

Appunti di Logica e Algebra 2

Pietro Pizzoccheri

Lorenzo Bardelli

<https://github.com/PietroPizzoccheri/uni>

2024

Contents

1	Teoria degli anelli commutativi e dei campi	2
1.1	Insiemi	2
1.1.1	Operazioni tra insiemi	2
1.2	Funzioni	2
1.2.1	Composizione di funzioni	3
1.2.2	Operazioni su insiemi	3
1.3	Monoidi e Gruppi	4
1.4	Morfismi	5
1.5	Relazioni	8
1.5.1	Insieme quoziente per gruppi abeliani	9
1.6	Anelli	12
1.7	Ideali	14
1.7.1	Anelli quoziente	15
1.8	Algoritmo di Euclide e identità di Bézout su \mathbb{Z}	16
1.9	Equazioni diofantee lineari	17
1.10	Morfismi di anelli	18

1 Teoria degli anelli commutativi e dei campi

1.1 Insiemi

Un insieme è una collezione di oggetti, detti elementi dell'insieme.

$\mathbb{N} := \{0, 1, 2, 3, \dots\}$ insieme dei numeri naturali

$\mathbb{Z} := \{\dots, -2, -1, 0, 1, 2, \dots\}$ insieme degli interi

$\mathbb{Q} := \left\{ \frac{a}{b} \mid a, b \in \mathbb{Z}, b \neq 0 \right\}$ insieme dei numeri razionali

$\mathbb{R} :=$ insieme dei numeri reali

$\mathbb{C} :=$ insieme dei numeri complessi

1.1.1 Operazioni tra insiemi

\subseteq inclusione tra insiemi

\subsetneq inclusione propria tra insiemi

$X \subseteq Y$ si legge " X è sottoinsieme di Y " o " X è incluso in Y "

Se X è un insieme finito, indico con $|X|$ il numero di elementi di X , detto anche la **cardinalità** di X .

\emptyset : Insieme vuoto e $|\emptyset| = 0$

Siano X e Y due insiemi. L'insieme $X \times Y := \{(x, y) : x \in X, y \in Y\}$ lo chiamiamo **prodotto cartesiano** di X e Y .

Sia $A \in \mathcal{P}(X)$, dove $\mathcal{P}(X) := \{A : A \subseteq X\}$ è detto **Insieme delle parti** di X . L'insieme $A^c := X \setminus A$ è detto **complementare** di A

1.2 Funzioni

Siano X e Y due insiemi. **Una funzione f da X a Y** è un sottoinsieme $F \subseteq X \times Y$ tale che:

- $(x, y_1) \in F, (x, y_2) \in F \implies y_1 = y_2, \forall x \in X, y_1, y_2 \in Y$.
- $x \in X \implies \exists y \in Y$ tale che $(x, y) \in F$

Una funzione $F \subseteq X \times Y$ la indichiamo con $f : X \rightarrow Y$. E scriviamo $f(x) = y$ se $(x, y) \in F$.

Definizione: La funzione $Id_x : X \rightarrow X$ tale che $Id_x(x) = x, \forall x \in X$ la chiamiamo **funzione identità su X**

Definizione: Una funzione $f : X \rightarrow Y$ è **iniettiva** se $\forall x_1, x_2 \in X, f(x_1) = f(x_2) \implies x_1 = x_2$

Definizione: Una funzione $f : X \rightarrow Y$ è **suriettiva** se $Im(f) = Y$, dove $Im(f) = \{y \in Y : \exists x \in X \text{ tale che } f(x) = y\}$ è detta **immagine di f**

Definizione: Una funzione $f : X \rightarrow Y$ è **biunivoca** se è sia iniettiva che suriettiva.

1.2.1 Composizione di funzioni

Siano $f : X \rightarrow Y$ e $g : Y \rightarrow Z$ due funzioni. La **composizione di f e g** è la funzione $g \circ f : X \rightarrow Z$ tale che $(g \circ f)(x) = g(f(x))$, $\forall x \in X$.

Definizione: una funzione $f : X \rightarrow Y$ è detta **invertibile** se esiste una funzione $g : Y \rightarrow X$ tale che

- $g \circ f = Id_X$
- $f \circ g = Id_Y$

la funzione g è detta **funzione inversa di f** e la indichiamo con f^{-1} .

Una funzione $f : X \rightarrow Y$ è invertibile se e solo se è biunivoca.

1.2.2 Operazioni su insiemi

Definizione: Una funzione $f : X \times X \rightarrow X$ è detta **operazione su X** . Invece di $f(x, y)$ scriveremo $x \cdot y$.

Definizione: Un'operazione \cdot su X è detta **associativa** se $(x \cdot y) \cdot z = x \cdot (y \cdot z)$, $\forall x, y, z \in X$.

Definizione: Un'operazione \cdot su X è detta **commutativa** se $x \cdot y = y \cdot x$, $\forall x, y \in X$.

Esempio:

- $\mathcal{P}(X)$ con l'operazione di unione \cup è associativa e commutativa, così come lo è con l'intersezione \cap .
- $A \setminus B := A \cap B^C$ (**differenza insiemistica**) è un'operazione su $\mathcal{P}(X)$.
non è associativa: sia $A \neq \emptyset$. Allora $A \setminus (A \setminus A) = A \neq (A \setminus A) \setminus A = \emptyset$
non è commutativa: $A \setminus \emptyset = A \neq \emptyset \setminus A = \emptyset$, se $A \neq \emptyset$
- $A \Delta B := (A \setminus B) \cup (B \setminus A)$ (**differenza simmetrica**) è un'operazione su $\mathcal{P}(X)$.
è commutativa e anche associativa, facilmente verificabile coi diagrammi di Venn.
- Sia $F(X) := \{f : X \rightarrow X\}$.
La composizione " \circ " è un'operazione su $F(X)$.
è associativa, ma non è commutativa.
- $a \circ b = \frac{a+b}{2}$ è un'operazione commutativa su \mathbb{Q} , ma non associativa.

