismo . . . . .	40
9.3	Epimorfismo . . . . .	40
9.4	Monomorfismo . . . . .	40
9.5	Isomorfismo 2 . . . . .	40
9.6	Proposizione . . . . .	40
9.7	Kernel/Nucleo . . . . .	40
9.8	Proposizione . . . . .	41
9.9	Omomorfismo di anelli . . . . .	41
9.10	Proposizione . . . . .	42
9.11	Proposizione . . . . .	42
<b>10</b>	<b>Spazi Vettoriali</b>	<b>43</b>
10.1	Definizione spazio vettoriale . . . . .	43
10.2	Scalare . . . . .	43
10.3	Sottospazio vettoriale . . . . .	44
10.4	Proposizione . . . . .	44
10.5	Definizione: traccia . . . . .	44
10.6	Definizione: combinazione lineare . . . . .	45
10.7	Proprietà di calcolo negli spazi vettoriali . . . . .	45
10.8	Definizione . . . . .	45
10.9	Osservazione: combinazione lineare banale . . . . .	45
10.10	Definizione: linearmente dipendente . . . . .	45
10.11	Osservazione . . . . .	45
10.12	Osservazione: linearmente indipendente . . . . .	46
10.13	Osservazione . . . . .	46
10.14	Osservazione . . . . .	46
10.15	Osservazione . . . . .	46
10.16	Sottospazio generato da: span . . . . .	46
10.17	Proposizione . . . . .	46
10.18	Sistema di generatori . . . . .	47
10.19	Basi di spazi vettoriali . . . . .	47
10.20	Spazio finitamente generato . . . . .	47
10.21	Proposizione . . . . .	47
10.22	N-upla delle coordinate di $v$ in base $B$ . . . . .	48
10.23	Corollario . . . . .	48
10.24	Teorema: esistenza di una base . . . . .	48
10.25	Proposizione . . . . .	48

10.26	Dimensione di $V$	48
10.27	Osservazione (notazione)	48
10.28	Teorema del completamento di una base	48
10.29	Teorema	48
10.30	Corollario	49
10.31	Osservazioni	49
10.32	Somma di sottospazi	49
10.33	Proposizione	50
10.34	Teorema di Grossman	50
10.35	Somma diretta di sottospazi	50
10.36	Proposizione	50
<b>11</b>	<b>Sistemi di equazioni lineari</b>	<b>51</b>
11.1	Scrittura	51
11.2	Risolvere sistema di equazioni	51
11.3	Sistemi equivalenti	51
11.3.1	Operazioni elementari di riga	51
11.4	Equivalenza per riga	51
11.5	Proposizione	51
11.6	Proposizione	52
11.7	Matrice identica	52
11.8	Corollario	52
11.9	Teorema	52
11.10	Rango	52
11.11	Pivot	52
11.12	Rango pieno	52
11.13	Proposizione: proprietà del rango	53
11.14	Teorema: Rouchè-Capelli	53
<b>12</b>	<b>Studio dei sistemi omogenei</b>	<b>54</b>
12.1	Proposizione	54
12.2	Teorema: Struttura sulle soluzioni di un sistema	54
12.3	Nota importante	54
<b>13</b>	<b>Applicazioni lineari</b>	<b>55</b>
13.1	Definizione: applicazione lineare (trasformazione lineare o homomorphism of vector space)	55
13.2	Proposizione	55
13.3	Definizione	55
13.4	Definizione	56
13.5	Proposizione (risolvere per esercizio)	56
13.6	Osservazione (!)	56
13.7	Proposizione	56
13.8	Corollario	57
13.9	Corollario	57
13.10	Definizione: rango trasformazione lineare	57

13.11	Teorema della dimensione	57
13.12	Osservazione	58
13.13	Proposizione	58
13.14	Conseguenze della proposizione	59
13.15	Osservazione: iniettività, suriettività	59
13.16	Osservazione: isomorfismo	59
13.17	Esempio isomorfismo	60
13.18	Teorema	60
13.19	Osservazione	61
13.20	Proposizione: ricapitolazione sulle matrici invertibili	61
13.21	Determinante di una matrice quadrata	61
13.21.1	Sistemi $AX = \underline{0}$	62
13.21.2	$n = 1$	62
13.21.3	$n = 2$	62
13.21.4	$n = 3$	62
13.21.5	Definizione determinante	62
13.21.6	Proprietà del determinante	63
13.21.7	Teorema di Binet	63
13.21.8	Corollario di Binet	64
13.21.9	Teorema di Laplace	64
13.21.10	Metodo alternativo calcolo determinante	64
13.22	Cambiamento di base	65
13.23	Def: Matrice associata a una trasformazione lineare $T$	68
13.24	Proposizione	68
13.25	Definizione: matrice simile	69
13.26	Proposizione	69
13.27	Proposizione	69
13.28	$\mathcal{M}_n(\mathbb{R})/\sim$ quoziente modulo la similitudine)	69
13.29	Definizione	69
13.30	Osservazione	70
13.31	Proposizione	70
13.32	Diagonalizzazione di una matrice	71
13.33	Polinomio caratteristico	71
13.34	Proposizione	71
13.35	Proprietà del polinomio caratteristico	72
13.36	Corollario	72
13.37	Definizioni	72
13.38	Teorema	73
<b>14</b>	<b>Usi di Gauss-Jordan in vari ambiti</b>	<b>74</b>
14.1	Risolvere $AX = b$	74
14.2	Rango e base $Im L_A$	74
14.3	Trovare $Ker(L_A) = Ker A$	74
14.4	Estrazione insieme di vettori indipendenti	74
14.5	Completamento a un base di $\mathbb{R}$	74
14.6	Trovare base di $U + W$ e $U \cap W$	75

# 1 Capitolo 1

Relazione e corrispondenza sono interscambiabili.

## 1.1 Corrispondenza

Una corrispondenza  $\rho$  di  $X$  in  $Y$  è una terna  $(\rho, X, Y)$  dove  $\rho \subseteq X \times Y$ .

## 1.2 Relazione in se

Una Relazione di  $X$  in se, è una corrispondenza  $\rho$  di  $X$  in  $X$ . Se  $(x, y) \in \rho$  si scrive anche  $x\rho y$  (notazione infissa), cioè  $x$  è in relazione  $\rho$  con  $y$ .

## 1.3 Relazione/Corrispondenza inversa

Una corrispondenza  $\rho$  di  $X$  in  $Y$  è la relazione di  $Y$  in  $X$  denotata con  $\rho^{-1}$  data dalla seguente:

$$y\rho^{-1}x \Leftrightarrow x\rho y$$

## 1.4 Relazione di equivalenza

una relazione su  $A$  (cioè un sottoinsieme  $\rho$  di  $A \times A$ ) si dice di equivalenza se verifica le tre seguenti proprietà:

*Riflessiva:*  $\forall a \in A, a\rho a$ .

*Simmetrica:*  $\forall a, b \text{ in } A, a\rho b \Rightarrow b\rho a$

*Transitiva:*  $\forall a, b, c \in A \text{ se } (a\rho b \wedge b\rho c) \Rightarrow a\rho c$

## 1.5 Relazione banale (di uguaglianza)

Su  $A$   $x, y \in A$   $x\rho y \Leftrightarrow x = y$

## 1.6 Relazione caotica

Su  $A$   $x\rho y \forall x, y \in A$

## 1.7 Classe di equivalenza

Data la relazione  $\rho$  in  $A$ , si definisce classe di equivalenza modulo  $\rho$  di un elemento  $a \in A$  l'insieme di tutti gli elementi che sono equivalenti ad  $a$ ; si denota con  $[a]_\rho$ .

$$[x]_\rho := \{y \in A : y\rho x\}$$



## 1.8 Insieme quoziente

Data la relazione di equivalenza  $\rho$  su  $A$ , si definisce insieme quoziente l'insieme delle classi di equivalenza di  $\rho$  dato  $x \in A$  si denota con  $A/\rho$ .

$$A/\rho = \{[x]_\rho : x \in A\}$$

Nota: Relazione di equivalenza e partizioni insiemistiche sono sostanzialmente la stessa cosa.

## 1.9 Partizione insiemistica

Una partizione insiemistica di  $A$  è una famiglia di sottoinsiemi di  $A$  non vuoti, tali che ad ogni elemento di  $A$  corrisponde un solo sottoinsieme.

$$H = \{A_i : i \in I\}$$

con

$$A_i \subseteq A \quad \forall i \in I$$

con

$$i \neq j, \quad i, j \in I \Leftrightarrow A_i \cap A_j = \emptyset$$

che equivale a dire:

$$\cup_{i \in I} A_i = A$$

cioè la famiglia  $H$  ricopre  $A$ .

## 1.10 Funzione/Applicazione

$f : S \rightarrow T$  è un'applicazione di  $S$  in  $T$  se  $(f, S, T)$  è una corrispondenza di  $S$  in  $T$ , ovvero  $f \subseteq S \times T$  che soddisfa la seguente proprietà:

$\forall x \in S \exists ! y$  in  $T$  denotato con  $y = f(x)$ ,  $f$  è una legge univoca (ben definita).

L'elemento  $f(x)$  si chiama **immagine dell'elemento**.

**L'immagine di  $f$**  è un sottoinsieme del codominio  $T$  definito da:

$$Im(f) := \{y \in T : \exists x \in S, y = f(x)\}$$

**Controimmagine di  $y$**  è il sottoinsieme di  $S$  del dominio definito da:

$$f^{-1}(y) := \{x \in S : f(x) = y\} \subseteq S$$

## 1.11 Iniettiva

$f$  è iniettiva  $\Leftrightarrow \forall x, x' \in S : [f(x) = f(x') \Rightarrow x = x']$ .

*Definizione alternativa:*  $f$  è iniettiva  $\Leftrightarrow \forall x, x' \in S : [f(x) \neq f(x') \Rightarrow x \neq x']$ .

$f$  è iniettiva  $\Leftrightarrow \forall y \in T \quad |f^{-1}| \leq 1$ , ovvero per ogni elemento  $y$  in  $T$  esiste al più un'immagine.

### 1.12 Suriettiva

$f$  è suriettiva se  $\Rightarrow \forall y \in T \exists x \in S : f(x) = y$

*Definizione alternativa:*  $f$  è suriettiva  $\Leftrightarrow f(S) = Im(S) = T$ .

$f$  è suriettiva  $\Leftrightarrow \forall y \in T |f^{-1}(y)| \geq 1$ , ovvero per ogni elemento  $y$  in  $T$  esiste almeno un'immagine.

### 1.13 Biunivoca (biiettiva)

se  $f$  è sia iniettiva che suriettiva.

$f$  è biiettiva  $\Leftrightarrow \forall y \in T |f^{-1}(y)| = 1$ , ovvero per ogni elemento  $y$  in  $T$  esiste una sola immagine.

### 1.14 Funzione caratteristica

E' la funzione che vale 1 se  $x \in S$ , 0 se  $x \notin S$ .

### 1.15 Operazione binaria

Un'operazione binaria su  $S$ , è un'applicazione  $m : S \times S \rightarrow S$ ; notazione funzionale  $(s, s') \mapsto m(s, s')$ ; notazione infissa  $sm s'$  o  $s * s$ .

### 1.16 Assiomi di Peano

per la costruzione dei naturali  $\mathbb{N}$

1. I numeri formano una classe
2. Lo "zero" è un numero
3. Se  $a$  è un numero allora il successore  $a'$  è un numero
4. Se  $a \neq b$  sono due numeri allora  $a' \neq b'$
5. Lo "zero" non è successore di nessun numero ( $\nexists a$  numero tale che  $zero = a'$ )
6. Assioma di induzione:  
Se  $S$  è una classe di numeri tale che:
  - $zero \in S$
  - Se  $a \in S$  allora  $a' \in S$

allora ogni naturale è in  $S$ .

I naturali sono la più piccola classe che

- Contiene lo zero
- Chiusa rispetto a contenere i successori

### 1.17 Principio del buon ordinamento di $\mathbb{N}$

Se  $S \subseteq \mathbb{N}, S \neq \emptyset$ , allora esiste un minimo in  $S$ , cioè esiste  $m \in S$  tale che se  $h \in \mathbb{N}, h < m$  allora  $h \notin S$ .

### 1.18 Teor: Divisione con resto su $\mathbb{N}$

Siano  $a, b \in \mathbb{N}, b \neq 0$ ; allora esistono  $q, r \in \mathbb{N}$  tali che

- $a = bq + r$
- $0 \leq r < b$

$\forall a, b \in \mathbb{Z}, b \neq 0; \exists$  unici  $q, r \in \mathbb{Z}$  con  $a = bq + r \wedge 0 \leq r < b$  TODO: Dimostrazione

## 2 Calcolo combinatorio

### 2.1 Notazione funzionale

Insieme delle applicazioni da A verso B

$$B^A = \{f : A \rightarrow B\}$$

### 2.2 Fattoriale crescente

$$n^{(m)} := n * (n + 1) * \dots * (n + m - 1)$$

### 2.3 Fattoriale decrescente

$$n_{(m)} := n * (n - 1) * \dots * (n - m + 1)$$

### 2.4 Pigeonhole principle (principio dei cassetti)

Se ho  $n$  oggetti e  $m$  cassetti, se  $n > m$  e devo disporre tutti gli oggetti nei cassetti allora esiste un cassetto che contiene almeno due oggetti.

### 2.5 Permutazione

Sia A un insieme. Una biiezione  $f : A \rightarrow A$  si chiama anche *permutazione* di A.

### 2.6 Coefficiente binomiale

**Prima interpretazione combinatoria:**  $\binom{n}{i}$  è il coefficiente di  $x^i y^{n-i}$  nello sviluppo  $(x + y)^n = \sum_{z_i \in \{x, y\}} z_1 \dots z_n$ , ovvero il numero di stringhe binarie (su x, y)

- lunghe n
- con i occorrenze di x

- con  $n-i$  occorrenze di  $y$
- $(x + y)^n = \sum_{i=0}^n \binom{n}{i} x^i y^{n-i}$

**Seconda interpretazione combinatoria:** numero di sottoinsiemi di cardinalità  $i$  su un insieme  $[n]$  di cardinalità  $n$ .

## 2.7 Formula

$$\binom{n}{i} = \frac{n(n-1) * \dots * (n-i+1)}{i!} = \frac{n!}{i!(n-i)!}$$

## 2.8 Relazione ricorsiva

$$\binom{n}{i} = \binom{n-1}{i-1} + \binom{n-1}{i}$$

Dimostrazioni algebrica e combinatoria.

## 2.9 Simmetria

$$\binom{n}{i} = \binom{n}{n-i}$$

Il coefficiente binomiale è simmetrico rispetto al centro della riga  $n$ -esima  $\lfloor \frac{n}{2} \rfloor$  del triangolo rappresentante tutti i coefficienti del coefficiente binomiale.

Dimostrazioni algebrica e combinatoria.

## 2.10 Relazione d'ordine

Una relazione  $\rho$  su  $X$  è una relazione d'ordine (o un ordine, o un ordinamento) se valgono per  $\rho$  le proprietà:

- (R)  $\forall x, x\rho x$
- (AS)  $\forall x, y (x\rho y \wedge y\rho x) \Rightarrow x = y$
- (T)  $\forall x, y, z (x\rho y \wedge y\rho z) \Rightarrow x\rho z$

## 2.11 Proposizione - Naturali e divisibilità

$(\mathbb{N}, |)$  l'insieme dei naturali con la divisibilità è un insieme parzialmente ordinato. (La divisibilità è una relazione d'ordine su  $N^*$ ).

TODO: Dimostrazione R, AS, T

## 2.12 POSET (Partial order set)

Un insieme munito di una relazione d'ordine si dice parzialmente ordinato.

### 3 I numeri

#### 3.1 Costruzione di $\mathbb{Z}$ (interi)

Partendo da  $\mathbb{N}$ : prendiamo su  $\mathbb{N} \times \mathbb{N}$  la relazione  $\rho$  definita sulle coppie  $(n, m) \in \mathbb{N} \times \mathbb{N}$  tale che  $(n, m)\rho(n', m') \Leftrightarrow n + m' = m + n'$

#### 3.2 Definizione di $\mathbb{Z}$

$$\mathbb{Z} = \mathbb{N} \times \mathbb{N} / \rho$$

#### 3.3 Classi su $\mathbb{Z}$

$\overline{(0, 0)}$  zero  
 $\overline{(m, 0)}, m > 0$  positivi  
 $\overline{(0, n)}, n > 0$  negativi

#### 3.4 Sottoinsiemi di $\mathbb{Z}$

$$\mathbb{Z} = \mathbb{Z}^{>0} \cup \{0, 0\} \cup \mathbb{Z}^{<0}$$

#### 3.5 Somma su $\mathbb{Z}$

$$\overline{(n, m)} + \overline{(n', m')} = \overline{(n + n', m + m')}$$

#### 3.6 Prodotto su $\mathbb{Z}$ :

$$\overline{(n, m)} \cdot \overline{(n', m')} = \overline{(nn' + mm', nm' + mn')}$$

#### 3.7 Proprietà operazioni su $\mathbb{Z}$

$\forall a, b, c \in \mathbb{Z}$  ( $a, b, c$  coppie  $\overline{(n, m)}$ ) valgono le seguenti:

1. Associatività:  $(a + b) + c = a + (b + c)$
2. Commutatività:  $a + b = b + a$
3. Esiste uno *zero* per la somma, cioè un elemento  $0 : a + 0 = 0 + a = a$
4.  $\forall a \in \mathbb{Z}$  esiste un elemento detto *opposto*, denotato con  $-a$ , cioè un elemento tale che:  $a + (-a) = (-a) + a = 0$ .  
 $a = \overline{(n, m)}$   
 $-a = \overline{(m, n)}$
5. Associatività prodotto:  $a \cdot (b \cdot c) = (a \cdot b) \cdot c$
6. Commutatività prodotto:  $a \cdot b = b \cdot a$

7. Esiste un *elemento neutro* per il prodotto, "1", cioè un numero in  $\mathbb{Z}$  tale che:

$$a \cdot 1 = 1 \cdot a = a$$

$$\overline{(n, m)} \cdot \overline{(1, 0)} = \overline{(n, m)}$$

8. Distributività del prodotto sulla somma:

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

### 3.8 Divisibilità

Dati  $a, b \in \mathbb{Z}$  si dice che  $a$  divide  $b$ , e si indica  $a|b$ , se e solo se  $\exists c \in \mathbb{Z}$  tale che  $b = a \cdot c$  (ovvero  $a|b \Leftrightarrow \exists c \in \mathbb{Z} : b = a \cdot c$ ).

La divisibilità è una relazione sugli interi:

### 3.9 Multiplo

Se  $a|b$  diremo che  $b$  è un multiplo di  $a$ .

### 3.10 Associati

$a, b$  sono associate se  $a|b$  e  $b|a$

*Oss1:* in  $\mathbb{N}^*$  sono associati  $\Leftrightarrow a = b$ .

*Oss2:* in generale, in  $\mathbb{Z} \Leftrightarrow a = b$  oppure  $a = -b$ .

### 3.11 Unità

In  $\mathbb{Z}$  sono  $+1$  e  $-1$ .

### 3.12 Irriducibile

Un elemento  $a \in \mathbb{Z}$ ,  $a \neq 0$  è irriducibile se  $a = b \cdot c \Rightarrow b$  oppure  $c$  sono unità.

### 3.13 Primo

Un elemento  $a \in \mathbb{Z}$  si dice primo se:

$$a|b \cdot c \Rightarrow a|b \text{ oppure } a|c$$

#### 3.13.1 Proposizione: in $\mathbb{Z}$ , $a$ è primo $\Rightarrow a$ irriducibile

Sia  $a = b \cdot c$ : usando l'ipotesi che  $a$  è primo allora  $a|b$  oppure  $a|c$ .

Se  $a|b \Rightarrow \exists h : b = a \cdot h \Rightarrow a = a \cdot h \cdot c \Rightarrow h \cdot c = 1 \Rightarrow c = \pm 1$

Allora  $a = b \cdot (+1)$  oppure  $a = b \cdot (-1)$ ,  $a$  è irriducibile.

### 3.13.2 Proposizione: in $\mathbb{Z}$ a irriducibile $\Rightarrow$ a primo

Ipotesi:  $a$  irriducibile

Tesi:  $a$  primo Supponiamo che  $a|bc \Leftrightarrow \exists h \in \mathbb{Z} : bc = ah$ ,

voglio mostrare che  $a|b$  oppure  $a|c$  ovvero che se  $a \nmid b$  allora  $a|c$ .

Ora  $a$  irriducibile, i suoi divisori sono  $a, -a, 1, -1$ .  $a \nmid b$  allora anche  $-a \nmid b \Rightarrow$  i divisori comuni tra  $a$  e  $b$  sono  $1, -1 \rightarrow MCD(a, b) = 1$ .

$$\exists(\text{id. Bézout}) \exists h, k \in \mathbb{Z}$$

$$1 = ah + bk$$

moltiplicando per  $c$

$$c = cah + cbk = a(ck + k) \quad [cb = a]$$

quindi  $a|c$ .

### 3.14 Massimo comune divisore

Dati  $a, b$  non entrambi nulli, un elemento  $d \in \mathbb{Z}$  si chiama massimo comune divisore tra  $a$  e  $b$  un numero tale che:

- $d|a \wedge d|b$
- Se  $c|a \wedge c|b$ , allora  $c|d$ :  $d$  è il massimo tra i divisori comuni.

Chiamiamo massimo comune divisore l'unico positivo che soddisfa le due proprietà.

#### 3.14.1 Teor: Esistenza del MCD tra due numeri

$\forall a, b \in \mathbb{Z}$  non entrambi nulli, esiste un numero  $d \in \mathbb{N}^*$  tale che  $d = MCD(a, b)$

Il massimo comune divisore si esprime come una combinazione lineare tra  $a$  e  $b$ , ovvero esistono  $s, t \in \mathbb{Z}$  tali che  $d = s \cdot a + t \cdot b$  (*identità di Bézout*).

**Dimostrazione:**

Sia  $S = \{xa + yb : x, y \in \mathbb{Z}, xa + yb > 0\}$

1.  $S \subseteq \mathbb{N}$
2.  $S \neq \emptyset$

$a$  e  $b$  sono non entrambi nulli, quindi almeno uno dei due è  $\neq 0$ . Sia esso  $a$ .

Se  $a > 0$  allora  $1 \cdot a + 0 \cdot b = a > 0$

Se  $a < 0$  allora  $(-1) \cdot a + 0 \cdot b = a > 0$

Per il principio del buon ordinamento,  $S$  ammette un elemento minimo: sia esso  $d$ . Quindi ogni altra combinazione lineare che sia  $< d$  non appartiene ad  $S$ .

**Dimostrazione che  $d|a$  e  $d|b$ :**

Dividiamo  $a$  per  $d$  (divisione col resto):  $\exists q, r$  con  $a = dq + r$ ,  $0 \leq r < d$

Se  $r = 0$  allora  $d|a$

Se  $r \neq 0$  allora  $0 < r < d$   
 $r = a - dq$ ; dato che  $d \in S \Rightarrow d = x_0a + y_0b$  allora  
 $r = a - q(x_0a + y_0b) = a - qx_0a + qy_0b = a(1 - qx_0) - (qy_0)b$   
 Quindi  $r \in S$  perchè è una combinazione lineare  $> 0$  ma  $r < d$ , però  $d$  è il minimo di  $S \Rightarrow$  Assurdo.

Dimostrazione se  $d'|a$  e  $d'|b$  allora  $d'|d$ :  
 Poichè  $d'|a$  e  $d'|b$  si ha che

$$\exists h : a = d' \cdot h, \exists k : b = d' \cdot k$$

Ora

$$\begin{aligned} d &= x_0a + y_0b \\ &= x_0(d'h) + y_0(d'k) = \\ &= d'(x_0h + y_0k) \Rightarrow d'|d \end{aligned}$$

**3.14.2 Prop:** se  $c|a$  e  $c|b$  allora  $c$  divide ogni combinazione lineare di  $a$  e  $b$

$$\begin{aligned} a &= ch \\ b &= ck \\ \Rightarrow xa + yb &= xch + yck \\ &= c(xh + yk) \Rightarrow \in \mathbb{Z} \\ &\Rightarrow c|xa + yb \end{aligned}$$

### 3.15 Proposizione

$$1 = at + bs \Rightarrow MCD(a, b) = 1$$

**3.15.1 Lemma**  $MCD(m, m+1)=1$

Sia  $m \in \mathbb{N}$ ,  $m \geq 1$  allora  $MCD(m, m+1) = 1$ .

**Dimostrazione:**

$$m + 1 - m = 1 \Rightarrow 1(m + 1) + (-1)m = 1$$

Potendo scrivere  $1$  come combinazione lineare di  $m$  e  $m+1$ ,  $m$  e  $m+1$  sono primi tra loro.

### 3.16 Algoritmo di Euclide

**3.16.1 Lemma1:** L'algoritmo termina

La successione dei resti è un numero  $0 \leq \dots < r_2 < r_1 < b$ .



**3.16.2 Lemma2:** Se  $a = bq + r$   $MCD(a, b) = MCD(b, r)$

Ogni divisore comune di  $a$  e  $b$  è anche divisore comune di  $b$  ed  $r$ : questo dimostra che il  $MCD(a, b) | MCD(b, r)$ :

Sia  $d \in \mathbb{N}$ :  $d | a \wedge d | b$  e ricavando  $r$  da  $a = bq + r$ , si ha:

$$a = dh \quad b = dk$$

$$r = a + b(-q) = dh + dk(-q) = d(h + k(-q))$$

$d | r$  perchè  $r$  è combinazione lineare di  $a$  e  $b$ .

In particolare il

$$MCD(a, b) | a$$

$$MCD(a, b) | b$$

si ha che il  $MCD(a, b) | r$  e  $MCD(a, b) | b$ .

$$\Rightarrow MCD(a, b) | MCD(r, b)$$

**3.16.3 Corollario:**  $MCD(a, b) = MCD(r_n, 0) = r_n 1$

Per il lemma 2  $MCD(a, b) = MCD(b, r_1) = MCD(r_1, r_2) = \dots = MCD(r_{n-1}, r_n) = MCD(r_n, 0)$

**3.16.4 Lemma3**

Se  $x \in \mathbb{N}^*$  allora  $MCD(x, 0) = x$

## 3.17 Coprimi

$a, b$  non entrambi nulli,  $a$  e  $b$  si dicono coprimi (o *primi fra loro*) se  $MCD(a, b) = 1$ .

**3.17.1 Osservazione1**

Se  $a$  e  $b$  sono primi fra loro, allora

$$\exists x, y \in \mathbb{Z} : 1 = xa + yb$$

**3.17.2 Osservazione 2**

Se

$$d = MCD(a, b) \Rightarrow \exists x, y : d = ax + by$$

**3.17.3 Proposizione 1**

Se  $\exists x_0, y_0$  con  $1 = ax_0 + by_0$  allora  $a, b$  sono primi tra loro.

**3.17.4 Proposizione 2**

Se  $a$  e  $b$  sono coprimi e dividono un terzo numero  $c$ , allora  $ab | c$ .

### 3.18 Equazione diofantea

Equazione con una o più incognite sugli interi di cui si cercano le soluzioni intere. Sono del tipo:

$$ax + by = c$$

#### 3.18.1 Teor: Soluzione equazione diofantea

L'equazione diofantea lineare in  $x$  e  $y$   $ax + by = c$   $a, b, c \in \mathbb{Z}$  possiede soluzioni intere  $(x, y) \in \mathbb{Z}^2 \Leftrightarrow d = MCD(a, b) | c$

(Dim $\Rightarrow$ ) La condizione  $MCD(a, b) | c$  è necessaria.

Ipotesi: esiste una soluzione di  $x^2 + y^2 = z^2$

Tesi:  $d |$  termine noto,  $d = MCD(a, b) : d | a$  e  $d | b \Rightarrow d |$  ogni combinazione lineare di  $a, b$ .

Se  $x_0, y_0$  sono una soluzione, allora  $ax_0 + by_0 = c \Rightarrow d | c = ax_0 + by_0$

(Dim $\Leftarrow$ ) La condizione è sufficiente.

Ipotesi  $MCD(a, b) = ah + bk$ , per opportuni  $h, k \in \mathbb{Z}$

### 3.19 Teorema fondamentale dell'aritmetica

$\forall n > 1, n \in \mathbb{N}, \exists p_1, \dots, p_j \in \mathbb{N}$  (irriducibili)  $\exists h_1, \dots, h_j \geq 1$  tali che:

- $n = p_1^{h_1} \dots p_j^{h_j}$   $p_1, \dots, p_j$  distinti
- la fattorizzazione di  $n = p_1^{h_1} \dots p_j^{h_j}$   $p_1, \dots, p_j$  è unica a meno di riordinare i fattori

#### 3.19.1 Osservazione 1

$j$  può essere 1, cioè potrebbe esserci un solo irriducibile nella fattorizzazione di  $n$ , anche  $h$  possono essere 1. Se  $n$  è irriducibile  $\Rightarrow n = n$  è la fattorizzazione in irriducibili di  $n$ .

#### 3.19.2 Osservazione 2

1 non è considerato irriducibile perché si perderebbe l'unicità della scrittura in irriducibili.

#### 3.19.3 Dimostrazione esistenza

Con principio di induzione in forma forte.

**Base:**  $n=2$ , 2 è irriducibile.

Per **oss1**  $2 = 2^1$  è la fattorizzazione in primi in irriducibili di 2

**Ipotesi induttiva:** ogni  $2 \leq a < n$  ( $2 \leq a \leq n-1$ ) è fattorizzabile in irriducibili:  $\exists \alpha_1 \dots \alpha_t \alpha_i \geq 1$  e  $q_1, \dots, q_t$  irriducibili con  $a = q_1^{\alpha_1} \dots q_t^{\alpha_t}$

**Passo induttivo:** provare che  $n$  sia prodotto di irriducibili

**Primo caso:**  $n$  irriducibile  $\rightarrow$  fatto, per *oss.1*

**Secondo caso:**  $n$  riducibile:  $\exists b, c \in \mathbb{Z}, 1 \neq b, c \neq n$  (divisori propri) con  $n = bc \Rightarrow 2 \leq b, c < n$ .

Allora per  $b$  e  $c$  vale l'ipotesi induttiva e quindi

$$b = q_1^{\alpha_1} \dots q_t^{\alpha_t} \quad c = x_1^{\beta_1} \dots x_s^{\beta_s}$$

$$n = bc = q_1^{\alpha_1} \dots q_t^{\alpha_t} x_1^{\beta_1} \dots x_s^{\beta_s}$$

### 3.20 Dimostrazione unicità

**Nota: le fattorizzazioni hanno gli esponenti**

Per induzione su  $m$ , con  $m$  è la lunghezza minima di una fattorizzazione per  $n$ .

$m$ : minimo numero di irriducibili di una fattorizzazione di  $n$

**Base:**  $m = 1 \Rightarrow n = n$  è primo.

Se per assurdo  $n = q_1 \dots q_s$ ,  $s \geq 2$  allora  $n|q_1$  o  $n|q_2 \dots q_s$ .

Prendiamo  $n|q_1$ , anche  $q_1$  è primo  $\Rightarrow n = q_1$ ; semplificando da entrambe le parti  $\Rightarrow 1 = q_2 \dots q_s$  che porterebbe ad un assurdo perché  $1 = 1$ .

Quindi  $n = q_1$  ed è l'unica fattorizzazione.

**Ipotesi induttiva:** se il minimo numero di primi in una fattorizzazione di  $n$  è  $m - 1$ , allora la fattorizzazione è unica a meno dell'ordine.

**Passo induttivo:** Prendo  $n$  con una fattorizzazione lunga  $m$  irriducibili ed un'altra fattorizzazione di  $n$ :

$$n = p_1 p_2 \dots p_m = q_1 q_2 \dots q_k$$

Prendo un  $p_i$  che essendo primo dividerà uno dei  $q_i$  e quindi usando la cancellatività a destra e sinistra, la fattorizzazione  $p_1 \dots p_{i-1} p_{i+1} \dots p_m$  sarà lunga  $m - 1$  irriducibili, allora per l'ipotesi induttiva la fattorizzazione lunga  $m - 1$  è unica  $\Rightarrow$  anche la fattorizzazione di  $n$  è unica.

### 3.21 Teor. Euclide - Esistenza infiniti primi

L'insieme  $P = \{p \in \mathbb{N} : p \text{ è primo}\}$  è infinito.

**Dimostrazione:** Supponiamo che  $P$  sia finito, cioè  $P = \{p_1, \dots, p_n\}$ .

Sia  $m = p_1 \dots p_n$  il prodotto di tutti i primi.

Considero  $m + 1$ : per il teorema fondamentale dell'aritmetica  $m + 1 = p_1^{k_1} \dots p_n^{k_n}$ ,  $k_1, \dots, k_n \geq 0$  almeno uno degli esponenti  $> 0$ .

Per il lemma su MCD di un numero ed il suo successivo  $m$  e  $m + 1$  sono coprimi.

Sia  $j$  tale che  $k_j > 0$ , cioè  $p_j^{k_j} | m + 1$ ; vale anche  $p_j | m$  allora  $p_j | MCD(m, m + 1) = 1$  che è un assurdo.

## 4 Congruenze

### 4.1 Congruenza modulo $n$

La congruenza modulo  $n$  ( $n$  fissato) è una relazione di equivalenza definita su  $\mathbb{Z}$ .

$$x \equiv y \pmod{n} \Leftrightarrow x - y \text{ multiplo di } n \Leftrightarrow n | x - y$$

### 4.2 Proposizione

La congruenza  $\pmod{n}$  è una relazione di equivalenza.

**Dimostrazione:**

(R)

$$\forall x \in \mathbb{Z} : x \equiv x \pmod{n} \Leftrightarrow n | (x - x)$$

Vera perché  $0 = 0 \cdot n$ .

(S)

$$\forall x, y \in \mathbb{Z} : x \equiv y \pmod{n} \Rightarrow y \equiv x \pmod{n}$$

So che  $n | x - y \Leftrightarrow x - y = nh$  per qualche  $h \in \mathbb{Z}$ .

Moltiplicando per  $-1$ :  $y - x = -nh = n(-h)$  quindi  $n | y - x \Rightarrow y \equiv x \pmod{n}$

(T)

$$x \equiv y \pmod{n} \wedge y \equiv z \pmod{n} \Rightarrow x \equiv z \pmod{n}$$

$$(x - y) = nh_1 \wedge (y - z) = nh_2$$

$$(x - z) = (x - y) - (y - z) = nh_1 - nh_2 = n(h_1 - h_2) \text{ quindi } n | x - z \Rightarrow x \equiv z \pmod{n}$$

### 4.3 Quoziente

Il quoziente della congruenza  $\pmod{n}$  si denota come  $\mathbb{Z}_{/\equiv \pmod{n}} = \{[x]_n : x \in \mathbb{Z}\}$ .

Il quoziente  $\mathbb{Z}_n$  si chiama anche **interi modulo  $n$** .

### 4.4 Proposizione - Resto

Dati  $x, y \in \mathbb{Z}$  si ha:  $x \equiv y \pmod{n} \Leftrightarrow$  il resto delle divisioni di  $x$  e di  $y$  per  $n$  è lo stesso.

**Dimostrazione**  $\Rightarrow$  (se  $x \equiv_n y$  hanno lo stesso resto  $x - y = nh$  (per qualche  $h$ ))

$$x = nh + y$$

Dividendo  $y$  per  $n$ :  $\exists! q, r \in \mathbb{Z} : y = nq + r, 0 \leq r < n$ .

Scambiando in  $x$ :  $x = nh + nq + r = n(h + q) + r$ ,  $x$  ed  $y$  hanno quindi lo stesso resto.

#### 4.5 Osservazione

Sia  $x = nq + r$ ,  $0 \leq r < n$  la divisione con resto di  $x$  per  $n$ .  
Allora

$$[x]_n = [r]_n \Leftrightarrow x \equiv r \pmod{n} \Leftrightarrow x - r = nq$$

Quindi

$$n \mid x - r$$

#### 4.6 Proposizione somma

La somma classi resto in  $\mathbb{Z}_n$ , definita da:  $\bar{x} + \bar{y} := \overline{x + y}$ , è ben posta, ovvero non dipende dalla scelta dei rappresentanti.