Definizione: Sia \cdot un'operazione su X . Un elemento $e \in X$ tale che $e \cdot x = x \cdot e = x$, $\forall x \in X$ è detto **elemento neutro o identità**.

L'identità è unica; se $e, e' \in X$ sono due identità, allora $e = e \cdot e' = e'$.

1.3 Monoidi e Gruppi

Definizione: Un insieme X con un'operazione associativa e un'identità è detto **monoide**.

Esempio:

- $\mathbb{N}, \mathbb{Z}, \mathbb{Q}, \mathbb{R}, \mathbb{C}$ con l'addizione e identità 0 sono monoidi.
- $\mathbb{N}, \mathbb{Z}, \mathbb{Q}, \mathbb{R}, \mathbb{C}$ con la moltiplicazione e identità 1 sono monoidi.
- $\mathcal{P}(X)$ con \cup e come identità l'insieme X è un monoide.
- $\mathcal{P}(X)$ con \cap e come identità l'insieme vuoto è un monoide.
- $F(X) := \{f : X \rightarrow X\}$ con la composizione \circ e come identità la funzione identità (Id_X) è un monoide.

Definizione: Sia X un monoide. Un elemento $x \in X$ è detto **invertibile** se esiste $y \in X$ tale che $x \cdot y = y \cdot x = e$, dove e è l'identità di X . L'elemento y è detto **inverso** di x .

Se $x \in X$ è invertibile, il suo inverso è unico e lo indichiamo con x^{-1} .
L'identità del monoide è invertibile e il suo inverso è l'identità stessa.

Esempio:

- L'insieme degli elementi invertibili di $(\mathbb{N}, +)$ è $\{0\}$.
- L'insieme degli elementi invertibili di $(\mathbb{Z}, +)$ è \mathbb{Z} , di $(\mathbb{Q}, +)$ è \mathbb{Q} , di $(\mathbb{R}, +)$ è \mathbb{R} , di $(\mathbb{C}, +)$ è \mathbb{C} .
- L'insieme degli elementi invertibili di (\mathbb{N}, \cdot) è $\{1\}$, di (\mathbb{Z}, \cdot) è $\{1, -1\}$, di (\mathbb{Q}, \cdot) è $\mathbb{Q} \setminus \{0\}$, di (\mathbb{R}, \cdot) è $\mathbb{R} \setminus \{0\}$, di (\mathbb{C}, \cdot) è $\mathbb{C} \setminus \{0\}$.
- L'insieme degli elementi invertibili di $F(X) = \{f : X \rightarrow X\}$ è l'insieme delle funzioni invertibili.

Definizione: Un monoide X è detto **gruppo** se ogni suo elemento è invertibile. Se l'operazione è commutativa, il gruppo è detto **gruppo abeliano**.

Esempio:

- $(\mathcal{P}(X), \Delta)$ è un gruppo abeliano. L'identità è l'insieme vuoto e l'inverso di $A \in \mathcal{P}(X)$ è A stesso. ($A^2 = \emptyset, \forall A \subseteq X$)
- $(\mathbb{Z}, +), (\mathbb{Q}, +), (\mathbb{R}, +), (\mathbb{C}, +)$ sono gruppi abeliani
- $(\mathbb{Q} \setminus \{0\}, \cdot), (\mathbb{R} \setminus \{0\}, \cdot), (\mathbb{C} \setminus \{0\}, \cdot)$ sono gruppi abeliani
- sia $X = \{1, 2, \dots, n\}$ l'insieme delle funzioni invertibili $f : X \rightarrow X$ è il **Gruppo delle permutazioni di n elementi (o gruppo simmetrico)**. Lo indichiamo con S_n . $|S_n| = n!$. Non è abeliano se $n \geq 3$.

Definizione: Sia X un monoide con identità e . Un sottoinsieme $Y \subseteq X$ tale che $e \in Y$ e Y è chiuso rispetto all'operazione di X è detto **sottomonide di X** . Analogamente definiamo la nozione di **sottogruppo di X** . il gruppo $\{e\}$ è detto **sottogruppo banale di X** .

Esempio:

- Con l'addizione, $\{0\}$ è un sottomonoido di \mathbb{N} . $\{0\}$ è anche sottogruppo banale.
- Con la moltiplicazione abbiamo la catena di sottomonoidi $\{1\} \subseteq \mathbb{N} \subseteq \mathbb{Z} \subseteq \mathbb{Q} \subseteq \text{insieme } \mathbb{R} \subseteq \mathbb{C}$ e di sottogruppi $\{1\} \subseteq \mathbb{Q} \setminus \{0\} \subseteq \mathbb{R} \setminus \{0\} \subseteq \mathbb{C} \setminus \{0\}$
- con l'addizione abbiamo la catena di sottogruppi $\{0\} \subseteq \mathbb{Z} \subseteq \mathbb{Q} \subseteq \mathbb{R} \subseteq \mathbb{C}$

Definizione: Sia X un monoide e $S \subseteq X$ un sottoinsieme. L'insieme $\langle S \rangle := \{x_1 \cdot x_2 \cdots x_n : n \in \mathbb{N}, x_1, x_2, \dots, x_n \in S\}$ è detto **sottomonoido generato da S** (intersezione di tutti i sottomonoidi di X che contengono S). Se X è un gruppo, $\langle S \rangle$ è detto **sottogruppo generato da S** .