**Dimostrazione** Siano  $x' \in \bar{x}$ , cioè  $\bar{x'} = \bar{x}$  e  $y' \in \bar{y}$  cioè  $\bar{y'} = \bar{y}$ , allora

$$x' \equiv x \pmod{n} \Leftrightarrow x' = x + kn$$

$$y' \equiv y \pmod{n} \Leftrightarrow y' = y + hn$$

Da verificare:  $\overline{x' + y'} = \overline{x + y} \Leftrightarrow x' + y' = x + y + tn$

Quindi:

$$\begin{aligned} x' + y' &= x + kn + y + hn \\ &= x + y + kn + hn \\ &= x + y + (k + h)n \quad [(k + h) = t] \end{aligned}$$

#### 4.7 Dimostrazione prodotto

$$\begin{aligned} x' \cdot y' &= (x + kn)(y + hn) \\ &= xy + xhn + kny + khn^2 \\ &= xy + n(xh + ky + khn), \quad [(xh + ky + khn) = t] \end{aligned}$$

#### 4.8 Proposizione - Invertibilità

$a \in \mathbb{Z}$ ,  $\bar{a}$  invertibile in  $\mathbb{Z}_n \Leftrightarrow MCD(a, n) = 1$

**Dim**  $\Rightarrow$

Ipotesi:  $\bar{a} \in \mathbb{Z}$  invertibile

Tesi:  $(a, n) = 1$

Esiste  $b \in \mathbb{Z} : \bar{a} \cdot \bar{b} = 1$

$$\begin{aligned} &\Leftrightarrow ab \equiv 1 \pmod{n} \\ &\Leftrightarrow n \mid 1 - ab \\ &\Leftrightarrow 1 - ab = nk \\ &\Leftrightarrow 1 = ab + nk \end{aligned}$$

$$\Rightarrow MCD(a, n) = 1$$

**Dim**  $\Leftarrow$

Ipotesi:  $MCD(a, n) = 1$

Tesi:  $\bar{a}$  è invertibile

Se  $MCD(a, n) = 1$  allora esistono  $h, k \in \mathbb{Z}$  :

$$1 = ah + nk \in \mathbb{Z}$$

$$\bar{1} = \overline{ah + nk}$$

$$\bar{1} = \bar{a}\bar{h} + \bar{n}\bar{k} \in \mathbb{Z}$$

$$\bar{n}\bar{k} = \bar{0}\bar{k}$$

$$\bar{1} = \bar{a}\bar{h} \Rightarrow \bar{h} = (\bar{a})^{-1}$$

#### 4.9 Classi resto invertibili

$$\cup(\mathbb{Z}_n) := \{a \in \mathbb{Z}_n : \bar{a} \text{ invertibile}\} \subseteq \mathbb{Z}_n$$

$$\cup(\mathbb{Z}_n) = \{\bar{a} : MCD(a, n) = 1\}$$

#### 4.10 Teorema Uguaglianza sbagliata

Se  $p$  è primo allora  $\forall x, y \in \mathbb{Z}$  vale:

$$(x + y)^p \equiv x^p + y^p \pmod{p}$$

$$(\bar{x} + \bar{y})^p = \bar{x}^p + \bar{y}^p \pmod{p}$$

**Dimostrazione:**  $(x + y)^p = \sum_{i=0}^p \binom{p}{i} x^i y^{p-i}$

$$\binom{p}{0} = 1 = \binom{p}{p}$$

$$\binom{p}{0} x^0 y^p = 1 y^p$$

$$\binom{p}{p} x^p y^0 = 1 x^p$$

Considerando  $i$  con  $0 < i < p$  il coefficiente binomiale è:

$$\binom{p}{i} = \frac{p(p-1)\dots(p-i+1)}{i(i-1)\dots 2 \cdot 1} \in \mathbb{N}$$

$$p \left( \frac{(p-1)\dots(p-i+1)}{i!} \right) \Rightarrow p \mid \binom{p}{i} \forall i = 2, \dots, p-1$$

$$\Rightarrow \binom{p}{i} \equiv 0 \pmod{p}$$

Quindi

$$\begin{aligned} (x+y)^p &= y^p + \binom{p}{1}x^1y^{p-1} + \binom{p}{2}x^2y^{p-2} + \dots + \binom{p}{p-1}x^{p-1}y^{p-(p-1)} + x^p \\ &\Rightarrow \overline{y^p} + \overline{\binom{p}{1}x^1y^{p-1}} + \dots + \overline{\binom{p}{p-1}x^{p-1}y^{p-(p-1)}} + \overline{x^p} = \\ &= \overline{x^p} + \overline{y^p} \end{aligned}$$

#### 4.10.1 Grande teorema di Fermat

$x^n + y^n = z^n, n \geq 3$  non ha soluzioni intere.

#### 4.10.2 Piccolo teorema di Fermat

$\forall a \in \mathbb{Z}, \forall p \pmod{p}$  primo si ha che:  $a^p \equiv a \pmod{p}$  in  $\mathbb{Z}_p$ ,  $p$  primo vale  $\overline{a^p} = \overline{a}$ .

**Dimostrazione per**  $a \in \mathbb{N}$

Per induzione su  $a$

**Base:**

$$\begin{aligned} a &= 0 \\ 0^p &\stackrel{?}{\equiv} 0 \pmod{p} \\ 0^p = 0 \in \mathbb{Z} &\Rightarrow 0^p \equiv 0 \pmod{p} \end{aligned}$$

**Ipotesi induttiva:** supponiamo vera per  $a$  l'affermazione  $a^p \equiv a \pmod{p}$

**Passo induttivo:** verifichiamo per  $(a+1)$ .

$$(a+1)^p \equiv a^p + 1^p \equiv a + 1$$

$a^p \rightarrow a$  e  $1^p \rightarrow 1$  per ipotesi induttiva.

Se  $a < 0$  è ancora vero?

Se  $a < 0$  allora  $-a > 0$ , cioè  $(-a)^p \equiv -a \pmod{p}$ . Ora:

$$\begin{aligned} 0 &= a - a \\ 0^p &= (a - a)^p \\ 0^p &\equiv (a - a)^p \equiv a^p + (-a)^p \\ &\equiv a^p - a \equiv 0 \pmod{p} \Leftrightarrow a^p \equiv a \pmod{p} \end{aligned}$$

### 4.11 Teorema Eulero-Fermat

Se  $(a, p) = 1$  cioè se  $\bar{a} \neq \bar{0}$  in  $\mathbb{Z}_p$  allora

$$a^{p-1} \equiv 1 \pmod{p}$$

**Dimostrazione:** se  $(a, p) = 1$  allora esiste l'inverso moltiplicativo di  $\bar{a}$  in  $\mathbb{Z}_p$ .  
So che

$$a^p \equiv a \pmod{p}$$

$$(\bar{a}^p) \equiv \bar{a} \pmod{p}$$

$$\Rightarrow \text{moltiplicando per l'inverso} \Rightarrow \bar{a}^{p-1} = \bar{1} \text{ in } \mathbb{Z}_p$$

$$\Leftrightarrow a^{p-1} \equiv 1 \pmod{p}$$

### 4.12 Corollario

Se  $(a, p) = 1$  e se  $p$  primo allora  $\bar{a}^{p-2}$  è l'inverso moltiplicativo di  $\bar{a}$  in  $\mathbb{Z}_p$

**Dimostrazione:** l'inverso di  $\bar{a}$  è  $\bar{x}$  con  $\bar{a} \cdot \bar{x} = \bar{1}$ , ma

$$\bar{a} \cdot \bar{a}^{p-2} = \bar{a}^{p-1} = \bar{1}$$

per il *teorema di Eulero-Fermat*.



## 5 Polinomi a coefficienti reali in 1 indeterminata

### 5.1 Descrizione

$$\mathbb{R}[x] := \{p(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_kx^k : a_i \in \mathbb{R}, i = 0, \dots, k, k \in \mathbb{N}\}$$

### 5.2 Somma di polinomi

Dati

$$\begin{aligned}p(x) &= a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_kx^k \\q(x) &= b_0 + b_1x + b_2x^2 + \dots + b_kx^k\end{aligned}$$

con  $k \leq h$

$$p(x) + q(x) = (a_0 + b_0) + (a_1 + b_1)x + \dots + (a_k + b_k)x^k + b_{k+1}x^{k+1} + \dots + b_hx^h$$

### 5.3 Rappresentazione come successioni

Con esempio:

$$p(x) = 1 + 3x - 4x^3 \leftrightarrow (1, 3, 0, -4, 0, 0, \dots)$$

#### 5.3.1 Somma di polinomi

$$\begin{aligned}p(x) &= (a_0, a_1, a_2, \dots) \\q(x) &= (b_0, b_1, b_2, \dots) \\p(x) + q(x) &= (a_0 + b_0, a_1 + b_1, \dots, a_n + b_n, \dots)\end{aligned}$$

$a_i, b_i$  sono i coefficienti di  $x^i$  nel polinomio che rappresentano.

### 5.4 Teorema: $(\mathbb{R}[x], +)$ è un gruppo (commutativo)

**Dimostrazione:**

- $\mathbb{R}[x]$  è non vuoto
- La somma è associativa

$$(\underline{a} + \underline{b}) + \underline{c} = (\dots(a_n + b_n) + c_n \dots) = (\dots a_n + (b_n + c_n) \dots) = \underline{a} + (\underline{b} + \underline{c})$$

- $0 \in \mathbb{R}$  è l'elemento neutro di  $\mathbb{R}[x]$

$$0 = 0 + 0x + 0x^2 + \dots \rightarrow (0, 0, 0, \dots)$$

- Ogni polinomio ha il suo opposto: se

$$p(x) = a_0 + a_1x + \dots + a_kx^k$$

allora l'opposto di  $p(x)$  è

$$-p(x) = -a_0 - a_1x - \dots - a_kx^k$$

## 5.5 Prodotto di polinomi

$$p(x) = a_0 + a_1x + \dots + a_kx^k \leftrightarrow (a_0, a_1, \dots)$$

$$q(x) = b_0 + b_1x + \dots + b_kx^k \leftrightarrow (b_0, b_1, \dots)$$

$$p(x) \cdot q(x) = c_0 + c_1x + \dots + c_r x^r \leftrightarrow (c_0, c_1, \dots)$$

$$\begin{aligned} c_0 + c_1x + \dots + c_r x^r &= a_0b_0 + (a_0b_1 + a_1b_0)x + (a_0b_2 + a_1b_1 + a_2b_0)x^2 + \\ &\quad + (a_0b_3 + a_1b_2 + a_2b_1 + a_3b_0)x^3 + \dots \end{aligned}$$

La successione dei coefficienti di  $p(x) \cdot q(x)$  è data da:

$$c_n = \sum_{i=0}^n a_i b_{n-i} = \sum_{i+j=n} a_i b_j$$

## 5.6 Teorema $(\mathbb{R}, +, \cdot)$ è un anello

$(\mathbb{R}, +, \cdot)$  è un anello commutativo, unitario con unità del prodotto uguale a 1 ed è un dominio di integrità. *non dimostrato*

## 5.7 Grado del prodotto

Se il grado di  $p(x) = k$  ed il grado di  $q(x) = h$  il grado del prodotto  $p(x)q(x) = k + h$

## 5.8 Fatti importanti

- in  $\mathbb{R}[x]$  si può fare la "divisione col resto":

$$\forall a(x), b(x) \in \mathbb{R}, b(x) \neq 0$$

$$\exists! q(x), r(x) \in \mathbb{R} :$$

1.  $a(x) = b(x) \cdot q(x) + r(x)$
2. il grado di  $r(x) < \text{grado } b(x)$

- Conseguenza della divisione col resto:

$$MCD(m(x), n(x))$$

$$m(x) = n(x) \cdot q_1(x) + r_1(x)$$

$$n(x) = r_1(x) \cdot q_2(x) + r_2(x)$$

...

Termina quando il resto è un polinomio di grado 0.

## 6 Strutture algebriche

### 6.1 Gruppo

Un insieme  $S$  non vuoto, munito di una operazione

$$m : S \times S \rightarrow S$$

$$(a, b) \mapsto m(a, b) = a * b \text{ (notazione infissa)}$$

che verifica i punti 1, 3, 4 (vedere proposizioni operazioni su  $\mathbb{Z}$ ) si chiama *gruppo*  $(S, *)$ .

L'operazione su  $S$  è dunque:

1. associativa
2. con elemento neutro  $e$ :  $\forall x, x * e = e * x = x$
3. per ogni elemento  $x$  esiste un inverso rispetto al prodotto  $*$  cioè un elemento  $y$  tale che  $x * y = y * x = e$ , che si denota  $x^{-1}$

### 6.2 Gruppo commutativo (abeliano)

Se il gruppo  $(S, *)$  soddisfa anche la proprietà 2 (quindi associatività, elemento neutro, opposto, +commutatività).

### 6.3 Anello

Un anello è una terna  $(A, +, \cdot)$  con:

1.  $A$  insieme non vuoto
2.  $+$   $\cdot$  due operazioni binarie, associative
3.  $(A, +)$  è un gruppo abeliano
4. Distributività:  $\forall a, b, c \in A, a \cdot (b + c) = a \cdot b + a \cdot c$

#### 6.3.1 Anello commutativo

Se un anello  $(A, +, \cdot)$  il prodotto è commutativo, cioè se  $\forall a, b \in A, a \cdot b = b \cdot a$ .

#### 6.3.2 Anello unitario

Se esiste un elemento di  $A$ , che si denota con  $1_A$ , tale che  $a \cdot 1_A = 1_A \cdot a = a$ .

#### 6.3.3 Divisore dello zero

Un elemento  $a \in A, a \neq 0_A$  di un anello si dice divisore dello zero se esiste  $b \in A, b \neq 0$  con  $a \cdot b = 0_A$ .

### 6.3.4 Dominio di integrità

Se  $(A, +, \cdot)$  è privo di divisori dello zero.

### 6.3.5 Legge di annullamento del prodotto

Se in un dominio di integrità  $a \cdot b = 0_A$  allora  $a = 0_A$  oppure  $b = 0_A$ .

## 6.4 Campo

Un campo è una terna  $(K, +, \cdot)$  con  $K$  insieme non vuoto e 2 operazioni.

- $(K, +, \cdot)$  anello commutativo unitario
- Detto  $0_k$  l'elemento neutro della somma e denotato con  $K^* = K \setminus \{0_k\}$ , deve valere che  $\forall x \in K^* : x \cdot x^{-1} = 1_k$  (è un gruppo)

Quindi campo  $\Leftrightarrow$  anello commutativo unitario con in più  $K \setminus \{0_k\} = (K^*, \cdot)$  gruppo.

## 6.5 Semigrupp

Sia  $X$  un insieme non vuoto, data  $*$ :

$$X * X \rightarrow X$$

$$(a, b) \mapsto a * b$$

una operazione binaria associativa:  $\forall a, b, c \in X : a * (b * c) = (a * b) * c$

Un insieme  $X$ , munito di una operazione associativa si chiama **semigrupp**.

### 6.5.1 Monoide

Se  $(X, *)$  è un semigrupp ed inoltre esiste un elemento  $1_X$  tale che  $a * 1_X = 1_X * a = a$  ( $1_X$  elemento neutro dell'operazione  $*$ ), allora  $(X, *)$  si chiama **monoide**.

## 6.6 Elenco gruppi

$(A^*, \cdot)$  è un monoide non commutativo.

$(\mathbb{N}, +)$  (commutativo) monoide (0 el. neutro) ma non è un gruppo.

$(\mathbb{Z}, +)$  gruppo commutativo (0 el. neutro).

$(\mathbb{Q}, +)$  gruppo commutativo (0 el. neutro);  $\frac{p}{a} \rightarrow \text{opposto} - \frac{p}{a}$ .

$(\mathbb{N}^*, \cdot)$  monoide, non è un gruppo.

$(\mathbb{Z}^*, \cdot)$  monoide, non è un gruppo.

$(\mathbb{Q}, \cdot)$  non è un gruppo, 0 non ha inverso.

$(\mathbb{Q}^*, \cdot)$  gruppo.

$(\mathbb{R}, +)$  gruppo.

$(\mathbb{R}^*, \cdot)$  monoide, gruppo.

$(\mathbb{Z}_n, +)$  gruppo finito commutativo; el. neutro  $\bar{0}$ .  
 $(\mathbb{Z}_n, \cdot)$  monoide, semigrupp (non è un gruppo  $\bar{0}$  non è invertibile).  
 $(\cup(\mathbb{Z}_n), \cdot)$  gruppo, el. neutro  $\bar{1} = \{\bar{a} : (a, n) = 1\}$  (el. invertibili).

## 6.7 Gruppo simmetrico

### 6.7.1 Permutazione

$f : [n] \rightarrow [n]$  si chiama permutazione di  $n$  elementi se  $f$  è biiettiva.

### 6.7.2 $S_n$

$$\begin{aligned}
 S_n &:= \{\sigma : [n] \rightarrow [n] : \sigma \text{ e' biiettiva}\} \\
 &= \{\sigma : \sigma \text{ e' una biiezione}\}
 \end{aligned}$$

### 6.7.3 Proposizione

$$|S_n| = n!$$

### 6.7.4 Proposizione

$(S_n, \cdot)$  l'insieme delle permutazioni di  $n$  elementi con il prodotto di composizione funzionale è un gruppo di cardinalità  $n!$  non commutativo.

#### Dimostrazione

- $S_n$  non vuoto,  $n \geq 1$
- Esiste un elemento neutro rispetto al prodotto  $\cdot$ , la permutazione identica:  
 $\sigma \circ id = id \circ \sigma = \sigma$ .
- Prodotto associativo  $\forall \sigma, \tau, \rho \in S_n$   $(\sigma \circ \tau) \circ \rho(i) = \sigma \circ (\tau \circ \rho)(i) = \sigma(\tau(\rho(i)))$
- $\forall \sigma \in S_n$  esiste un elemento  $\sigma^{-1}$  tale che  $\sigma \circ \sigma^{-1} = id$ .

### 6.7.5 3<sup>a</sup> notazione: Permutazione come prodotto di cicli disgiunti

$S_n$ : Definire una relazione di equivalenza su  $[n]$  associata a  $\sigma \in S_n$ .

$$x, y \in [n]$$

$$x \equiv_{\sigma} y \Leftrightarrow \exists i : y = \sigma^i(x)$$

Si osservi che  $\sigma \in S_n$ , allora la potenza  $i$ -esima di  $\sigma$ , con  $i \in \mathbb{N}$  è la permutazione  $\sigma^i = \sigma \circ \dots \circ \sigma$  per  $i$  volte.

### 6.7.6 Orbita

L'orbita di  $x \in [n]$  è la classe di equivalenza di  $x$  nella relazione  $\equiv_{\sigma}$ .

$$O_{\sigma}(x) = \{y \in [n] \mid \exists i \text{ con } y = \sigma^i(x)\}$$

### 6.7.7 Proposizione

Se  $\tau_1$  e  $\tau_2$  hanno cicli disgiunti  $\tau_1 \circ \tau_2 = \tau_2 \circ \tau_1$

### 6.7.8 Permutazione ciclica

Chiamo ciclica una permutazione di  $S_n$  in cui nella rappresentazione in cicli disgiunti ha al più un solo ciclo di lunghezza  $> 1$

### 6.7.9 Teorema prodotto di scambi

Ogni permutazione si può scrivere come prodotto di scambi

**Dimostrazione 1:** Se la permutazione ha un solo ciclo  $\sigma = (a_1, a_2, \dots, a_k) =$  un  $k$ -ciclo  $= (a_1, a_k)(a_1, a_{k-1}) \dots (a_1, a_3)(a_1, a_2) = (a_1, a_2, a_3, \dots, a_k)$

**Dimostrazione 2:** Se ho un  $\sigma$  qualunque, allora

$$\sigma = C_1 \cdot C_2 \cdot \dots \cdot C_k$$

dove  $C_i$  è un ciclo (nella decomposizione in cicli disgiunti)

$$C_1 = (a_1, \dots, a_r) = (a_1, a_r)(a_1, a_{r-1}) \dots (a_1, a_2)$$

$$C_2 = (b_1, \dots, b_j) = (b_1, b_j)(b_1, b_{j-1}) \dots (b_1, b_2)$$

...

$$\sigma = (a_1, a_r)(a_1, a_{r-1}) \dots (a_1, a_2) (b_1, b_j)(b_1, b_{j-1}) \dots (b_1, b_2)$$

### 6.7.10 Teorema parità

Il numero di scambi usati in diverse fattorizzazioni di una permutazione ha sempre la stessa parità.

### 6.7.11 Pari, dispari

Una permutazione è pari se il numero di scambi (in una sua fattorizzazione in scambi) è pari, dispari altrimenti.

### 6.7.12 Gruppo alterno

Le permutazioni pari si chiamano *gruppo alterno*.

### 6.7.13 Segno

Data  $\sigma$  in  $S_n$ , il segno di  $\sigma$  è  $\varepsilon(\sigma) = (-1)^{\text{parità di } (\sigma)}$

## 6.8 Classi coniugate in $S_n$

### 6.8.1 Definizione

Dato  $G$  gruppo rispetto ad un'operazione  $\cdot$ , un elemento  $x'$  si dice coniugato con  $x \Leftrightarrow$

$$\exists y \in G \text{ con } : x' = yxy^{-1}$$

In  $S_n$   $\sigma, \sigma'$  sono coniugate  $\Leftrightarrow$

$$\exists \tau \in S_n : \sigma' = \tau\sigma\tau^{-1}$$

(si dice che  $\sigma'$  è coniugato a  $\sigma$  tramite  $\tau$ )

TODO: controllare correttezza definizione

### 6.8.2 Proposizione

Due permutazioni  $\sigma, \sigma' \in S_n$  sono coniugate  $\Leftrightarrow$  hanno la stessa struttura ciclica.

## 6.9 Definizione multinsieme

Una partizione  $\lambda$  di un intero  $n$  è un multinsieme di naturali  $\geq 1$  la cui somma da  $n$ .

## 6.10 Gruppi finiti

### 6.10.1 Proprietà 1

Dato  $(G, \cdot)$  gruppo e  $x, y \in G$  allora  $(x \cdot y)^{-1} = y^{-1} \cdot x^{-1}$  (l'inverso del prodotto è il prodotto degli inversi in ordine inverso).

**Dimostrazione:**  $(xy)^{-1} = ? e_G$  (el. neutro del gruppo).

Ora

$$\begin{aligned} (x \cdot y)^{-1} \cdot (y^{-1} \cdot x^{-1}) &= \\ x \cdot (y \cdot y^{-1}) \cdot x^{-1} &= \\ x \cdot e_G \cdot x^{-1} &= \\ x \cdot x^{-1} &= \\ e_G \end{aligned}$$

### 6.10.2 Proprietà 2

In un gruppo vale sempre la cancellazione:

$$ax = bx \Leftrightarrow a = b$$

**Dimostrazione:**  $\exists x^{-1}$  : Se  $ax = bx$  e moltiplico per  $x^{-1}$

$$axx^{-1} = bxx^{-1}$$

$$a \cdot e = b \cdot e$$

$$a = b$$

*Conseguenza:* Su una riga (qualunque) della tavola moltiplicativa del gruppo ci sono una e una sola volta tutti gli elementi del gruppo.

## 6.11 Sottogruppi

### 6.11.1 Definizione

Un sottogruppo  $S$  di  $(G, \cdot)$  è:

- Un sottoinsieme non vuoto di  $S \subseteq G$
- $S$ , con la stessa operazione di  $G$  è un gruppo

### 6.11.2 Criteri di verifica

Per verificare che  $S$  sia un sottogruppo di  $G$ ;

- Associatività: "*gratis*" :  $S \subseteq G$  e il prodotto in  $G$  è associativo.

1.  $\forall a, b \in S : a \cdot b \in S$  ovvero  $S \times S \rightarrow S$

2.  $e_G \in S$

3.  $\forall a \in S \subseteq G, a^{-1} \in S$

### 6.11.3 Notazione

$$(S, \cdot) \leq (G, \cdot)$$

altrimenti

$$S \not\leq G$$



#### 6.11.4 Proposizione

$S$  non vuoto e  $S \subseteq (G, \cdot)$  è un sottogruppo di  $G$  se e solo se

$$\forall a, b \in S : a \cdot b^{-1} \in S \quad (*)$$

##### Dimostrazione

*Ipotesi:*  $\forall a, b : a \cdot b^{-1} \in S$

*Tesi:* valgono 1, 2, 3 dei criteri di verifica.

Dimostrazione 2:

$S \neq \emptyset : \exists a_0 \in S$  applico  $(*)$  ad  $a_0, a_0$ :

$$a_0 \cdot a_0^{-1} = e_G \in S$$

è quindi l'elemento neutro.

Dimostrazione 3:

$\forall a \in S : a^{-1} \in S$ ? Per 2.  $e_G \in S, a \in S$ , applico  $(*)$

$$e_G \cdot a^{-1} = a^{-1} \in S$$

Dimostrazione 1:

Dati  $a, b \in S, a \cdot b \in S$ ? Per la 3  $b^{-1} \in S$ .

Dati  $a, b^{-1}$  per  $(*)$

$$a \cdot (b^{-1})^{-1} = a \cdot b \in S$$

#### 6.12 Proposizione: intersezione di sottogruppi

Sia  $(G, \cdot)$  un gruppo e  $H \leq G, K \leq G$  due sottogruppi. Allora:

$$H \cap K \leq G$$

L'intersezione di sottogruppi di  $G$  è un sottogruppo di  $G$

##### Dimostrazione:

1.  $1_G \in H \cap K$ ?

Poiché  $H$  e  $K$  sono sottogruppi  $1_G \in H, K$  e quindi  $1_G \in H \cap K$

2. Siano  $x, y \in H \cap K$ : verifico che  $x \cdot y \in H \cap K$ .

$x \in H$  e  $x \in K$ ;  $y \in H$  e  $y \in K$  allora:

$$xy \in H; xy \in K \Rightarrow xy \in H \cap K$$

3. Se  $x \in H \cap K \Rightarrow x^{-1} \in H \cap K$ ?

La dimostrazione è simile a quella del punto precedente

### 6.13 Proposizione 1

$$H_1, H_2, \dots, H_t \leq G \Rightarrow H_1 \cap H_2 \cap \dots \cap H_t \leq G$$

### 6.14 Proposizione 2

Siano  $S, T \leq G$ :

$$S \cup T \leq G \Leftrightarrow S \cup T = T \vee S \cup T = S$$

## 7 Sottogruppo generato

### 7.1 Definizione

Siano  $G$  un gruppo e  $X \subseteq G$ , si definisce sotto gruppo generato di  $X$  il più piccolo sottogruppo di  $G$  che contenga  $X$

### 7.2 Notazione

$$\langle X \rangle := \bigcap_{X \subseteq H \leq G} H$$

### 7.3 Proposizione

Se  $X = \{x, x_2, \dots\} \subseteq G \neq 0$  allora:

$$\langle X \rangle = \{t_1, t_2, \dots, t_r : t_i \in X \text{ oppure } t_i^{-1} \in X\}$$

L'insieme che contiene i prodotti finiti di elementi di  $X$  oppure i cui inversi sono in  $X$ .

**Dimostrazione:**

1.  $\langle X \rangle$  contiene  $X$ ,  $r = 1, t_i \in X$
2.  $\langle X \rangle \leq G$ 
  - contiene  $1_G$ : sia  $\bar{x} \in X$  qualunque  $\Rightarrow \bar{x} \in \langle X \rangle, \bar{x}^{-1} \in \langle X \rangle$  e  $\bar{x} \cdot \bar{x}^{-1} = 1_G \in \langle X \rangle$
  - $\langle X \rangle$  è chiuso rispetto al prodotto di  $G$
  - Se  $t_1, t_2, \dots, t_r \in \langle X \rangle$ , e  $t_1$

TODO:CONTROLLARE APPUNTI

### 7.4 $\langle X \rangle$ è il più piccolo sottogruppo che contiene $X$

Da dimostrare in proprio, lo ha dato come esercizio

## 7.5 Defizione: ordine (periodo)

Se un elemento di  $G$  ha periodo finito, allora si chiama *ordine* (o periodo) di  $g$  il più piccolo positivo tale che  $g^m = 1_G$

## 7.6 Definizione: gruppo ciclico

Un gruppo  $G$  si dice ciclico se esiste  $g_0 \in G$  tale che  $G = \langle g_0 \rangle$  (*gruppo che viene generato da un solo elemento*).

## 7.7 Proposizione

Il sottogruppo generato da un elemento (in un gruppo ciclico) è commutativo.

**Dimostrazione:**

$$\begin{aligned}\langle g \rangle &= \{g^h : h \in \mathbb{Z}\} \\ x &= g^h, y = g^k \quad h, k \in \mathbb{Z} \\ x \cdot y &= g^h g^k = g^{h+k} = g^k g^h = y \cdot x\end{aligned}$$

## 7.8 Proposizione

Sia  $G$  gruppo:

1. Se  $g \in G$  ha periodo infinito ( $\nexists h > 0 : g^h = e$ ) allora  $\forall h, k \in \mathbb{Z}, h \neq k, g^h \neq g^k$ : il gruppo ciclico generato da  $G, \langle g \rangle \cong \mathbb{Z}$  (è isomorfo a  $\mathbb{Z}$ ).
2.  $g$  ha periodo finito.  
Se  $n = \text{periodo di } g = o(g) = \text{ord}_G(g)$  ovvero  $n = \min\{k > 0 : g^k = e\}$  allora  $\langle g \rangle = \{e, g, g^2, \dots, g^{n-1}\}$  dove queste potenze sono tutte distinte.

**Dimostrazione pt.1:** Dimostro che se:

$$g^h = g^k \Rightarrow h = k$$

infatti moltiplico per  $g^{-k}$  ed ho:

$$g^{h-k} = g^{k-k} \Rightarrow g^{h-k} = g^0 = e$$

ma  $g$  è aperiodico

$$\Rightarrow h - k = 0 \Rightarrow h = k$$

**Dimostrazione pt.2:** so che  $\langle g \rangle = \{g^h : h \in \mathbb{Z}\}$  devo dimostrare che ogni elemento  $g^h$  sta già in  $\{e, g, g^2, \dots, g^{n-1}\}$ .

Divido  $h$  per  $n$ :

$$\begin{aligned}h &= nq + r, \quad 0 \leq r < n \\ \Rightarrow g^h &= g^{nq+r} = g^{nq} g^r = (g^n)^q g^r = e^q g^r = e g^r = g^r\end{aligned}$$

ed  $r$  è un numero  $0 \leq r < n$  e quindi è una potenza dell'insieme.

## 7.9 Proposizione: sottogruppi di un gruppo ciclico

0. Sottogruppi di  $(\mathbb{Z}, +)$ : sono tutti e soli della forma

$$H = m\mathbb{Z} = \{mh : h \in \mathbb{Z} = \langle m \rangle\}, \quad m \in \mathbb{N}$$

*Non dimostrato.*

1. I sottogruppi di  $\langle g \rangle$  con  $g \in (G, \cdot)$ ,  $g$  aperiodico, sono tutti e soli della forma:

$$H = \langle g^m \rangle$$

per qualche  $m \in \mathbb{Z}$

*Non dimostrato.*

2. I sottogruppi di un gruppo ciclico generato da un elemento di ordine  $n$  ( $g^n = e$ ,  $n$  più piccolo positivo con  $g^n = e$ ) sono anch'essi ciclici e generati da  $\langle g^h \rangle$ ,  $h|n$ .

## 7.10 Osservazione

I sottogruppi di un gruppo ciclico finito verificano la seguente condizione:

$$H \leq \langle g \rangle \Rightarrow |H| \mid o(g) = |\langle g \rangle|$$

L'ordine di un sottogruppo  $H \leq \langle g \rangle$  divide l'ordine dell'elemento  $g$ , che è anche l'ordine del gruppo.

## 7.11 Proposizione

In  $S_n$ , sia  $\sigma(C_1)(C_2)\dots(C_k)$  la fattorizzazione di  $\sigma$  come prodotto dei suoi cicli disgiunti. Allora se  $m_i$  = lunghezza di  $C_i$

$$\text{ordine}(\sigma) = \text{lcm}(m_1, m_2, \dots, m_k)$$

## 7.12 Proposizione - Generatori gruppo ciclico

$G = C_n = \langle g \rangle$  gruppo ciclico generato da un elemento di ordine  $n = \{id, g, g^2, \dots, g^n\}$ .

Tutti e soli i generatori di  $C_n$  sono le potenze di  $g$  con esponente coprimo con  $n$ .

Generatori:  $g^t$ ,  $(t, n) = 1$

## 7.13 Teorema di Lagrange

Se  $G$  è un gruppo finito, allora l'ordine di un sottogruppo divide l'ordine del gruppo:

$$H \leq G \Rightarrow |H| \mid |G| = o(H)|o(G)$$

*Oss: non vale sempre il viceversa.*

Se  $d|o(G) \Rightarrow \exists H \leq G, o(H) = d$

**Dimostrazione:** Siano  $n = o(G)$  e  $m = o(H)$ ,  $i$  il numero di classi laterali destre modulo  $H$ .

$Ci_d$  = indice del sottogruppo  $H$  nel gruppo  $G$ .

$i = |G/\sim_d|$  = numero di classi laterali. Esistono  $a_1, a_2, \dots, a_i$  rappresentanti distinti delle classi laterali.

$$\begin{aligned} G &= Ha_1 \dot{\cup} Ha_2 \dot{\cup} \dots \dot{\cup} Ha_i \Rightarrow |G| = o(G) = \\ &= \sum_{j=1}^i |Ha_j| = \sum_{j=1}^i |H| = i \cdot |H| = i \cdot m \end{aligned}$$

cioè ho  $n = i \cdot m$ .  $ord(G)$  = numero classi laterali destre  $\cdot ord(H)$ .

Da questa relazione deduco che:

1.  $ord(H) | ord(G)$
2.  $i | o(G)$

*Oss:* ripeto tutto per le classi laterali sinistre  $i_s \cdot m = n$ .

### 7.13.1 Corollario 1

Se  $|G| = p$  primo, allora gli unici sottogruppi di  $G$  sono  $H = \{e\}$  oppure  $H = G$  (non ci sono sottogruppi intermedi).

### 7.13.2 Corollario 2

Se  $|G| = \text{primo}$ , allora  $G$  è ciclico (in particolare è abeliano).

**Dimostrazione:** Se  $|G| = p$  primo  $> 1$ .

Sia  $x_0 \in G, x_0 \neq e$ . Sia  $H = \langle x_0 \rangle \neq \{e\}$  ( $H = \{e, x_0, x_0^2, \dots\}$ ), per il *corollario 1*:

$$H = G \Rightarrow G = \langle x_0 \rangle$$

## 7.14 Definizione: indice di un sottogruppo

L'indice di un sottogruppo  $H$  in un gruppo  $G$  è:

$$i = i_s = i_d$$

e si denota:

$$i = [G : H]$$

## 8 Classi laterali di un sottogruppo

### 8.1 Definizione: congruenza destra modulo

Sia  $(G, \cdot)$  un gruppo, sia  $H \leq G$  sottogruppo.

Definiamo congruenza destra modulo  $H$  la relazione così definita:

$$\forall a, b \in G : a \sim_d b \Leftrightarrow a \cdot b^{-1} \in H$$

### 8.2 Proposizione

$\sim_d \pmod{H}$  è una relazione di equivalenza.

**Dimostrazione:**

- (R)  $a \sim_d a$ ?

$$a \cdot a^{-1} = e \in H$$

- (S)  $a \sim_d b \Rightarrow b \sim_d a$ ?

$$ab^{-1} \in H$$

$H$  sottogruppo:

$$\begin{aligned} (ab^{-1})^{-1} &\in H \\ \Rightarrow (b^{-1})^{-1} \cdot a^{-1} &= b \cdot a^{-1} \Rightarrow b \sim_d a \end{aligned}$$

- (T)  $a \sim_d b$  e  $b \sim_d c \Rightarrow a \sim_d c$ ?

$$ab^{-1} \in H \text{ e } bc^{-1} \in H$$

$$(ab^{-1})(bc^{-1}) \in H$$

$H$  è chiuso rispetto al prodotto

$$(ab^{-1})(bc^{-1}) = ac^{-1} \Rightarrow a \sim_d c$$

### 8.3 Insieme quoziente

Dato  $a \in G$ :  $[a]_{\sim_d} = H \cdot a$  dove  $Ha = \{ha : h \in H\}$ ,  $H = \{e, h_1, h_2, \dots\}$ ,  $Ha = \{e \cdot a, h_1 \cdot a, \dots\}$ .

**Dimostrazione:** devo provare 1.  $Ha \subseteq [a]_{\sim_d}$  e 2.  $[a]_{\sim_d} \subseteq Ha$ .

1.

$$b \in Ha$$

$$\Leftrightarrow \exists h : b = ha$$

moltiplicando per  $a^{-1}$

$$\Leftrightarrow h = ba^{-1}$$

$$\Leftrightarrow ba^{-1} \in H$$

$$\Leftrightarrow b \sim_d a \Leftrightarrow b \in [a]_{\sim_d}$$

è la stessa di sopra ma partendo dalla fine verso l'inizio.

## 8.4 Proposizione

Tutte le classi laterali destre hanno la stessa cardinalità.

**Dimostrazione:** dimostro che  $|Ha| = |H| \forall a \in A$  ( $|Ha| = [a]_{\sim_d}$ , per transitività  $|Ha| = |Hb|$ ).

Sia

$$\varphi : H \rightarrow Ha$$

$$h \rightarrow ha$$

- Suriettiva: ogni elemento di  $Ha$  è del tipo  $ha$  per qualche  $h \in H$ .
- Iniettiva:  $\varphi(a) = \varphi(h') \Rightarrow ha = h'a \Rightarrow$  per la cancellatività nel gruppo  $\Rightarrow h = h'$

## 8.5 Definizione: congruenza sinistra modulo

$$\forall a, b \in G, \quad a \sim_s b \Leftrightarrow b^{-1}a \in H$$

La classe laterale sinistra :  $[a]_{\sim_s} = aH = \{ah : h \in H\}$

## 9 Omomorfismi

### 9.1 Isomorfismo

Dati  $(G, *)$  e  $(H, \cdot)$  due gruppi, un isomorfismo di  $G$  in  $H$  è

- $\varphi : G \rightarrow H$  una biiezione.
- $\varphi$  rispetta le operazioni di gruppo, cioè:

$$\forall a, b \in G : \varphi(a * b) = \varphi(a) \cdot \varphi(b), \quad \varphi(a) \text{ e } \varphi(b) \in H$$

Si dice che  $G$  è isomorfo ad  $H$  e si scrive  $G \cong H$ .