Esempio:

- $S = \{1\} \subseteq (\mathbb{N}, +)$. Allora $\langle S \rangle = \{0, 1, 2, \dots\} = \mathbb{N}$
- sia $S := \{p \in \mathbb{N} : p \text{ è primo}\} \cup \{0\} \subseteq (\mathbb{N}, \cdot)$. allora $\langle S \rangle = \mathbb{N}$
- $S = \{0, 1\} \subseteq (\mathbb{N}, \cdot)$. Allora $\langle S \rangle = \{0, 1\}$
- sia $S = \{1\} \subseteq (\mathbb{Z}, +)$. il sottogruppo generato da S è $\langle S \rangle = \mathbb{Z}$
- uno spazio vettoriale V è un gruppo abeliano se consideriamo l'operazione di addizione fra vettori. Prendiamo $V = \mathbb{R}^2 = \mathbb{R} \times \mathbb{R}$. Sia $v = (1, 1) \in \mathbb{R}^2$. Il sottogruppo $\langle \{v\} \rangle = \{(n, n) : n \in \mathbb{Z}\}$ è un sottogruppo proprio del sottospazio generato da $\{v\}$. Sia $v_1 = (1, 0)$ ed $v_2 = (0, 1)$, allora il sottogruppo $\langle \{v_1, v_2\} \rangle$ è $\mathbb{Z} \times \mathbb{Z} \subseteq \mathbb{R} \times \mathbb{R}$

Definizione: Siano M_1, M_2 con identità e_1, e_2 rispettivamente. Si definisce prodotto diretto di M_1 e M_2 l'insieme $M_1 \times M_2$ con l'operazione $(m_1, m_2) \cdot (m'_1, m'_2) = (m_1 \cdot m'_1, m_2 \cdot m'_2)$ e identità (e_1, e_2) . Analogamente si definisce prodotto diretto di gruppi G_1, G_2 .

L'inverso di una coppia $(a, b) \in G_1 \times G_2$ è (a^{-1}, b^{-1}) .

1.4 Morfismi

Definizione: Siano M_1, M_2 monoidi con identità e_1, e_2 . Una funzione $f : M_1 \rightarrow M_2$ è un **morfismo di monoidi** se:

- $f(e_1) = e_2$
- $f(xy) = f(x)f(y)$

Definizione: Siano G_1, G_2 gruppi con identità e_1, e_2 . Una funzione $f : G_1 \rightarrow G_2$ è un **morfismo di gruppi** se:

- $f(e_1) = e_2$
- $f(xy) = f(x)f(y)$

Definizione: Il **nucleo** di un morfismo di monoidi $f : M_1 \rightarrow M_2$ è il sottomonoido di M_1 definito come: $\text{Ker}(f) := \{x \in M_1 : f(x) = e_2\}$

Definizione: Il nucleo di un morfismo di gruppi $f : G_1 \rightarrow G_2$ è il sottogruppo di G_1 definito come: $\text{Ker}(f) := \{x \in G_1 : f(x) = e_2\}$. Il nucleo è un sottogruppo di G_1 . e $\text{Im}(f)$ è un sottogruppo di G_2 .

Definizione: Un isomorfismo di monoidi (e di gruppi) è un morfismo biunivoco, tale che la funzione inversa sia un morfismo.

Proposizione: Sia $f : M_1 \rightarrow M_2$ un morfismo di monoidi. Se f è biunivoco, allora è un isomorfismo. Questo vale anche per i gruppi.

Dimostrazione: Dobbiamo far vedere che la funzione inversa $f^{-1} : M_2 \rightarrow M_1$ è un morfismo di monoidi. Poiché $f(e_1) = e_2$, allora $f^{-1}(e_2) = e_1$. Siano $x_2, y_2 \in M_2$, allora esistono $x_1, y_1 \in M_1$ tali che $f(x_1) = x_2, f(y_1) = y_2$. Quindi $f^{-1}(f(x_1)f(y_1)) = f^{-1}(f(x_1y_1)) = x_1y_1 = f^{-1}(x_2)f^{-1}(y_2)$

Esempio:

- Siano $M_1 = (\mathcal{P}(X), \cup)$ e $M_2 = (\mathcal{P}(X), \cup)$, dove X è un insieme. Sia $f : M_1 \rightarrow M_2$ definita ponendo $f(A) = A^C, \forall A \subseteq X$. la funzione f è biunivoca. Inoltre, dalle formule di De Morgan segue che $f(A \cap B) = (A \cap B)^C = A^C \cup B^C = f(A) \cup f(B)$. Quindi f è un isomorfismo di monoidi, poiché $f(X) = X^C = \emptyset$, essendo X l'identità di M_1 e \emptyset l'identità di M_2 .
- Sia $\mathbb{Z}_2 := \{0, 1\}$ con l'operazione definita come: $0+0=0, 0+1=1+0=1, 1+1=0$. Sia $X := \{1, 2, \dots, n\}, n \in \mathbb{N}$. La funzione $f : \mathcal{P}(X) \rightarrow \mathbb{Z}_2 \times \dots \times \mathbb{Z}_2$ (n volte) definita da: $f(A) = (a_1, a_2, \dots, a_n)$, dove $a_i = 1$ se $i \in A$ e $a_i = 0$ se $i \notin A$.
è un isomorfismo del gruppo $(\mathcal{P}(X), \Delta)$ con il gruppo $\mathcal{P}(X) \rightarrow \mathbb{Z}_2 \times \dots \times \mathbb{Z}_2 = (\mathbb{Z}_2)^n$

Vediamo ora come ogni monoide finito è isomorfo a un monoide di matrici quadrate, dove l'operazione è il prodotto righe per colonne.