### 9.2 Omomorfismo

Se  $\varphi : G \rightarrow H$  conserva le operazioni di  $G$  e  $H$ ,  $\varphi$  si chiama omomorfismo, ovvero un omomorfismo è un'applicazione tale che:

$$\forall a, b \in G : \varphi(a * b) = \varphi(a) \cdot \varphi(b)$$

### 9.3 Epimorfismo

Se  $\varphi$  è suriettiva,  $\varphi$  si chiama epimorfismo.

### 9.4 Monomorfismo

Se  $\varphi$  è iniettiva, si chiama monomorfismo.

### 9.5 Isomorfismo 2

Se  $\varphi$  è biunivoca, allora  $\varphi$  si chiama isomorfismo.

### 9.6 Proposizione

L'isomorfismo tra gruppi è una relazione di equivalenza.

### 9.7 Kernel/Nucleo

Se l'applicazione  $\varphi$  è un omomorfismo, allora viene definito *nucleo* di  $\varphi \subseteq G$

$$Ker(\varphi) : \{x \in G : \varphi(x) = e'\}$$

dove:

$e$  = l'elemento neutro di  $G$

$e'$  = l'elemento neutro di  $G'$



## 9.8 Proposizione

Dato  $\varphi : G \rightarrow G'$  omomorfismo, allora:

1.  $\varphi(e) = e'$
2.  $\varphi(g^{-1}) = (\varphi(g))^{-1}$
3.  $\text{Ker}(\varphi) \leq G$
4.  $\text{Im}\varphi \leq G'$

**Dimostrazione 1:** Per dimostrare che  $\varphi(e)$  è l'elemento neutro di  $e'$  devo mostrare che  $\forall y \in G'$ :  $\varphi(e) \cdot y = y$ ; moltiplicando per  $y^{-1}$  (la cancellazione in  $G'$ ) si ottiene:

$$\begin{aligned}\varphi(e)\varphi\varphi^{-1} &= \varphi\varphi^{-1} \\ \Rightarrow \varphi(e) &= e'\end{aligned}$$

**Dimostrazione 2:** lasciata per esercizio

**Dimostrazione 3:**  $\text{Ker}\varphi \leq G$ ?

- contiene  $e$ : è il punto 1: infatti  $\varphi(e) = e'$
- è chiuso rispetto al prodotto: siano  $a, b \in \text{Ker}\varphi$  e verifichiamo che  $a * b \in \text{Ker}\varphi$ :

$$\begin{aligned}a \in \text{Ker}\varphi &\Rightarrow \varphi(a) = e' \\ b \in \text{Ker}\varphi &\Rightarrow \varphi(b) = e' \\ a * b : \varphi(a * b) &= \varphi(a)\varphi(b) = e' \cdot e' = e' \\ &\Rightarrow a * b \in \text{Ker}\varphi\end{aligned}$$

- è chiuso rispetto agli inversi: sia  $a \in \text{Ker}\varphi$  (cioè  $\varphi(a) = e'$ ) devo provare che  $a^{-1} \in \text{Ker}\varphi$ :

$$\varphi(a^{-1}) = (\varphi(a))^{-1} = (e')^{-1} = e'$$

quindi  $a^{-1} \in \text{Ker}\varphi$

**Dimostrazione 4** TODO: Ricontrollare appunti

## 9.9 Omomorfismo di anelli

Se  $(A, +, \cdot)$  è  $(A', +, \cdot)$  sono anelli  $0_A, 0_{A'}$  i corrispettivi elementi neutri, un omomorfismo di anelli è un'applicazione:

$$\varphi : A \rightarrow A'$$

tale che:

- $\varphi(x_1 + x_2) = \varphi(x_1) + \varphi(x_2) \quad \forall x_1, x_2 \in A$
- $\varphi(x_1 \cdot x_2) = \varphi(x_1) \cdot \varphi(x_2)$

$$\text{Ker}\varphi = \{x \in A : \varphi(x) = 0'_A\} \subseteq A \text{ sottoanello}$$

TODO: \*qui c'è un insieme che non ho capito

### 9.10 Proposizione

$\varphi : (G, *) \rightarrow (G', \cdot)$  omomorfismo di gruppi, allora:

$$\varphi \text{ iniettiva} \Leftrightarrow \text{Ker}\varphi = \{e\}$$

$$\varphi \text{ iniettiva} \Leftrightarrow |\varphi^{-1}(y)| \leq 1 \quad \forall y$$

$$\varphi \text{ iniettiva} + \text{omomorfismo} \Leftrightarrow \varphi^{-1}(e^{-1}) = e$$

**Dimostrazione:**  $\text{Ker} = \text{Ker}\varphi \leq G'$

Consideriamo la congruenza modulo il segno (?)  $k$

$$a \sim_d b \Leftrightarrow ab^{-1} \in K (= \text{Ker}\varphi) \Leftrightarrow \varphi(a * b^{-1}) = e'$$

$\varphi$  è un morfismo:

$$\Leftrightarrow \varphi(a)\varphi(b^{-1}) = e$$

$$\Leftrightarrow \varphi(a)(\varphi(b))^{-1} = e'$$

moltiplicando per  $\varphi(b)$

$$\Leftrightarrow \varphi(a) = \varphi(b)$$

$$\Leftrightarrow \varphi \text{ iniettiva}$$

### 9.11 Proposizione

$G, G' \quad \varphi : G \rightarrow G'$  omomorfismo, allora:

1. Se  $G$  finito, allora l'ordine  $\text{Im}\varphi$  divide l'ordine di  $G$  (ed anche di  $G'$ , se  $G'$  è finito).
2. Se  $G$  è ciclico, allora  $\text{Im}\varphi$  è un sottogruppo ciclico di  $G'$
3. Se  $g \in G$  ha periodo finito, allora il periodo di  $\varphi(g)$  divide l'ordine di  $g$

## 10 Spazi Vettoriali

### 10.1 Definizione spazio vettoriale

Uno spazio vettoriale  $V$  su un campo  $K$  è

- Un insieme nn vuoto  $V$ , in cui sono definite due operazioni, di cui una interna ed una esterna.

**Interna:** somma  $+$ :

$$\begin{aligned} V \times V &\rightarrow V \\ (v, w) &\mapsto v + w \end{aligned}$$

**Esterna:** prodotto  $\cdot$  per uno scalare:

$$\begin{aligned} K \times V &\rightarrow V \\ (c, v) &\mapsto c \cdot v \end{aligned}$$

- $(V, +)$  è un gruppo commutativo
- $K \times V \rightarrow V$  e  $(c, v) \mapsto c \cdot v$  tale che:

– distributività per vettori:

$$\begin{aligned} \forall c \in K, \forall v, w \in V \\ c(v + w) &= cv + cw \\ (v + w)c &= vc + wc \end{aligned}$$

– associatività per gli scalari:

$$\begin{aligned} \forall c, d \in K, \forall v \in V \\ c(dv) &= (cd)v \end{aligned}$$

- distributività per gli scalari:

$$\begin{aligned} \forall c, d \in K, v \in V \\ (c + d)v &= cv + dv \end{aligned}$$

- $1 \cdot v = v$

### 10.2 Scalare

E' un elemento del campo.

### 10.3 Sottospazio vettoriale

Un sottospazio vettoriale di uno spazio vettoriale  $V$  su  $R$  è un sottoinsieme  $W \subseteq V$  non vuoto tale che:  $W$  rispetto le stesse operazioni di  $V$  sia esso stesso uno spazio vettoriale.

- Equivalentemente si deve avere:
  1.  $(W, +)$  è un sotto gruppo di  $(V, +)$
  2. chiuso rispetto alla moltiplicazione per uno scalare
- Equivalentemente:
  1.  $\forall u, v \in W: u - v \in W$  [ $a \cdot b^{-1} \in G$ ]
  2.  $\forall \alpha \in \mathbb{R}, v \in W: \alpha \cdot v \in W$
- Equivalentemente:
  1.  $\forall u, v \in W: u - v \in W$
  2.  $\forall \alpha \in \mathbb{R}, \forall v \in W: \alpha v \in W$   
(Se  $\alpha = -1, v \in W$  allora  $-v \in W$   
 $u \in W$  allora  $u - (-v) = u + v$ )
- Equivalentemente  $W \subseteq V$  è un sottospazio vettoriale  $\Leftrightarrow$ 
  - 1\*  $\forall u, v \in W: u + v \in W$
  - 2\*  $\forall \alpha \in \mathbb{R}, \forall v \in W: \alpha v \in W$

### 10.4 Proposizione

$W \subseteq V, W \neq \emptyset$  è un sottospazio vettoriale  $\Leftrightarrow$ :

$$\forall \alpha, \beta \in \mathbb{R}, \forall u, v \in W: \alpha u + \beta v \in W$$

$\alpha u + \beta v$  si chiama **combinazione lineare** di  $u$  e  $v$ .

**Dimostrazione:** la combinazione lineare è equivalente a 1\* e 2\*. Supponiamo che  $\alpha u + \beta v \in W \forall \alpha, \beta \in \mathbb{R}, \forall u, v \in W$

2\*  $\rightarrow$  in particolare è vero se prendo  $\alpha = \alpha, \beta = 0$ :  $\alpha u + \beta v = \alpha u \in W$ .

1\*  $\rightarrow$  in particolare, se prendo  $\alpha = 1, \beta = -1$ : so che  $1 \cdot u + (-1) \cdot v = u - v \in W$ .

### 10.5 Definizione: traccia

Data una matrice quadrata  $A = [a_{i,j}]$  si chiama traccia della matrice il valore (scalare in  $\mathbb{R}$ ) definito da:

$$tr(A) = a_{11} + a_{22} + a_{33} + \dots + a_{nn}$$

(è la somma degli elementi della diagonale).

## 10.6 Definizione: combinazione lineare

Dati  $v_1, \dots, v_t \in V$  vettori di uno spazio vettoriale  $V$  su  $\mathbb{R}$  dati  $t$  scalari  $c_1, c_2, \dots, c_t \in \mathbb{R}$ , il vettore  $v = c_1 v_1 + c_2 v_2 + \dots + c_t v_t$  si chiama combinazione lineare di vettori  $v_1, \dots, v_t$  tramite gli scalari  $c_1, \dots, c_t$ .

## 10.7 Proprietà di calcolo negli spazi vettoriali

$V$  spazio vettoriale su  $K$ ,  $0$  è lo zero del campo,  $0_V = \underline{0}$  è l'elemento neutro del gruppo  $(V, +)$

- $0v = \underline{0}$  vettore nullo  $\forall v \in V$
- $(-c)v = -(cv) \forall v \in V, \forall c \in \mathbb{R}$
- $c\underline{0} = \underline{0}$
- Se  $cv = \underline{0}$  allora  $c = 0$  oppure  $v = \underline{0}$

## 10.8 Definizione

$w$  è combinazione lineare di  $v_1, v_2, \dots, v_t$  se esistono degli scalari  $c_1, c_2, \dots, c_t \in \mathbb{R}$  tali che:

$$w = c_1 v_1 + \dots + c_t v_t$$

## 10.9 Osservazione: combinazione lineare banale

Lo "zero" vettoriale è sempre combinazione lineare di un insieme  $\{v_1, \dots, v_t\}$  di vettori qualunque:

$$\underline{0} = 0v_1 + 0v_2 + \dots + 0v_t$$

## 10.10 Definizione: linearmente dipendente

Un insieme di vettori  $\{v_1, \dots, v_n\}$  è linearmente dipendente (sul campo di  $V$ )  $\Leftrightarrow$  esistono coefficienti  $c_1, \dots, c_n \in K$  non tutti nulli, tali che:

$$c_1 v_1 + c_2 v_2 + \dots + c_n v_n = \underline{0}$$

## 10.11 Osservazione

Se almeno uno dei coefficienti  $\{c_1, \dots, c_n\}$  è non nullo (sia  $c_j \neq 0$ ), allora si può scrivere (partendo dalla precedente *linearmente dipendente*):

$$c_j v_j = -c_1 v_1 - c_2 v_2 - \dots - c_{j-1} v_{j-1} - c_{j+1} v_{j+1} - \dots - c_n v_n$$

e  $c_j \neq 0 \Rightarrow \exists c_j^{-1}$  allora:

$$v_j = -\frac{c_1 v_1}{c_j} - \frac{c_2 v_2}{c_j} - \dots - \frac{c_n v_n}{c_j}$$

### 10.12 Osservazione: linearmente indipendente

$\{v_1, \dots, v_n\}$  è un insieme linearmente **indipendente**  $\Leftrightarrow \underline{0} = c_1 v_1 + \dots + c_n v_n \Leftrightarrow c_1 = c_2 = \dots = c_n = 0$ .

Ovvero:  $\{v_1, \dots, v_n\}$  sono vettori linearmente indipendenti  $\Leftrightarrow$  l'unica combinazione lineare di  $v_1, \dots, v_n$  è la combinazione lineare banale.

### 10.13 Osservazione

Il vettore nullo  $\underline{0}$  di  $V$  è sempre linearmente dipendente da qualunque insieme finito di vettori.

Infatti sia  $\{u_1, \dots, u_z\} \subseteq V$  allora:

$$\underline{0} = 1 \cdot \underline{0} = 0u_1 + 0u_2 + \dots + 0u_t$$

(un modo equivalente:  $0u_1 + 0u_2 + \dots + 0u_t - 1 \cdot \underline{0} = \underline{0}$ )

### 10.14 Osservazione

Se  $S \subseteq V$  con  $\underline{0} \in S$ ,  $S = \{\underline{0}, v_1, \dots, v_k\}$  allora  $S$  è un insieme di vettori dipendenti: infatti c'è la dipendenza

$$1 \cdot \underline{0} = 0v_1 + 0v_2 + \dots + 0v_k$$

### 10.15 Osservazione

La proprietà di essere indipendente di  $S \subseteq V$ ,  $S = \{v_1, \dots, v_t\}$  si eredita ai sottoinsiemi, cioè:

$$\forall T \subseteq S, S \text{ indipendente} \Rightarrow T \text{ indipendente}$$

$\{v_1\}$  è un insieme indipendente  $\Leftrightarrow v_1 \neq 0$ ;  $\{\underline{0}\}$  è indipendente.

### 10.16 Sottospazio generato da: span

Dati  $v_1, v_2, \dots, v_t$  vettore di  $V$  (spazio vettoriale su un campo) lo *span* dei vettori  $v_1, \dots, v_t$  è il più piccolo sottospazio vettoriale di  $V$  che contiene  $v_1, \dots, v_t$

$$\text{Span}(v_1, \dots, v_t) = \bigcap_{W \subseteq V, \{v_1, \dots, v_t\} \subseteq W} W$$

Altra notazione *Span*:  $\langle v_1, \dots, v_t \rangle$

### 10.17 Proposizione

$$\text{Span}(v_1, \dots, v_t) = \left\{ \sum_{i=1}^t \alpha_i v_i : \alpha_1, \dots, \alpha_t \in K \right\}$$

Dimostrazione data per esercizio

### 10.18 Sistema di generatori

Dato  $V$  su  $K$  (es.  $K = \mathbb{R}$ ), i vettori  $\{v_1, \dots, v_t\}$  sono un sistema di generatori (o insieme di generatori) per  $V$  se

$$V = \text{Span}(v_1, \dots, v_t)$$

Se  $W \subseteq V$  è un sottospazio, allora  $\{u_1, \dots, u_k\}$  sono generatori (sistema di generatori) per  $W$  se

$$W = \text{Span}(u_1, \dots, u_k)$$

### 10.19 Basi di spazi vettoriali

Dato  $V$  su  $K$ , un insieme  $B = \{v_1, \dots, v_n\} \subseteq V$  si chiama base di  $V$  se:

- $V = \text{Span}(v_1, \dots, v_n)$  cioè  $B$  sono generatori per  $V$ .
- $\{v_1, \dots, v_n\}$  sono indipendenti.

### 10.20 Spazio finitamente generato

Uno spazio vettoriale  $V$  (su  $K$ ), si dice finitamente generato se ammette un insieme finito di generatori.

### 10.21 Proposizione

$B = \{v_1, \dots, v_n\}$  è una base di  $V \Leftrightarrow \forall v \in V \exists! (c_1, \dots, c_n), c_i \in \mathbb{R}$  con  
 $v = c_1 v_1 + c_2 v_2 + \dots + c_n v_n$

**Dimostrazione**  $\Rightarrow$

1. Ipotesi:  $B = \{v_1, \dots, v_n\}$  è una base di  $V$
2. Tesi:  $v = c_1 v_1 + c_2 v_2 + \dots + c_n v_n$

Sia  $v \in V$ . Siccome  $B$  è una base, allora è un insieme di generatori di  $V$

$$\Rightarrow v \in \text{Span}(v_1, \dots, v_n) \Rightarrow \exists c_1, \dots, c_n \text{ con } v = c_1 v_1 + \dots + c_n v_n$$

Perchè sono unici? Siano  $(d_1, \dots, d_n)$  con

$$v = d_1 v_1 + \dots + d_n v_n$$

$$v = c_1 v_1 + \dots + c_n v_n$$

$$\begin{aligned} \Rightarrow v - v &= 0 = d_1 v_1 + \dots + d_n v_n - (c_1 v_1 + \dots + c_n v_n) = \\ &= (d_1 - c_1) v_1 + \dots + (d_n - c_n) v_n \end{aligned}$$

ma  $v_1, \dots, v_n$  sono indipendenti  $\Rightarrow$  i coefficienti  $(d_k - c_k)$  sono tutti nulli.

*Dimostrazione*  $\Leftarrow$  fare per esercizio

### 10.22 N-upla delle coordinate di $v$ in base $B$

Data  $B = \{v_1, \dots, v_n\}$  una base ordinata di  $V$ , se  $v = c_1v_1 + \dots + c_nv_n$  allora il vettore colonna  $\begin{bmatrix} c_1 \\ \vdots \\ c_n \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^n$  si chiama vettore delle coordinate di  $v$  in base  $B$ .

### 10.23 Corollario

Fissata una base  $B = \{v_1, \dots, v_n\}$  di  $V$  l'applicazione  $\varphi : V \rightarrow K^n$  ( $K$  è il campo di  $V$ ) che manda  $v$  in  $\varphi(v) = \begin{bmatrix} c_1 \\ \vdots \\ c_n \end{bmatrix}$  (cioè il vettore nelle sue coordinate in base  $B$ ) è una biiezione.

### 10.24 Teorema: esistenza di una base

Se  $V$  è uno spazio vettoriale finitamente generato (cioè se  $V = \text{Span}(v_1, \dots, v_h)$ ) allora esiste una base  $\{w_1, \dots, w_n\}$  di  $V$ .  
*Non dimostrato.*

### 10.25 Proposizione

Date due basi  $B = \{v_1, \dots, v_n\}$  e  $B' = \{w_1, \dots, w_m\}$  di  $V$  allora  $n = m$ .

### 10.26 Dimensione di $V$

Se  $V$  è finitamente generato, allora si chiama dimensione di  $V$  la cardinalità di una qualunque base di  $V$ .

### 10.27 Osservazione (notazione)

Se la dimensione di  $V$  è  $n$ , allora  $\varphi : V \rightarrow K^n$  si scrive  $\dim_K V = n$  se  $|B| = n$ .

### 10.28 Teorema del completamento di una base

Sia  $B = \{v_1, \dots, v_n\}$  una base di  $V$ , e sia  $\{w_1, \dots, w_p\}$  con  $\{p \leq n\}$  un insieme di vettori indipendenti. Allora posso completare  $\{w_1, \dots, w_p\}$  con  $(n-p)$  vettori di  $B$  a formare una base (ovvero posso sostituire  $p$  vettori di  $B$  un altro insieme di  $p$  vettori indipendenti).

*Dimostrazione fatta parzialmente da vedere sul libro se si vuole la lode.*

### 10.29 Teorema

Le seguenti condizioni sono equivalenti tra loro per un insieme  $B = \{v_1, \dots, v_n\} \subseteq V$  di  $n$  vettori:



1.  $B$  è una base.
2.  $B$  è un insieme di generatori minimale (cioè ogni sottoinsieme  $S$  proprio di  $V$  genera un sottospazio  $Span(S) \subsetneq V$ )
3.  $B$  è un insieme di vettori linearmente indipendenti massimale (cioè ogni  $T \not\supseteq B$  insieme di vettori che contiene  $B$  non è più indipendente).

### 10.30 Corollario

Se  $V$  è finitamente generato e  $B = \{v_1, \dots, v_n\}$   $B' = \{v'_1, \dots, v'_m\}$  sono basi di  $V$  allora  $|B| = |B'|$  ( $n = m$ ).

**Dimostrazione:** per assurdo  $m < n$ , allora con il teorema del completamento costruisco  $B'' = B' \cup \{n - m \text{ vettori}\}$ .  $B'$  è una base, ma per il pt.3 del teorema precedente,  $B'$  è un insieme massimale  $\Rightarrow$  contraddizione.

### 10.31 Osservazioni

- Se  $\dim_K V = n$  allora ogni sottoinsieme di  $n$  vettori indipendenti è anche un insieme di generatori.
- Se  $\dim_K V = n$  allora ogni insieme di  $n$  che generano  $V$  è anche un insieme indipendente (cioè una base).
- Se  $W \leq V$ , sottospazio di  $V$  con  $\dim_K V = n$  allora:
  - $\dim_K W \leq \dim_K V$
  - $\dim_K W = \dim_K V \Leftrightarrow W = V$
  - $W \neq \{0_V\} \Leftrightarrow \dim_K W > 0$

### 10.32 Somma di sottospazi

Dati  $U, W \leq V$  ( $V$  spazio vettoriale su  $R$ ):

1. L'intersezione  $U \cap W$  è anche un sottospazio di  $V$

$$U \cap W = \{v \in V : v \in U \wedge v \in W\}$$

*Dimostrazione per esercizio*

2. (L'unione di due sottospazi non è, in generale, un sottospazio (a meno che non siano uno contenuto nell'altro)). Il più piccolo sottospazio di  $V$  che contiene sia  $U$  che  $W$  si chiama la **somma** di  $U$  e  $W$  e si denota:

$$U + W = Span(U \cup W)$$

### 10.33 Proposizione

$$U + W = \{u + w : u \in U, w \in W\}$$

*Per esercizio verificare che  $u+w$  è un sottospazio che contiene  $U \cup W$  e  $\text{Span}(U + W)$*

### 10.34 Teorema di Grossman

$$\dim_K(U + W) = \dim_K U + \dim_K W - \dim_K(U \cap W)$$

### 10.35 Somma diretta di sottospazi

Quando  $U \cap W = \{0_V\}$ , cioè ha dimensione 0, allora si parla di somma diretta di sottospazi e si scrive:

$$U \oplus W$$

### 10.36 Proposizione

Se  $U \cap W = \{0_V\}$  allora ogni vettore di  $U \oplus W$  si scrive come somma di un elemento di  $U$  più un elemento di  $W$  in modo unico.

**Dimostrazione:** supponiamo che  $v_0 \in U + W$  si scriva in due modi diversi:

$$v_0 = u + w = u' + w' \quad (\text{con } u, u' \in U; w, w' \in W)$$

$$\Rightarrow v_0 - v_0 = 0 = u + w - (u' + w') =$$

$$(u + u') + (w - w') = 0$$

$$\Rightarrow u + u' \in U \cap W = \{0_V\}$$

$$\Rightarrow u + u' = 0 \Rightarrow u = -u'$$

$$\Rightarrow w - w' = 0 \Rightarrow w = w'$$

## 11 Sistemi di equazioni lineari

### 11.1 Scrittura

Ogni sistema di equazioni lineari si può scrivere nella forma:

$$AX = K$$

$X$  è la colonna delle incognite,  $K$  la colonna dei termini noti del sistema

### 11.2 Risolvere sistema di equazioni

Una soluzione del sistema è una  $n$ -upla di reali i cui valori  $s_1, \dots, s_n$  sostituiti alle incognite le rendano tutte vere. cioè:

$$S = \begin{bmatrix} s_1 \\ \dots \\ s_n \end{bmatrix}$$

con

$$A \cdot S = K$$

### 11.3 Sistemi equivalenti

Due sistemi  $AX = K$  e  $BX = K$  sono equivalenti se hanno esattamente le stesse soluzioni.

#### 11.3.1 Operazioni elementari di riga

- $L = L_{ij}$  scambio riga  $i$  e riga  $j$
- $L = L_i(c)$  multiplico la riga  $i$  per la costante  $c$
- $L = L_{ij}(c)$  sostituisco alla riga  $i$  la riga ottenuta sommando ad  $i$   $c$  volte la riga  $j$ ,  $c \neq 0$

### 11.4 Equivalenza per riga

Due matrici  $A$  e  $B$  dello stesso ordine  $n \times m$  sono equivalenti per riga se  $B$  si ottiene da  $A$  per applicazione successiva di un numero finito di *operazioni elementari* di riga, cioè se:

$$B = L_k \dots L_2 L_1(A)$$

e si scrive:

$$A \sim B$$

### 11.5 Proposizione

L'equivalenza per riga è una relazione di equivalenza. *Dimostrazione sulle note della prof.*

## 11.6 Proposizione

Siano  $A, B$  matrici  $m \times n$ , se una successione di operazioni elementari di riga trasforma  $A$  in  $B$ , allora le stesse operazioni trasformano la matrice identica in una matrice  $P$  tale che  $B = P \cdot A$ .

In altre parole

$$[A|I] \sim [B|P]$$

## 11.7 Matrice identica

$$I = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 & 0 \\ & & & \dots & & \\ & & & \dots & & \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

## 11.8 Corollario

Se  $A \in M_n(\mathbb{R})$  ed è invertibile, allora l'inversa si trova applicando la riduzione per righe alla matrice  $A$  aumentata della matrice  $I$ , cioè:

$$[A|I] \sim [I|A^{-1}]$$

## 11.9 Teorema

Per ogni matrice  $A$   $m \times n$  esiste una matrice  $R$   $m \times n$ :

- ridotta a scala
- $A \sim R$  (riga equivalente ad  $A$ )

## 11.10 Rango

Si chiama rango di una matrice  $A$  il numero di pivot di una ridotta scala  $R$  riga-equivalente ad  $A$

## 11.11 Pivot

Primo elemento non nullo in una riga della matrice.

## 11.12 Rango pieno

Una matrice  $A$  è di rango pieno se  $rg(A) = m$  ( $m$ =massimo possibile cioè il numero di righe).

### 11.13 Proposizione: proprietà del rango

Il rango di  $A$  ha le seguenti proprietà:

1. Se  $A \sim B$  allora  $rg(A) = rg(B)$  ( $A \sim R \Rightarrow B \sim R$ )
2. Se  $A$  è di ordine  $m \times n$ , allora  $rg(A) \leq \min\{m, n\}$
3.  $rg(A \cdot B) \leq \min\{rg(A), rg(B)\}$
4.  $rg(A^t) = rg(A)$ , dove  $A^t$  è la matrice trasposta di  $A$  definita:  $(A^t)_{ij} = a_{ij}$  (*scambia le righe con le colonne*).

### 11.14 Teorema: Rouchè-Capelli

Dato un sistema  $AX = K$ , allora:

1. Se  $rg([A|K]) > rg(A)$ , allora il sistema è incompatibile: non ci sono soluzioni.
2. Se  $rg([A|K]) = rg(A)$ , allora ho due casi:
  - (a) Se  $n = r = rg(A)$ : rango massimo, c'è una sola soluzione.
  - (b) Se  $r = rg(A) < n$ : ho infinite soluzioni che saranno parametriche, con tanti parametri quante le colonne non pivot (tanti parametri quanto  $n - rg(A)$ ).

## 12 Studio dei sistemi omogenei

### 12.1 Proposizione

Sia  $AX = 0$  un sistema lineare omogeneo (con  $A \in M_{m \times n}(\mathbb{R})$ ). Allora

$$W = \left\{ X = \begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^n : AX = 0 \right\}$$

L'insieme delle soluzioni del S.L.O. è un sottospazio di  $\mathbb{R}^n$

**Dimostrazione** Se  $X, X'$  sono in  $W$  allora  $\alpha X + \beta X' \in W$ ?  $A(\alpha X + \beta X') = \alpha AX + \beta AX' = \alpha \underline{0} + \beta \underline{0} = \underline{0}$

### 12.2 Teorema: Struttura sulle soluzioni di un sistema

Sia  $AX = b$  un sistema lineare ( $b$  colonna dei termini noti). Sia  $v_0 \in \mathbb{R}^n$  una soluzione del sistema  $AX = b$ .  $v = \begin{bmatrix} v_1 \\ \vdots \\ v_n \end{bmatrix}$  (una soluzione "particolare") Allora ogni altra soluzione di  $AX = b$  si scrive nella forma

$$v = v_0 + w \quad (\text{soluzione generale})$$

al variare di  $w \in W = \{X : AX = \underline{0}\}$  cioè al variare di  $w$  nelle soluzioni del sistema lineare omogeneo associato  $AX = \underline{0}$ .

$$(Av_0 = b, Aw = \underline{0} \Leftrightarrow A(v_0 + w) = b \Rightarrow Av_0 + Aw = b + \underline{0} = b)$$

### 12.3 Nota importante

$A(X + Y) = AX + AY$ : la moltiplicazione per una matrice è quindi lineare.

## 13 Applicazioni lineari

### 13.1 Definizione: applicazione lineare (trasformazione lineare o homomorfism of vector space)

Un'applicazione lineare è un'applicazione  $T : V \rightarrow W$  di spazi vettoriali su  $K$  tale che  $\forall v, v_1, v_2 \in V, \forall \lambda \in K$  si ha:

1.  $T(v_1 + v_2) = T(v_1) + T(v_2)$  ( $T$  è additiva)
2.  $T(\lambda \cdot v) = \lambda \cdot T(v)$  ( $T$  è omogenea)

(additiva+omogenea = è lineare).

In altre parole  $T$  conserva le operazioni di spazio vettoriale.

### 13.2 Proposizione

Punti  $1 + 2 \Leftrightarrow 3 : \forall \lambda \mu \in K, \forall v_1, v_2 \in V$

$$T(\lambda v_1 + \mu v_2) = \lambda T(v_1) + \mu T(v_2)$$

$T$  manda combinazioni lineari in combinazioni lineari (con gli stessi scalari) dei trasformati.

### 13.3 Definizione

Fissata  $A \in \mathcal{M}_{mn}(\mathbb{R}) : A = \begin{bmatrix} a_{11} & \dots & a_{1n} \\ \dots & \dots & \dots \\ a_{m1} & \dots & a_{mn} \end{bmatrix}$ , sia  $L_A : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$  definita da:

$$X \begin{bmatrix} x_1 \\ \dots \\ x_n \end{bmatrix} \mapsto L_A(x) := AX = \begin{bmatrix} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n \\ \dots \\ a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^m$$

La trasformazione  $L_A$  è la moltiplicazione (a destra) per  $A$ :

$$L_A : X \mapsto AX$$

ad ogni matrice  $A$  corrisponde una trasformazione lineare  $L_A$ .

*Per esercizio: dimostrare che  $L_A : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$  è lineare.*

- $L_A(X + Y) = L_A(X) + L_A(Y)$ ? (*dimostrazione su appunti*)
- $L_A(\lambda X) = \lambda L_A(X)$ ?

### 13.4 Definizione

Data una trasformazione lineare  $T : V \rightarrow W$ , restano determinati due sottoinsiemi:

- Il nucleo di  $T$ :  $\text{Ker}T$

$$\text{Ker}T = \{v \in V : T(v) = 0_W\} \subseteq V$$

- L'immagine di  $T$ :  $\text{Im}T$

$$\text{Im}T = \{T(v) : v \in V\} \subseteq W$$

### 13.5 Proposizione (risolvere per esercizio)

1.  $\text{Ker}T \leq V$
2.  $\text{Im}T \leq W$
3.  $T$  suriettiva  $\Leftrightarrow \text{Im}T = W$
4.  $T$  iniettiva  $\Leftrightarrow \text{Ker}T = \{0\}$

### 13.6 Osservazione (!)

Calcolare il nucleo di un'applicazione lineare corrisponde a risolvere un sistema omogeneo.

### 13.7 Proposizione

Un'applicazione lineare  $T : V \rightarrow W$  è definita univocamente (ovvero è determinata) quando si conoscono le immagini di  $T$  sui vettori  $\{v_1, \dots, v_n\}$  di una base di  $V$ , se  $\dim V = n$ : ovvero basta conoscere  $T(v_1), \dots, T(v_n) \in W$  per conoscere tutta la trasformazione lineare  $T$ .

**Dimostrazione** Se conosco  $T$  su  $v_1, \dots, v_n$  allora  $v$  si scrive come  $v = \alpha_1 v_1 + \dots + \alpha_n v_n$  (perchè  $\mathcal{B} = \{v_1, \dots, v_n\}$  genera  $v$ ).  $T$  è lineare:

$$T(v) = T(\alpha_1 v_1 + \dots + \alpha_n v_n) = \alpha_1 T(v_1) + \dots + \alpha_n T(v_n)$$

Questo determina univocamente  $T$ :

*Devo dimostrare che se esiste un'altra applicazione lineare  $S \neq T$  ma che coincide con  $T$  sulla base, allora ho una contraddizione.* Sia  $S$  un'altra applicazione  $S : V \rightarrow W$  con  $T(v_i) = S(v_i) \forall i = 1, \dots, n$  allora

$$S(v) = \alpha_1 S(v_1) + \dots + \alpha_n S(v_n) = \alpha_1 T(v_1) + \dots + \alpha_n T(v_n) = T(v)$$

$T$  è determinata completamente dai suoi valori su una base  $B$  di  $V$ .



### 13.8 Corollario

Due applicazioni lineari coincidono  $\Leftrightarrow$  coincidono sui vettori di una base.

### 13.9 Corollario

Se  $\mathcal{B} = (v_1, \dots, v_n)$  base ordinata di  $V$  e se  $T : V \rightarrow W$  lineare, allora  $ImT = Span(\{T(v_1), \dots, T(v_n)\})$ : cioè i vettori immagine della base di  $V$  generano l'immagine della trasformazione.

In particolare, se  $T = L_A$ , trasformazione lineare associata ad  $A = \begin{bmatrix} a_{11} & \dots & \dots \\ & \dots & \dots \\ & & a_{mn} \end{bmatrix}$

$$T : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$$

$$X \rightarrow AX = T(x)$$

allora

$$\begin{aligned} ImT &= Im(L_A) = Span(T(e_1), \dots, T(e_n)) \\ &= Span(A \cdot e_1, A \cdot e_2, \dots, A \cdot e_n) \end{aligned}$$

dove

$$A \cdot e_i = A \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ i \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} = A^{(i)}$$

(Quindi questo punto del corollario ci dice che  $Im(L_A) = Span(\text{Colonne di } A)$ )

$$\begin{aligned} dim Im(L_A) &= \text{dimensione spazio generato dalle colonne} \\ &= \text{numero dei pivot di una ridotta scala equivalente ad } A \end{aligned}$$

### 13.10 Definizione: rango trasformazione lineare

1. Il rango di una trasformazione lineare  $T : V \rightarrow W$  è  $rg(T) = dim_K Im(T)$ .
2. Il rango di  $L_A$  è la dimensione dell'immagine di  $L_A$ , che è il rango della matrice  $A$ ,  $ImL_A = \{AX : X \in \mathbb{R}^n\}$ .

### 13.11 Teorema della dimensione

Sia  $T : V \rightarrow W$  trasformazione lineare. Allora:

$$dimV = dim_K KerT + dim_K ImT$$

Sia  $\{u_1, \dots, u_s\} \subseteq V$  una base di  $KerT$

- Generano  $KerT$

- Sono indipendenti
- $T(u_1) = \dots = T(u_s) = 0$

Per il teorema del completamento: completo  $\{u_1, \dots, u_s\}$  ad una base di  $V$ , quindi sia  $\{u_1, \dots, u_s, w_1, \dots, w_{n-s}\}$  base di  $V$ . Si candidano a base di  $W$  i vettori  $\{w_1, \dots, w_{n-s}\}$ .

Dobbiamo mostrare che  $t = \{T(w_1), \dots, T(w_{n-s})\}$  è una base di  $ImT$ , cioè che  $rgT = n - s = \dim V - \dim KerT$

1.  $t$  genera  $Im(T)$ : sappiamo (dal corollario) che l'immagine  $ImT$  è lo span di  $(T(u_1), T(u_2), \dots, T(u_s), T(w_1), \dots, T(w_{n-s})) = Span(0_w, T(w_1), \dots, T(w_{n-s}))$
2. Vediamo che  $T(w_1), \dots, T(w_{n-s})$  sono indipendenti.  
Supponiamo  $\alpha_1, \dots, \alpha_{n-s} \in \mathbb{R}$  tali che:

$$\alpha_1 T(w_1) + \dots + \alpha_{n-s} T(w_{n-s}) = 0$$

$$\Leftrightarrow T(\alpha_1 w_1 + \dots + \alpha_{n-s} w_{n-s}) = 0 \quad (T \text{ e' lineare})$$

$$\Leftrightarrow \alpha_1 w_1 + \dots + \alpha_{n-s} w_{n-s} \in KerT$$

$$\Rightarrow \beta_1, \dots, \beta_s : \alpha_1 w_1 + \dots + \alpha_{n-s} w_{n-s} = \beta_1 u_1 + \dots + \beta_s u_s$$

$$\alpha_1 w_1 + \dots + \alpha_{n-s} w_{n-s} - \beta_1 u_1 - \dots - \beta_s u_s = 0$$

ed è una combinazione lineare dei vettori di una base di  $V$  che dà 0

$$\Rightarrow \alpha_1 = \alpha_2 = \dots = \alpha_{n-s} = -\beta_1 = \dots = -\beta_s = 0$$

### 13.12 Osservazione

Se  $v_1, \dots, v_n$  sono i vettori colonna di  $\mathbb{R}^n$ ; sia  $A = \begin{bmatrix} v_1 & v_2 & \dots & v_n \end{bmatrix}$  la matrice  $m \times n$  formata dai vettori.