Sia $M = \{x_1, \dots, x_n\}$ un monoide, $|M| = n \in \mathbb{N}$, con identità $e = x_1$. Per ogni $x \in M$ definiamo una matrice $A(x) \in \text{Mat}_{n \times n}(\mathbb{Z})$ nel seguente modo: $A(x)_{ij} = 1$ se $x_i \cdot x = x_j$ e $A(x)_{ij} = 0$ altrimenti. La funzione $F : M \rightarrow \text{Mat}_{n \times n}(\mathbb{Z})$ ($x \mapsto A(x)$) è iniettiva.

Infatti, se $A(x) = A(y)$, allora $A(x)_{i1} = A(y)_{i1}, \forall i \in \{1, \dots, n\}$.

Quindi se $A(x)_{i1} = A(y)_{i1} = 1$, allora $xx_1 = xe = x = yx_1 = y$.

Risulta inoltre facile vedere che $A(xy) = A(x)A(y)$ (prodotto righe per colonne), ossia che F è un morfismo di monoidi ($\text{Mat}_{n \times n}(\mathbb{Z})$ è un monoide con l'operazione di prodotto righe per colonne, la cui identità è la matrice I_n).

Quindi $F : M \rightarrow \text{Im}(F)$ è un isomorfismo di monoidi.

Esempio: Sia $M = (\mathbb{Z}_2, \cdot)$ il monoide definito da:

\cdot	0	1
0	0	0
1	0	1

costruiamo un sottomonoide di $Mat_{4 \times 4}(\mathbb{Z})$ isomorfo a $M \times M = \{(0,0), (0,1), (1,0), (1,1)\}$.

$$\begin{aligned} (0,0) &\mapsto \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, & (0,1) &\mapsto \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, & (1,0) &\mapsto \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \\ (1,1) &\mapsto \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

\cdot	(0,0)	(0,1)	(1,0)	(1,1)
(0,0)	(0,0)	(0,0)	(0,0)	(0,0)
(0,1)	(0,0)	(0,1)	(0,0)	(0,1)
(1,0)	(0,0)	(0,0)	(1,0)	(1,0)
(1,1)	(0,0)	(0,1)	(1,0)	(1,1)

Si può verificare direttamente che le matrici hanno la stessa tabella moltiplicativa. (fine esempio)

Abbiamo quindi visto che un monoide finito di cardinalità n è isomorfo a un monoide di matrici $n \times n$ le cui colonne hanno un unico "1" e altrove sono "0".

Ognuna di queste matrici può essere vista come una funzione da $X = \{1, \dots, n\}$ in X :

$$A_{ij} = 1 \Leftrightarrow f(j) = i$$

$$A_{ij} = 0 \Leftrightarrow f(j) \neq i$$

Il prodotto righe per colonne corrisponde alla composizione di funzioni.

Quindi un monoide finito di cardinalità n è isomorfo a un sottomonoide del monoide delle funzioni f da $\{1, \dots, n\}$ in $\{1, \dots, n\}$ con l'operazione di composizione.

Notiamo che un elemento $x \in M$ di un monoide finito M è invertibile se e solo se la matrice associata è invertibile (una matrice $A \in Mat_{n \times n}(\mathbb{Z})$ è invertibile se e solo se il suo determinante è invertibile su \mathbb{Z} , ossia se e solo se $\det(a) \in \{-1, 1\}$).

Da ciò segue che un gruppo finito G di cardinalità $|G| = n$, è isomorfo a un gruppo di matrici le cui componenti sono "0" e "1" e che hanno un unico "1" in ogni riga e ogni colonna (matrici di permutazioni).

Il gruppo G è inoltre isomorfo a un sottogruppo del gruppo delle funzioni biunivoche da $\{1, \dots, n\}$ in $\{1, \dots, n\}$, che abbiamo chiamato **gruppo simmetrico** S_n .

Gli elementi di S_n in notazione a una linea sono indicati nel modo seguente: sia $\sigma \in S_n$ una funzione biunivoca da $\{1, \dots, n\}$ in $\{1, \dots, n\}$, allora σ è indicata come $\sigma(1)\sigma(2) \dots \sigma(n)$.

Teorema (Teorema di Cayley): Ogni sottogruppo finito di cardinalità $n \in \mathbb{N} \setminus \{0\}$ è isomorfo a un sottogruppo di S_n

Esempio:

- $S_2 = \{12, 21\}$
 $S_3 = \{123, 132, 213, 231, 312, 321\}$
- vediamo il gruppo $(\mathbb{Z}_2, +)$ come gruppo di matrici e come gruppo di permutazioni.
 $(\mathbb{Z}_2, +) \simeq \left\{ \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \right\} \simeq \{12, 21\} = S_2$ (\simeq : isomorfismo di gruppi)

1.5 Relazioni

Definizione: Sia X un insieme. Un sottoinsieme $R \subseteq X \times X$ è detto **relazione su X** .