Allora una combinazione lineare delle colonne  $v_1, \dots, v_n$  con gli scalari  $\alpha_1, \dots, \alpha_n$  ( $\alpha_1 v_1 + \dots + \alpha_n v_n$ ) è la stessa cosa di:

$$A_{(m \times n)} \cdot \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \dots \\ \alpha_n \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^m$$

### 13.13 Proposizione

- a)  $S, T : V \rightarrow W$ ,  $S, T$  lineari,  $V, W$  spazi vettoriali allora:  $S + T$ ,  $\lambda \cdot S$  sono lineari.  
Dove  $(S + T)(v) := S(v) + T(v) : \forall v \in V \quad (S + T : V \rightarrow W)$   
e dove  $(\lambda S)(v) := \lambda S(v) \quad (\lambda S : V \rightarrow W)$
- b) Siano  $S : U \rightarrow V$ ,  $T : V \rightarrow W$  allora è possibile definire la composta  $T \circ S : U \rightarrow W$ , e  $T \circ S$  è lineare.

**Dimostrazione punto b) (la a) per esercizio)**

Da dimostrare:  $T \circ S$  è lineare  $\Leftrightarrow T \circ S(\alpha v_1 + \beta v_2) = \alpha(T \circ S)(v_1) + \beta(T \circ S)(v_2)$

$$(T \circ S)(\alpha v_1 + \beta v_2) = T(S(\alpha v_1 + \beta v_2)) =$$

$$T(\alpha S(v_1) + \beta S(v_2)) = \quad (S \text{ è lineare})$$

$$\alpha T(S(v_1)) + \beta T(S(v_2)) = \quad (T \text{ è lineare})$$

$$\alpha(T \circ S)(v_1) + \beta(T \circ S)(v_2)$$

$$\Rightarrow T \circ S \text{ è lineare}$$

**13.14 Conseguenze della proposizione**

a) L'insieme  $\mathcal{L}(V, W) = \{T : V \rightarrow W, T \text{ lineare}\}$  è uno spazio vettoriale

b)  $\mathcal{L}(V, V)$  l'insieme delle trasformazioni lineari da  $V$  in se

$$T : V \rightarrow V \quad T \circ S$$

$$S : V \rightarrow V \quad S \circ T$$

$$(\mathcal{L}(V, V), +, \cdot)$$

- è un anello non commutativo
- unitario  $id : V \rightarrow V$ ,  $T \cdot id = id \cdot T = T$  (elemento neutro è l'unità del prodotto)
- $0_V : V \rightarrow V$  ( $v \mapsto 0_V$ ) trasformazione lineare nulla (elemento neutro della somma)

c) Se in  $\mathcal{L}(V, V)$  ci restringiamo a guardare le trasformazioni invertibili:  $(\{T : V \rightarrow V : T \text{ lineare e invertibile}\}, \cdot)$  è un gruppo commutativo.

**13.15 Osservazione: iniettività, suriettività**

Sia  $T : V \rightarrow W$  lineare e  $\dim V = \dim W$ , allora:

- $T$  invertibile  $\Leftrightarrow T$  iniettiva
- $T$  invertibile  $\Leftrightarrow T$  suriettiva

**13.16 Osservazione: isomorfismo**

$V$  e  $W$  sono isomorfi (**notazione:**  $V \cong W$ )  $\Leftrightarrow \exists T : V \rightarrow W$  con  $T$  biunivoca.

### 13.17 Esempio isomorfismo

$V$  dimensione finita  $n$ ;  $B = (v_1, \dots, v_n)$  base ordinata.

$$f_B : V \rightarrow \mathbb{R}^n$$

$$v \mapsto f_B(v) = \begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} \text{ dove } v = x_1 v_1 + \dots + x_n v_n$$

$f_B(v)$  sono le coordinate di  $v$  in base  $B$ . Si ha che  $f_B$  è un isomorfismo di  $V$  in  $\mathbb{R}^n$ .

L'isomorfismo  $V \xrightarrow{f_B} \mathbb{R}^n$  non è canonico, cioè dipende dalla scelta di una base.

**Conseguenza importante:** tutti gli spazi vettoriali di dimensione  $n$  su  $K$  sono tutti isomorfi a  $K^n$ .

### 13.18 Teorema

$$\mathcal{L}(\mathbb{R}^n, \mathbb{R}^m) \cong \mathcal{M}_{m,n}(\mathbb{R})^{\rightarrow [m \cdot n]}$$

**Dimostrazione:** abbiamo visto già come associare ad una matrice  $A_{m \times n}$  un'applicazione lineare di  $\mathbb{R}^n$  in  $\mathbb{R}^m$ .

$A \mapsto L_A$  la trasformazione lineare da  $\mathbb{R}^n$  in  $\mathbb{R}^m$  che agisce per moltiplicazione.

$$L_A : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$$

$$X \mapsto AX$$

$$L : \text{Matrici } m \times n \rightarrow \mathcal{L}(\mathbb{R}^n, \mathbb{R}^m)$$

$$A \mapsto L(A) = L_A$$

- $L$  è biunivoca? C'è l'inversa?
- $L$  è lineare? *Fare da soli*

*Inizio dimostrazione primo punto:*

$$L : \mathcal{M}_{m,n}(\mathbb{R}) \rightarrow \mathcal{L}(\mathbb{R}^n, \mathbb{R}^m)$$

$$A \leftarrow T$$

Ora

$$T : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$$

$$e_1 \mapsto T(e_1) \in \mathbb{R}^m$$

$$\vdots$$

$$e_n \mapsto T(e_n) \in \mathbb{R}^m$$

Sia  $A := [T(e_1) \ T(e_2) \ \dots \ T(e_n)]$  è una matrice  $m \times n$ .

Devo mostrare che  $L_A = T$  (*completare da soli!*)

### 13.19 Osservazione

Si può dimostrare che  $L_A \cdot L_B = L_{A \cdot B}$

### 13.20 Proposizione: ricapitolazione sulle matrici invertibili

Le seguenti sono equivalenti:

1.  $A \in \mathcal{M}_{m,n}(\mathbb{R})$  è invertibile (rispetto al prodotto di matrici)
2.  $L_A : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$  è invertibile
3.  $L_A$  è iniettiva
4.  $L_A$  è suriettiva
5.  $\text{Ker} A = \{0\}$
6.  $\text{Im} L_A = \mathbb{R}^n$  ( $= \text{Im} A$ )
7.  $\text{rg} A = n$
8. Le colonne di  $A$  sono indipendenti
9. Le righe di  $A$  sono indipendenti
10.  $AX = \underline{0}$  ha l'unica soluzione  $X = \underline{0}$
11.  $\forall \underline{b} \in \mathbb{R}^n$  il sistema  $AX = \underline{b}$  ammette unica soluzione (è  $X = A^{-1} \cdot \underline{b}$ )
12. I pivot di una ridotta scala sono tutti non nulli
13.  $\exists B \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R}) : BA = I_n = \begin{bmatrix} 1 & \dots & 0 \\ & \dots & \\ 0 & \dots & 1 \end{bmatrix}$  (*tutti 1 sulla diagonale, resto 0*)  
[inversa a sinistra]
14.  $\exists C \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R}) : AC = I_n = \begin{bmatrix} 1 & \dots & 0 \\ & \dots & \\ 0 & \dots & 1 \end{bmatrix}$  (*tutti 1 sulla diagonale, resto 0*)
15.  $[A|I] \sim [I|C]$  ( $C^{-1}$  sarà l'inversa)
16.  $\det(A) \neq 0$

### 13.21 Determinante di una matrice quadrata

$$\det : \mathcal{M}_n(\mathbb{R}) \rightarrow \mathbb{R}$$

$$A \mapsto \det(A) \text{ (è un numero)}$$

### 13.21.1 Sistemi $AX = \underline{0}$

$A$  è invertibile  $\Leftrightarrow AX = \underline{0}$  ha unica soluzione.

### 13.21.2 $n = 1$

$A = [a] \ a \in \mathbb{R}; \ X = x; \ \underline{0} = 0.$

$ax = 0$  ha unica soluzione  $\Leftrightarrow a \neq 0 \Leftrightarrow a^{-1}ax = a^{-1}0 \ (x = 0)$

(se  $a = 0 : 0 \cdot x = 0$  ha infinite soluzioni). Qui se pongo  $\det(a) = a$  ottengo:

$$[a] = A \text{ invertibile} \Leftrightarrow \det(A) = a \neq 0$$

TODO: CONTROLLARE SUL LIBRO

### 13.21.3 $n = 2$

$A$  invertibile  $\Leftrightarrow AX = \underline{0}$  ha unica soluzione  $\Leftrightarrow a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21} \neq 0$ . Dimostrazione su appunti lezione 33.

**Definisco:**

$$\det A = \det \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} = a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21}$$

### 13.21.4 $n = 3$

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix}$$

$a_{11} \ a_{22} \ a_{33} +$	$\begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 1 & 2 & 3 \end{pmatrix} = (1)(2)(3)$	segno pari
$a_{12} \ a_{23} \ a_{31} +$	$\begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 2 & 3 & 1 \end{pmatrix} = (123)$	$\varepsilon(\sigma) = 1$
$a_{13} \ a_{21} \ a_{32} +$	$\begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 3 & 1 & 2 \end{pmatrix} = (132)$	
$-a_{13} \ a_{22} \ a_{31}$	$\begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 3 & 2 & 1 \end{pmatrix} = (13)$	segno dispari
$-a_{11} \ a_{23} \ a_{32}$	$\begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 1 & 3 & 2 \end{pmatrix} = (23)$	$\varepsilon(\sigma) = -1$
$-a_{12} \ a_{21} \ a_{33}$	$\begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 2 & 1 & 3 \end{pmatrix} = (12)$	

### 13.21.5 Definizione determinante

Data  $A \in M_n(\mathbb{R})$ , si definisce il determinante di  $A$  come:

$$\det A = \sum_{\sigma \in S_n} \varepsilon(\sigma) a_{1(\sigma 1)} a_{2(\sigma 2)} \dots a_{n(\sigma n)}$$

NOTA: Esempio di matrice di permutazione su slides lezione 34.

### 13.21.6 Proprietà del determinante

- $\det A = \det A^t$
- Se  $A$  ha una colonna tutta nulla, allora  $\det A = 0$  ( $A^{(1)} \ A^{(2)} \dots \underline{0} \dots A^{(n)}$ )  
colonne dipendenti.
- Se  $A$  ha una riga nulla allora il  $\det A = 0$  ( $\det A = \det A^t$ ).
- Se due colonne di  $A$  sono uguali, allora  $\det A = 0$ .
- Se due righe di  $A$  sono uguali, allora  $\det A = 0$ .
- Se due colonne (risp. righe) sono proporzionali, cioè se  $A = [A^{(1)} \dots A^{(i)} \dots \lambda A^{(i)} \dots A^{(n)}]$   
allora  $\det A = 0$  ( $\lambda A^{(i)}$  è la colonna  $j$ ).
- Il valore del determinante non cambia se sommiamo ad una riga (vale anche l'analogo per le colonne) il multiplo di un'altra:

$$A = \begin{bmatrix} A_{(1)} \\ \vdots \\ A_{(i)} \\ \vdots \\ A_{(n)} \end{bmatrix} \xrightarrow{L_{ij}(\lambda)} B = \begin{bmatrix} A_{(1)} \\ \vdots \\ A_{(i)} + A_{(j)} \\ \vdots \\ A_{(n)} \end{bmatrix}$$

allora  $\det(A) = \det(B)$ .

- Se in  $A$  si scambiano due colonne (o due righe)

$$A = \begin{bmatrix} A_{(1)} \\ \vdots \\ A_{(i)} \\ \vdots \\ A_{(j)} \\ \vdots \\ A_{(n)} \end{bmatrix} \xrightarrow{L_{ij}} B = \begin{bmatrix} A_{(1)} \\ \vdots \\ A_{(j)} \\ \vdots \\ A_{(i)} \\ \vdots \\ A_{(n)} \end{bmatrix}$$

allora  $\det A = -\det B$ .

### 13.21.7 Teorema di Binet

Siano  $A, B$  matrici quadrate  $n \times n$  allora:

$$\det(A \cdot B) = \det(A) \cdot \det(B)$$

(cioè il determinante è una funzione moltiplicativa sulle matrici).

!! non è additiva:  $\det(A + B) \neq \det(A) + \det(B)$

### 13.21.8 Corollario di Binet

$$\det(A^{-1}) = \frac{1}{\det(A)}$$

se  $A$  è invertibile.

### 13.21.9 Teorema di Laplace

Calcolo del determinante col metodo di Laplace.

Data  $A$   $n \times n$ ,  $n \geq 2$ , si ha che (sviluppo lungo la colonna  $j$  quindi  $A^{(j)}$ ):

$$\begin{bmatrix} a_{1j} \\ a_{2j} \\ \vdots \\ a_{nj} \end{bmatrix}$$

$$\det A = a_{1j}\alpha_{1j} + a_{2j}\alpha_{2j} + \dots + a_{nj}\alpha_{nj}$$

dove  $\alpha_{ij}$  si chiama cofattore della matrice  $A$ , ed è definito come:

$$\alpha_{ij}(-1)^{i+j} \cdot \det A_{ij}$$

$A_{ij}$ : sottomatrice di  $A$  che si ottiene cancellando la riga  $i$  e la colonna  $j$

1. ovvero: (formula per la colonna  $j$ )

$$\det(A) = \sum_{i=1}^n (-1)^{i+j} a_{ij} \det(A_{ij})$$

$i$ : varia l'indice di riga;  $j$  è fisso.

2. formula (sviluppo) lungo la riga  $i$

$$\det(A) = \sum_{j=1}^n (-1)^{i+j} a_{ij} \det(A_{ij})$$

$j$ : varia l'indice di colonna;  $i$  è fisso.

NOTA: vedere appunti lezione 14 per esempio.

### 13.21.10 Metodo alternativo calcolo determinante

$A \sim B$  usando solo  $L_{ik}, L_{ij}(C)$

$A \xrightarrow{L_{ij}} A'$ :  $\det A = -\det A'$  ( $(-1) \cdot$  numero di scambi di riga)

$A \xrightarrow{L_{ij}(C)} A'$ :  $\det A = \det A'$

Non usare  $L_i(C)$  perché modifica il determinante.

$$A = \begin{bmatrix} & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \end{bmatrix} \sim B = \begin{bmatrix} b_{11} & & & \\ & b_{22} & & \\ & & b_{33} & \\ & & & b_{44} \end{bmatrix}$$



Il  $\det B$  = prodotto degli elementi sulla diagonale.

**Proprietà:** Se una matrice  $B$  quadrata è triangolare superiore (cioè  $b_{ij} = 0$  se  $i > j$ )

$$\begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \dots & b_{1n} \\ 0 & b_{22} & \dots & b_{2n} \\ 0 & 0 & \dots & \\ 0 & \dots & 0 & b_{nn} \end{bmatrix}$$

allora  $\det B = b_{11}b_{22}\dots b_{nn}$  (prodotto degli elementi sulla diagonale).

- In particolare se  $b$  è una matrice diagonale, ovvero  $b_{ij} = 0$  se  $i \neq j$ , allora  $\det A = b_{11}b_{22}\dots b_{nn}$
- In particolare se

$$B = \begin{bmatrix} \lambda & & 0 \\ & \lambda & \\ 0 & \dots & \lambda \end{bmatrix} \quad \text{per } \lambda \in \mathbb{R}$$

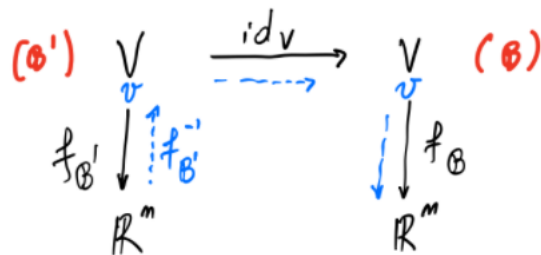
Allora  $\det B = \lambda^n$ .

- $\det I_n = \begin{bmatrix} 1 & & 0 \\ & \dots & \\ 0 & & 1 \end{bmatrix} = 1$  (Se a matrice ha tutti 1 sulla diagonale).
- Se  $P$  è una matrice di permutazione, allora  $\det P = \varepsilon(\sigma)$  se  $P = P_\sigma$ :  $P_\sigma$  è la matrice che ha 1 in posizione  $a_{ij}$  se  $j = \sigma(i)$  NOTA: Esempio appunti lezione 34.

### 13.22 Cambiamento di base

- Come mutano le coordinate dei vettori nelle due basi diverse.
- Come mutano le trasformazioni lineari.
- Come cambiano le matrici associate alle trasformazioni quando cambiano le basi.

Siano  $\mathcal{B} = (v_1, \dots, v_n)$  e  $\mathcal{B}' = (v'_1, \dots, v'_n)$  due basi ordinate di uno spazio vettoriale  $V$  (su  $\mathbb{R}$  o su  $K$  fissato) di dimensione  $n$  su  $\mathbb{R}$  (su  $K$ ...). Siano  $f_{\mathcal{B}}$  ed  $f_{\mathcal{B}'}$  gli isomorfismi che mandano i vettori di  $V$  nelle coordinate (colonne di  $\mathbb{R}^n$ ) rispettivamente nella base  $\mathcal{B}$  e  $\mathcal{B}'$ .



$$id_V : V \rightarrow V$$

$$v \mapsto v = id_V(v)$$

( $id_V$  è una trasformazione lineare biunivoca) è l'elemento neutro nella composizione delle trasf. lineari da  $V$  in se.