Definizione: Una relazione $R \subseteq X \times X$ è detta **relazione di equivalenza** se soddisfa le seguenti proprietà:

- **riflessità:** $(x, x) \in R, \forall x \in X$
- **simmetria:** $(x, y) \in R \implies (y, x) \in R, \forall x, y \in X$
- **transitività:** $(x, y) \in R$ e $(y, z) \in R \implies (x, z) \in R, \forall x, y, z \in X$

Se R è una relazione di equivalenza su X e $(x, y) \in R$, scriviamo $x \sim y$, che si legge " x è equivalente a y ".

Definizione: Sia X un insieme e $R \subseteq X \times X$ una relazione di equivalenza su X . L'insieme $[x]_R := \{y \in X : x \sim y\}$ è detto **classe di equivalenza di x rispetto a R** .

Definizione: L'insieme $X/\sim := \{[x] : x \in X\}$ è detto **insieme quoziente**.

Definizione: La funzione $\pi : X \rightarrow X/\sim, x \mapsto [x]$ è detta **proiezione canonica**.

Definizione: Siano $x, y \in X$. Allora se $x \sim y$ abbiamo che $[x] = [y]$. Se $x \not\sim y$ abbiamo che $[x] \cap [y] = \emptyset$. Quindi $X = \bigsqcup_{[x] \in X/\sim} [x]$, ossia X/\sim è una partizione di X .

Esempio:

- L'uguaglianza " $=$ " è una relazione di equivalenza su ogni insieme X .
- Sia $X = \{1, 2, \dots, n\}$. Definiamo su $\mathcal{P}(X)$ la seguente relazione: $A \sim B \Leftrightarrow |A| = |B|, \forall A, B \subseteq X$. Questa è una relazione di equivalenza e $\mathcal{P}(X)/\sim \equiv \{0, 1, \dots, n\}$. Se $A \subseteq X$ è tale che $|A| = k \leq n$ allora $[A] = \binom{X}{k} := \frac{n!}{k!(n-k)!}$
- Sia G un gruppo e $H \subseteq G$ un sottogruppo. La relazione \sim su G definita da $g_1 \sim g_2 \Leftrightarrow g_1 = g_2 h$ per qualche $h \in H$ è una relazione di equivalenza.
 - $g \sim g : g \cdot e, \forall g \in G, e \in H$
 - $g_1 \sim g_2 \rightarrow g_2 \sim g_1 : g_1 = g_2 h \rightarrow g_1 h^{-1} = g_2 (h^{-1} \in H)$

$$- g_1 \sim g_2, g_2 \sim g_3 \rightarrow g_1 \sim g_3 : g_1 = g_2 h, g_2 = g_3 h' \rightarrow g_1 = g_3 h h' = g_3 h'', \forall g_1, g_2, g_3 \in G$$

In questo caso l'insieme quoziente lo indichiamo con G/H .

Definizione: Il numero $\binom{n}{k}$ è chiamato **coefficiente binomiale**, questo perché $(x + y)^n = \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} x^k y^{n-k}, \forall x, y \in \mathbb{C}$

1.5.1 Insieme quoziente per gruppi abeliani

Se G è un gruppo abeliano, possiamo definire la seguente operazione "+" su G/H : $[g_1] + [g_2] := [g_1 + g_2]$, vediamo che è ben definita: se $g'_1 = g_1 + h_1$ e $g'_2 = g_2 + h_2$, allora $[g'_1] = [g_1]$, $[g'_2] = [g_2]$ e $g'_1 + g'_2 = g_1 + h_1 + g_2 + h_2 = g_1 + g_2 + h$, dove $h = h_1 + h_2 \in H$. Quindi $[g'_1 + g'_2] = [g_1 + g_2]$. L'operazione è ovviamente associativa e commutativa, perché lo è quella su G . Inoltre $[g] + [0] = [g], \forall [g] \in G/H$ dove con "0" abbiamo indicato l'identità di G . Quindi la classe $[0]$ dell'identità di $(G/H, +)$. Infine $[g] + [-g] = [g - g] = [0]$, dove con $-g$ abbiamo indicato l'inverso di g in G . Quindi $-[g] = [-g], \forall [g] \in G/H$, ossia $(G/H, +)$ è un gruppo abeliano.

Esempio:

- Se $H = \{0\} \subseteq G$, allora G/H è isomorfo a G . ($\{0\}$ gruppo banale e G gruppo abeliano)
- Sia $G = (\mathbb{Z}, +)$ e $n \in \mathbb{N}$. Il sottoinsieme $n\mathbb{Z} = \{nz : z \in \mathbb{Z}\}$ è un sottogruppo di \mathbb{Z} .

$$\begin{aligned} - 0\mathbb{Z} &= \{0\} \\ - 1\mathbb{Z} &= \{\mathbb{Z}\} \\ - 2\mathbb{Z} &= \{\dots, -4, -2, 0, 2, 4, \dots\} \\ - 3\mathbb{Z} &= \{\dots, -6, -3, 0, 3, 6, \dots\} \end{aligned}$$

Definiamo il gruppo abeliano $\mathbb{Z}_n := \mathbb{Z}/n\mathbb{Z}$, per $\mathbb{Z}_0 = \mathbb{Z}/0\mathbb{Z} = \mathbb{Z}/\{0\} = \mathbb{Z}$.