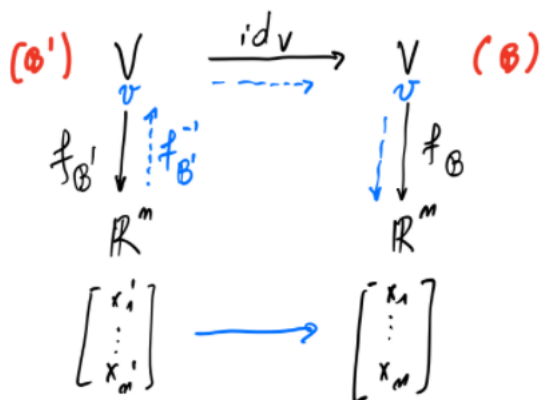
**Richiamo** Se  $\mathcal{B}$  è una base, allora l'applicazione

$$f_{\mathcal{B}} : V \rightarrow \mathbb{R}^n$$

$$v \rightarrow \begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix}$$

Se  $v = x_1 v_1 + \dots + x_n v_n$ ,  $\begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} = f_{\mathcal{B}}(v)$  è:

- Lineare
- Biunivoca



$$v = x'_1 v'_1 + x'_2 v'_2 + x'_3 v'_3 = f_{\mathcal{B}'}^{-1} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix}$$

$$f_{\mathcal{B}} \circ id_V \circ f_{\mathcal{B}'}^{-1}$$

Siano:

$$f_{\mathcal{B}}(v) = \begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} \text{ le coordinate di } v \text{ in base } \mathcal{B}$$

$$f_{\mathcal{B}'}(v) = \begin{bmatrix} x'_1 \\ \vdots \\ x'_n \end{bmatrix} \text{ le coordinate di } v \text{ in base } \mathcal{B}'$$

Allora esiste un'unica applicazione  $\Psi$  che rende il diagramma commutativo:

$$\Psi = f_{\mathcal{B}} \circ id_V \circ f_{\mathcal{B}'}^{-1}$$

ed esiste un'unica matrice  $B$  tale che:

•

$$\begin{aligned} f_{\mathcal{B}} &= L_B \circ f_{\mathcal{B}'} \\ &= L_B \circ f_{\mathcal{B}'}(v) (\in \mathbb{R}) \\ L_B(f_{\mathcal{B}'}(v)) &= B \begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} \end{aligned}$$

(con  $L_B$  la trasformazione lineare associata alla moltiplicazione per  $B$ :

$$L_B : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$$

$$Y \mapsto L_B(Y) = BY$$

$$Y \mapsto Y)$$

• Se  $X = f_{\mathcal{B}}(v)$   $X' = f_{\mathcal{B}'}(v)$  allora:

$$X = BX'$$

### Trasformazione delle coordinate

Se  $\mathcal{B}$  è la base vecchia e  $\mathcal{B}'$  è la base nuova, allora le coordinate di un vettore  $v$  nella base nuova si esprimono come:

$$X' = B^{-1}X$$

(Oss.:  $\Psi(X') = X, \Psi = L_B$  per un'opportuna matrice  $B$ .)

- $B$  si chiama la matrice del cambiamento di base e si ottiene come:  $B_{n \times n}[y_1 \dots y_n]$ ,

dove  $y_i = \begin{bmatrix} \vdots \\ y_i \\ \vdots \end{bmatrix}$  sono le coordinate di  $v_i$  nella base  $B$ .

Cioè  $B = [f_B(v'_1), \dots, f_B(v'_n)]$ , cioè è la matrice che contiene come colonne consecutive le coordinate dei vettori della base nuova espressi nella base vecchia, ovvero:

$$B = B' \cdot B$$

### 13.23 Def: Matrice associata a una trasformazione lineare $T$

(opp. matrice che rappresenta  $T$  rispetto alle basi degli spazi vettoriali)  
 L'unica matrice che rende il diagramma commutativo (cioè tale che  $f_C \circ T \circ f_B^{-1} = L_A$ ) si chiama matrice associata a  $T$  nelle basi  $B$  e  $C$ .  
 In altre parole  $f_C \circ T = L_A f_B$ , ovvero  $f_C(T(v)) = A f_B(v)A$ .  
 In altre parole:

$$\begin{aligned} \underline{x} &= f_B(v) \\ \underline{y} &= f_C(T(v)) \\ \Rightarrow \underline{y} &= A \underline{x} \end{aligned}$$

### 13.24 Proposizione

- $V$  ha due basi  $B$  e  $B'$ , sia  $B$  la matrice del cambio di base da  $B$  a  $B'$ :

$$B' = BB$$

- $W$  ha due basi  $C$  e  $C'$ , sia  $C$  la matrice del cambio di base da  $C$  a  $C'$ :

$$C' = CC$$

- Se  $T: V \rightarrow W$  una trasformazione lineare, con

- \*  $A$  è la matrice che rappresenta  $T$  nelle basi  $B$  e  $C$ .
- \*  $A'$  è la matrice che rappresenta  $T$  nelle basi  $B'$  e  $C'$ .

1. Allora  $A' = B^{-1}AC$  (cambiamento di matrice che rappresenta  $T$ )
2. Nel caso in cui  $W = V$ , e se prendo la stessa base per  $V$  (cioè  $C = B$ ) e sia  $B'$  un'altra base di  $V$ .  
 Se  $B$  è la matrice del cambiamento di base da  $B$  a  $B'$ , la nuova matrice che rappresenta  $T$  nella base  $B'$  è data da:

$$A' = B^{-1}AB$$

cioè  $A'$  è coniugata tramite la matrice  $B$  del cambiamento di base.

### 13.25 Definizione: matrice simile

Si dice che una matrice quadrata  $A$  è simile ad una matrice  $A' \Leftrightarrow \exists B$  invertibile tale che:

$$A' = B^{-1}AB$$

### 13.26 Proposizione

Data  $T : V \rightarrow V$  (endomorfismo) sia  $\mathcal{B}$  una base di  $V$  e sia  $A$  la matrice (quadrata) associata a  $T$  nella base  $\mathcal{B}$ .

1. Se  $\mathcal{B}'$  è un'altra base di  $V$ , allora la matrice  $A'$  associata a  $T$  nella base  $\mathcal{B}$  è data da:

$$A' = D^{-1}AD$$

Cioè esiste  $D$   $n \times n$  invertibile tale che  $A'$  è coniugata di  $A$  tramite  $D$ .  
Con  $D$  invertibile e che rappresenta la matrice del cambiamento di base da  $\mathcal{B}$  a  $\mathcal{B}'$ .

2. Se  $A'$  è una matrice simile ad  $A$ , allora esiste una base  $\mathcal{B}'$  di  $V$  tale che  $A'$  è la matrice che rappresenta  $T$  in base  $\mathcal{B}'$ !

### 13.27 Proposizione

La relazione tra matrici  $n \times n$  definita da:

$$A \sim B \Leftrightarrow \exists C \text{ invertibile con } B = C^{-1}AC$$

è una relazione di equivalenza su  $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$   
TODO:DIMOSTRAZIONE R-S-T

### 13.28 $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})_{/\sim}$ Quoziente modulo la similitudine

La classe di similitudine di una matrice  $A \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R})$ , denotata con  $\mathcal{O}_A$ :

$$\mathcal{O}_A := \{B \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R}) : A \sim B\} = \{B : \exists C, B = C^{-1}AC\}$$

è l'insieme delle matrici simili ad  $A$ .

A ogni endomorfismo di  $T : V \rightarrow V$  si può associare in modo unico una classe di similitudine (che contiene tutte e sole le matrici che rappresentano  $T$  nelle diverse basi).

### 13.29 Definizioni: autovettore, autovalore, spettro di $T$ , autospazio

Sia  $T : V \rightarrow V$  (endomorfismo) e sia  $v \neq 0_V$ :

- $v$  è un **autovettore** per  $T$  se esiste  $\lambda \in \mathbb{R}$  scalare tale che:

$$T(v) = \lambda v$$

- Tale  $\lambda$  si chiama **autovalore** relativo all'autovettore  $v$  (associato all'autovettore  $v$ )
- L'insieme di tutti gli autovalori (se esistono) di una trasformazione  $T$  si chiama **spettro di  $T$**

$$\text{Spec}(T) = \{\lambda \in K : \exists v \neq 0, v \in V \text{ con } T(v) = \lambda v\}$$

- Si chiama **autospazio** relativo a un autovalore di  $\lambda$  di  $T$  il sottospazio  $V_\lambda \leq V$  definito da:

$$V_\lambda = \{v \in V : T(v) = \lambda v\}$$

### 13.30 Osservazione

Vedremo che lo spettro di  $T$  non dipende dalla matrice che rappresenta  $T$  in una base, cioè è una nozione intrinseca: se  $A, B$  sono due matrici che rappresentano  $T$  in due basi diverse (cioè sono simili), allora  $\text{Spec}(A) = \text{Spec}(B)$  dove  $\text{Spec}(A) = \text{Spec}(L_A)$ .

- $\text{Spec}(T)$  (o di una matrice) può essere vuoto.
- Sia  $\lambda_0$  un autovalore di  $T$ :

$$\begin{aligned} V_{\lambda_0} &= \{v \in V : T(v) = \lambda_0 v\} \\ &= \{v \in V : T(v) - \lambda_0 \text{id}(v) = 0\} \\ &= \{v \in V : (T - \lambda_0 I)(v) = 0\} \\ &= \text{Ker}(T - \lambda_0 I) \neq \{0_V\} \end{aligned}$$

### 13.31 Proposizione

1.  $\lambda$  è un autovalore per  $T \Leftrightarrow T - \lambda \text{id}_V$  è una trasformazione singolare (una trasformazione lineare è singolare se ha nucleo non vuoto).
2. Se  $v$  è autovettore relativo a  $\lambda$ , allora non può essere autovettore relativo a un altro scalare  $\mu \neq \lambda$ , infatti:

$$\begin{aligned} Av &= \lambda v \text{ e anche } Av = \mu v \\ \Rightarrow \lambda v &= \mu v \Leftrightarrow \lambda v - \mu v = 0_V \\ (\lambda - \mu)v &= 0_V \end{aligned}$$

che è una contraddizione perchè  $v \neq 0$  perchè autovettore e  $\lambda - \mu \neq 0$ .

3. Autovettori relativi ad autovalori distinti sono linearmente indipendenti.

### 13.32 Diagonalizzazione di una matrice

- Un endomorfismo  $T : V \rightarrow V$  di  $V$  è diagonalizzabile  $\Leftrightarrow$  esiste una base di  $T$  fatta di autovettori.  
 $\Rightarrow$  in base  $\mathcal{B}$  la matrice che rappresenta  $T$  è diagonale.
- Ogni matrice che rappresenta  $T$  in qualche base ha gli stessi autovalori di  $T$ , cioè:

$$\text{Spec}(L_A) = \text{Spec}(A) = \text{Spec}(T)$$

- L'autospazio relativo all'autovalore  $\lambda$ ,

$$V_\lambda = \{v \in V : T(v) = \lambda v\} = \text{Ker}(T - \lambda \text{id})$$

- Autovettori relativi ad autovalori distinti sono indipendenti.
- $\lambda$  autovalore di  $T \Leftrightarrow T - \lambda \text{id}_V$  è singolare ( $\text{Ker}(T - \lambda \text{id}_V) \neq \{0_V\}$ ).
- Se  $A$  è la matrice della trasformazione  $L_A : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$  (nella base canonica)  $A$  ha un autovalore  $\lambda \Leftrightarrow$  la matrice  $(A - \lambda I_n)$  è singolare  $\Leftrightarrow \text{Ker}(A - \lambda I_n)$  è non banale  $\Leftrightarrow \det(A - \lambda I_n) = 0$ .

### 13.33 Polinomio caratteristico

Si chiama polinomio caratteristico di  $T : V \rightarrow V$  il polinomio:

$$p_T(\lambda) = \det(T - \lambda \text{id}_V)$$

### 13.34 Proposizione

Se  $A$  e  $B$  sono simili, allora hanno lo stesso polinomio caratteristico: cioè se  $A$  e  $B$  rappresentano (in basi diverse) la stessa trasformazione  $T$ : allora

$$\det(A - \lambda I_n) = \det(B - \lambda I_n)$$

**Dimostrazione:**  $A \sim B \Leftrightarrow \exists C$  invertibile con  $B = C^{-1}AC$ .

Osserviamo che:

$$\begin{aligned} C^{-1}(A - \lambda I_n)C &= \\ &= (C^{-1}A - C^{-1}\lambda I_n)C \\ &= C^{-1}AC - C^{-1}\lambda I_n C \\ &= B - \lambda C^{-1}I_n C \\ &= B - \lambda I_n \end{aligned}$$

Infine:

$$\begin{aligned} \det(B - \lambda I_n) &= \det(C^{-1}(A - \lambda I_n)C) = \\ &= \det(C^{-1})\det(A - \lambda I_n)\det(C) = \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \det(C^{-1})\det(C)\det(A - \lambda I_n) &= \\ \frac{1}{\det(C)}\det(C)\det(A - \lambda I_n) &= \\ \det(A - \lambda I_n) \end{aligned}$$

Quindi possiamo dire che  $p_T(\lambda) = p_A(\lambda)$  per ogni matrice  $A$  nella classe di similitudine.

### 13.35 Proprietà del polinomio caratteristico

- $p_T(\lambda) = \det(A - \lambda I)$  ( $A$  che rappresenta  $T$  in una base)
- $p_T(\lambda)$ , ( $p_A(\lambda)$ ) è un polinomio:
  - di grado  $n$  in  $\lambda$
  - Il coefficiente di  $\lambda^n$  è  $(-1)^n$
  - Il coefficiente di  $\lambda^{n-1}$  è  $(-1)^{n-1} \text{tr}(A)$  ( $\text{traccia}(A)$  = somma degli el. sulla diagonale)
  - Il coefficiente di  $\lambda^0 = 1$  (del termine noto) è  $(-1)^0 \det A = \det A$

- $v \neq 0$  e  $Av = \lambda v \Leftrightarrow$

$$(A - \lambda I)v = 0 \quad (v \neq 0)$$

$$\Leftrightarrow (A - \lambda I) \text{ singolare}$$

$$\Leftrightarrow \det(A - \lambda I) = 0 \quad (p_T(\lambda))$$

$$\Leftrightarrow \lambda \text{ è radice del polinomio caratteristico}$$

### 13.36 Corollario

Se  $p_T(\lambda)$  ha  $n$  soluzioni distinte, allora  $T$  è diagonalizzabile.

### 13.37 Def: molteplicità algebrica radice

Si chiama **molteplicità algebrica** di una radice  $x_0$  (soluzione) di un polinomio  $p(x)$  un numero  $k$  tale che  $(x - x_0)^k | p(x)$  ma  $(x - x_0)^{k+1} \nmid p(x)$

$$p(x) = (x - x_0)^k q(x)$$

### 13.38 Def: molteplicità algebrica $\lambda_0$

Si chiama **molteplicità algebrica** di  $\lambda_0$  (autovalore di  $T$ ) e si denota con  $m_a(\lambda_0)$  la molteplicità algebrica di  $\lambda_0$  come radice di  $p_T(\lambda)$ , cioè:

$$p_T(\lambda) = (\lambda - \lambda_0)^{m_a(\lambda_0)} ( \quad )$$



### 13.39 Def: molteplicità geometrica $\lambda_0$

Si chiama *molteplicità geometrica* di  $\lambda_0$  (autovalore di  $T$ ) e si indica con  $m_g(\lambda_0)$ , la dimensione dell'autospazio di  $V_{\lambda_0}$  relativo a  $\lambda_0$ , cioè la nullità di  $T - \lambda_0 I$ . In genere  $m_g(\lambda_0) \leq m_a(\lambda_0)$

### 13.40 Teorema

Le seguenti sono equivalenti per  $T : V \rightarrow V$ ,  $\dim_K V = n$ :

1.  $T$  è diagonalizzabile  $\Leftrightarrow$
2.  $T$  ha tutti i suoi autovalori in  $K$  (cioè il polinomio caratteristico si spezza in fattori del tipo  $(x - a)^*$  lineari di grado 1) e la molteplicità algebrica di ogni autovalore coincide con la molteplicità geometrica:

$$m_a(\lambda_0) = m_g(\lambda_0) \quad \forall \lambda_0 \in \text{Spec}(T)$$

quindi se con  $\text{Spec}(T) = \{\lambda_1, \dots, \lambda_k\}$  allora  $n = m_g(\lambda_1) + \dots + m_g(\lambda_k)$ .

## 14 Usi di Gauss-Jordan in vari ambiti

### 14.1 Risolvere $AX = b$

Si applica GJ alla matrice aumentata  $[A|b] \rightarrow [R|b']$  con  $A \sim R$  e  $[A|b] \sim [R|b']$ .

$AX = b$  ha le stesse soluzioni di  $RX = b'$ . Si risolve a questo punto il sistema ridotto  $RX = b'$

### 14.2 Rango e base $ImL_A$

Si applica  $A \rightarrow R$ .

*Rivedere Corollario  $ImL_A$*

Le colonne sono generatori:

$$[A^{(1)}, \dots, A^{(n)}] = A \sim R$$

allora le colonne di  $A$  corrispondenti ai pivot sono indipendenti:  $A^{(j_1)} \dots A^{(j_r)}$ :

$$rg(A) = \dim ImL_A = r$$

e  $A^{(j_1)} \dots A^{(j_r)}$  è una base per l'immagine.

### 14.3 Trovare $Ker(L_A) = Ker A$

$$KerT = \{v \in V : T(v) = 0\}$$

$$KerL_A = \{X \in \mathbb{R}^n : L_A(X) = \underline{0}\} =$$

$$\{X \in \mathbb{R}^n : AX = \underline{0}\} =$$

= spazio delle soluzioni del sistema lineare omogeneo associato ad  $A$

$KerA$  = Soluzioni di  $AX = 0$ : applicando GJ ad  $A$ :  $A \sim R$  e risolvo ora  $RX = 0$ .

### 14.4 Estrazione insieme di vettori indipendenti

Per il problema di estrarre un insieme indipendente più grande possibile da un insieme di vettori di  $\mathbb{R}^n$ : ci si chiede dato  $\{v_1, \dots, v_k\} \subseteq \mathbb{R}^n$ , qual è una base per  $Span(v_1, \dots, v_n)$  da estrarre da  $\{v_1, \dots, v_k\}$ .

Costruisco la matrice  $A = [v_1 \ \dots \ v_k]_{n \times k}$ :

$A \sim^{GJ} R$ : le colonne di  $A$  corrispondenti alle colonne di  $R$  dove si trovano i pivot sono indipendenti.

### 14.5 Completamento a un base di $\mathbb{R}$

Dati  $v_1, \dots, v_k \in \mathbb{R}^n$  indipendenti, voglio completare  $\{v_1, \dots, v_k\}$  a una base di  $\mathbb{R}^n$  (se  $k < n$ ).

In questo caso formo un insieme  $\{v_1, \dots, v_k, e_1, \dots, e_n\}$ . Costruisco

$$A = [v_1 \ \dots \ v_k \ e_1 \ \dots \ e_n]$$

Applico GJ:  $A \sim R$  e scelgo le colonne di  $A$  corrispondenti ai pivot.

#### **14.6   Trovare base di $U + W$ e $U \cap W$**

Per trovare una base di  $U + W$  e  $U \cap W$  date una base di  $U$  e una di  $W$ .