Sia $n \geq 0$ e siano $x, y \in \mathbb{Z}$.

$$- \text{Allora } x \sim y \Leftrightarrow x = y + h \ (h \in n\mathbb{Z}) \Leftrightarrow x - y = kn \ (\text{per } k \in \mathbb{Z}) \Leftrightarrow \text{il resto della divisione di } x \text{ per } n \text{ è uguale al resto della divisione di } y \text{ per } n.$$

I possibili resti della divisione per n sono $0, 1, \dots, n-1$.

Quindi $\mathbb{Z}_n = \{[0], [1], \dots, [n-1]\} = \{\bar{0}, \bar{1}, \dots, \overline{n-1}\}$. ($\{[0], [1], \dots, [n-1]\}$ sono le classi di resto)

$$- \mathbb{Z}_2 = \{\bar{0}, \bar{1}\}, \bar{1} + \bar{1} = [1 + 1] = [2] = [0]$$

+	$\bar{0}$	$\bar{1}$
$\bar{0}$	$\bar{0}$	$\bar{1}$
$\bar{1}$	$\bar{1}$	$\bar{0}$

$$- \mathbb{Z}_3 = \{\bar{0}, \bar{1}, \bar{2}\},$$

Definizione: Sia G un gruppo abeliano e $H \subseteq G$ un sottogruppo. La proiezione canonica $\pi : G \rightarrow G/H$ è un **morfismo suriettivo di gruppi**

+	$\bar{0}$	$\bar{1}$	$\bar{2}$
$\bar{0}$	$\bar{0}$	$\bar{1}$	$\bar{2}$
$\bar{1}$	$\bar{1}$	$\bar{2}$	$\bar{0}$
$\bar{2}$	$\bar{2}$	$\bar{0}$	$\bar{1}$

Se G è un gruppo finito e $H \subseteq G$ è un sottogruppo, allora $[g] \in G/H \rightarrow |[g]| = |H|$.
 Infatti $[g] = \{gh : h \in H\}$ e $gh_1 = gh_2 \rightarrow h_1 = h_2$.
 Poiché le classi di equivalenza sono una partizione di G , abbiamo $|G| = |G/H| \cdot |H|$.
 In particolare la cardinalità o (**ordine**) di un sottogruppo di un gruppo finito divide la cardinalità del gruppo.

Teorema: Sia $f : G_1 \rightarrow G_2$ un morfismo di gruppi. Allora f è iniettivo se e solo se $\text{Ker}(f) = \{e_1\}$.
 (Questo non vale per i morfismi di monoidi.)

Dimostrazione: Sia f iniettivo. Sia $x \in \text{Ker}(f)$. Allora $f(x) = e_2$ e quindi, poiché anche $f(e_1) = e_2$, si ha che $x = e_1$ per l'ipotesi di iniettività.
 Sia $\text{Ker}(f) = \{e_1\}$. Siano $x, y \in G_1$ tali che $f(x) = f(y)$.
 Allora $f(x)f(y^{-1}) = e_2 \rightarrow f(xy^{-1}) = e_2 \rightarrow xy^{-1} \in \text{Ker}(f) \rightarrow xy^{-1} = e_1 \rightarrow x = y$.

Esempio:

- $G = \mathbb{Z}_4 = \{\bar{0}, \bar{1}, \bar{2}, \bar{3}\}$,
 - $\langle \bar{0} \rangle = \bar{0}$ sottogruppo banale $\simeq \mathbb{Z}_1$
 - $\langle \bar{1} \rangle = \mathbb{Z}_4$
 - $\langle \bar{2} \rangle = \{\bar{0}, \bar{2}\} \simeq \mathbb{Z}_2$ ($2 + 2 = 0$)
 - $\langle \bar{3} \rangle = \mathbb{Z}_4$ ($3, 3 + 3 = 6 = 2, 3 + 2 = 5 = 1, 3 + 1 = 4 = 0$)

I sottogruppi di \mathbb{Z}_4 possono aver cardinalità 1, 2, 4. L'insieme dei sottogruppo di \mathbb{Z}_4 è $\{\{\bar{0}\}, \{\bar{0}, \bar{2}\}, \{\bar{0}, \bar{1}, \bar{2}, \bar{3}\} = \mathbb{Z}_4\}$

- $G = \mathbb{Z}_6 = \{\bar{0}, \bar{1}, \bar{2}, \bar{3}, \bar{4}, \bar{5}\}$,
 - $\langle \bar{0} \rangle = \bar{0}$ sottogruppo banale $\simeq \mathbb{Z}_1$
 - $\langle \bar{1} \rangle = \mathbb{Z}_6$
 - $\langle \bar{2} \rangle = \{\bar{0}, \bar{2}, \bar{4}\} \simeq \mathbb{Z}_3$
 - $\langle \bar{3} \rangle = \{\bar{0}, \bar{3}\} \simeq \mathbb{Z}_2$
 - $\langle \bar{4} \rangle = \{\bar{0}, \bar{2}, \bar{4}\} \simeq \mathbb{Z}_3$
 - $\langle \bar{5} \rangle = \mathbb{Z}_6$

I sottogruppi di \mathbb{Z}_6 possono aver cardinalità 1, 2, 3, 6. L'insieme dei sottogruppo di \mathbb{Z}_6 è $\{\{\bar{0}\}, \{\bar{0}, \bar{2}, \bar{4}\}, \{\bar{0}, \bar{3}\}, \{\bar{0}, \bar{1}, \bar{2}, \bar{3}, \bar{4}, \bar{5}\} = \mathbb{Z}_6\}$

Caso generale: consideriamo il gruppo $\mathbb{Z}_n = (\{\bar{0}, \bar{1}, \dots, \overline{n-1}\}, +)$ sia $m \in \mathbb{N}, m < n$.

Se $m = 0$, $\langle \bar{0} \rangle = \{\bar{0}\}$.

Sia $m > 0$ e $z := \frac{\text{mcm}\{m, n\}}{m}$. (mcm = minimo comune multiplo)

$$\overline{m} + \overline{m} + \cdots = \overline{m} = \overline{zm} = \overline{mcm\{m, n\}} = \overline{0}$$

Se $i \leq i \leq z$: $im < zm = mcm\{m, n\} \rightarrow n$ non divide im .

$\overline{m} + \overline{m} + \cdots = \overline{m} = \overline{im} \neq \overline{0}$ perché im è multiplo di m e $im < mcm\{m, n\}$, quindi im non è multiplo di n . Dunque $|\langle \overline{m} \rangle| = z = \frac{mcm\{m, n\}}{m}$.

In particolare, $\langle \overline{m} \rangle = \mathbb{Z}_n \Leftrightarrow z = n \Leftrightarrow MCD\{m, n\} = 1$. Ossia l'insieme $\{\overline{m}\}$ genera il gruppo \mathbb{Z}_n sse m e n sono coprimi.

Definizione: La funzione definita da $\varphi : \mathbb{N} \setminus \{0\} \rightarrow \mathbb{N} \setminus \{0\}$,

$\varphi(n) := |\{m \in \mathbb{N} \setminus \{0\} : m < n \text{ e } MCD\{m, n\} = 1\}|$ è detta **funzione di Eulero**.

Quindi ci sono $\varphi(n)$ elementi \overline{m} tali che $\langle \overline{m} \rangle = \mathbb{Z}_n$.

Proposizione: L'insieme dei sottogruppi di $(\mathbb{Z}, +)$ è $\{n\mathbb{Z} : n \in \mathbb{N}\}$.

Dimostrazione: Sia $H \subseteq \mathbb{Z}$ un sottogruppo non banale.

Sia $k := \min(H_{>0})$ dove $H_{>0} := \{h \in H : h > 0\}$.

Sia $h \in H_{>0}, h \neq k$.

Allora $h > k$ e $h = nk + r, n \in \mathbb{N}, 0 \leq r < k$.

Dunque $r = h - nk \in H \rightarrow r = 0$ per la minimalità di k .

Definizione: Un gruppo G è detto **ciclico** se esiste $g \in G$ tale che $\langle g \rangle = G$.

Un gruppo ciclico è anche abeliano

Esempio:

- $\mathbb{Z} = \langle 1 \rangle$ è ciclico
- $\mathbb{Z}_n = \langle \overline{1} \rangle$ è ciclico
- $\mathbb{Z} \times \mathbb{Z} = \langle (1, 0), (0, 1) \rangle$ non è ciclico, infatti in $\mathbb{Z} \times \mathbb{Z}$, se $(a, b) \in \mathbb{Z} \times \mathbb{Z}$, $\langle (a, b) \rangle = \{(ka, kb) : k \in \mathbb{Z}\} = \{(x, y) : a \text{ divide } x, b \text{ divide } y\} \subsetneq \mathbb{Z} \times \mathbb{Z}$.
- $\mathbb{Z}_2 \times \mathbb{Z}_2$ non è ciclico. Infatti, in $\mathbb{Z}_2 \times \mathbb{Z}_2$ si ha:
 - $\langle (\overline{0}, \overline{0}) \rangle = \{(\overline{0}, \overline{0})\}$
 - $\langle (\overline{0}, \overline{1}) \rangle = \{\overline{0}\} \times \mathbb{Z}_2$
 - $\langle (\overline{1}, \overline{0}) \rangle = \mathbb{Z}_2 \times \{\overline{0}\}$
 - $\langle (\overline{1}, \overline{1}) \rangle = \{(\overline{0}, \overline{0}), (\overline{1}, \overline{1})\}$

Quindi nessun elemento di $\mathbb{Z}_2 \times \mathbb{Z}_2$ genera $\mathbb{Z}_2 \times \mathbb{Z}_2$.

Teorema (di isomorfismo per gruppi abeliani): Sia $f : G_1 \rightarrow G_2$ un morfismo di gruppi abeliani. Allora esiste un morfismo iniettivo $\varphi : G_1 / \text{Ker}(f) \rightarrow G_2$ tale che il seguente diagramma è commutativo:

$$\begin{array}{ccc} G_1 & \xrightarrow{f} & G_2 \\ \pi \downarrow & \nearrow \varphi & \\ G_1 / \text{Ker}(f) & & \end{array}$$

In particolare, $G_1 / \text{Ker}(f) \simeq \Im(f)$.

Dimostrazione: L'assegnazione $[g] \mapsto f(g), \forall g \in G$, definisce una funzione $\varphi : G_1/Ker(f) \rightarrow G_2$.

Infatti, se $g' \sim g$, ossia $[g] = [g']$, allora $g = g' + h, h \in Ker(f)$.

Dunque $f(g) = f(g' + h) = f(g') + f(h) = f(g')$. Poiché f è morfismo di gruppi, anche φ lo è.

Inoltre $Ker(f) = \{[g] \in G/Ker(f) : \varphi([g]) = O_2\} = \{[g] \in G/Ker(f) : f(g) = O_2\} = [O_1]$.

Quindi φ è iniettiva.

Infine, $\varphi : G_1/Ker(f) \rightarrow Im(f)$ è un morfismo di gruppi, iniettivo e suriettivo, quindi un isomorfismo.

Teorema: Sia G un gruppo ciclico. Allora ogni sottogruppo di G è ciclico.

Dimostrazione: Sia $g \in G$ tale che $g = \langle g \rangle$. La funzione $\varphi : (\mathbb{Z}, +) \rightarrow G$ definita da $\varphi(g) = g^n, \forall n \in \mathbb{Z}$, è un morfismo suriettivo di gruppi.

- G è infinito: allora $Ker(f) = \{0\}$ e quindi φ è iniettivo. Dunque φ è un isomorfismo di gruppi. Tutti i sottogruppi di \mathbb{Z} sono ciclici.
- G è finito: sia $H \subseteq G$ un sottogruppo. Allora $\varphi^{-1}(H) := \{n \in \mathbb{Z} : \varphi(n) \in H\} \subseteq \mathbb{Z}$ è un sottogruppo di \mathbb{Z} , quindi esiste $\varphi^{-1}(H) = \langle k \rangle$ con $k \in \mathbb{N}$.
La restrizione $\varphi : k\mathbb{Z} \rightarrow H$ è un morfismo suriettivo di gruppi e $\varphi(hk) = \varphi(\underbrace{k + k + \dots + k}_{h \text{ volte}}) = \varphi(k)\varphi(k) \dots \varphi(k) = [\varphi(k)]^h, \forall h \in \mathbb{Z}$. Quindi $H = \langle \varphi(k) \rangle$.

Corollario: L'insieme dei sottogruppi di $\mathbb{Z}_n, n \in \mathbb{N}$ è $\{\langle \overline{m} \rangle : \overline{m} \in \mathbb{Z}_n\}$.

Proposizione: Sia $n \in \mathbb{N}$ e sia d/n (d divide n). Allora esiste al più un unico sottogruppo di \mathbb{Z}_n di cardinalità d .

Dimostrazione: Sia $H \subseteq \mathbb{Z}_n$ sottogruppo tale che $|H| = d$. Si considerino le proiezioni canoniche $\mathbb{Z} \xrightarrow{\pi_1} \mathbb{Z}_n \xrightarrow{\pi_2} \mathbb{Z}_n/H$.

Poiché $\pi_1^{-1}(H) = \{m \in \mathbb{Z} : \pi_1(m) \in H\}$ è un sottogruppo di \mathbb{Z} , allora esiste $k \in \mathbb{N}$ tale che $\pi_1^{-1}(H) = k\mathbb{Z}$. Inoltre $Ker(\pi_1 \cdot \pi_2) = \pi_1^{-1}(H)$ e quindi, essendo $\pi_1 \cdot \pi_2$ un morfismo suriettivo di gruppi, $\mathbb{Z}_n/H \simeq \mathbb{Z}/\pi_1^{-1}(H) = \mathbb{Z}/k\mathbb{Z} = \mathbb{Z}_k$.

Quindi $|\mathbb{Z}_k| = k = |\mathbb{Z}_n/H| = |\mathbb{Z}_n|/|H| = \frac{n}{d}$, ossia k è univocamente determinato, e allora $H = \pi_1(k\mathbb{Z})$ è univocamente determinato.

Esempio: I sottogruppi di \mathbb{Z}_{899} sono quattro, perché $899 = 31 \cdot 29$, quindi c'è un sottogruppo di cardinalità 1 (il sottogruppo banale), uno di cardinalità 31, uno di cardinalità 29 e \mathbb{Z}_{899} .

Sono: $\{\{0\}, \langle \overline{29} \rangle, \langle \overline{31} \rangle, \mathbb{Z}_{899}\}$.

1.6 Anelli

Definizione: Sia X un insieme su cui sono definite due operazioni $+$ e \cdot .

X è un **anello** con unità 1_X se:

- $(X, +)$ è un gruppo abeliano
- (X, \cdot) è un monoide con unità 1_X

- vale la proprietà distributiva:
 - $a \cdot (b + c) = a \cdot b + a \cdot c$
 - $(a + b) \cdot c = a \cdot c + b \cdot c, \forall a, b, c \in X$

Definizione: Diciamo che un anello X è **commutativo** se il monoide (X, \cdot) è commutativo.

Indichiamo con "0" l'identità del gruppo $(X, +)$.

Esempio:

- Gli insiemi $\mathbb{Z}, \mathbb{Q}, \mathbb{R}, \mathbb{C}$ con le operazioni di addizione e moltiplicazione sono anelli commutativi con unità, che è il numero "1".
- L'insieme delle matrici $n \times n, n > 1$ a valori su \mathbb{Z} , su \mathbb{Q} , su \mathbb{R} o su \mathbb{C} , con l'operazione di somma e il prodotto righe per colonne, è un anello **non commutativo**, con unità la matrice identità.
In generale, se A è un anello commutativo con unità, l'insieme $Mat_{n \times n}(A)$ delle matrici a valori in \mathbb{R} con le operazioni di somma e prodotto righe per colonne, è un anello non commutativo con unità.
- $\{X\}$ è un anello, detto **anello nullo**. Le due operazioni sono la stessa e $0 = 1_{\{X\}} = x$.

Considereremo sempre $0 \neq 1_A$ e studieremo solo anelli commutativi con unità. Quindi quando diremo "anello" intendiamo "anello con unità".

Definizione: Sia A un anello commutativo. Un elemento $x \in A$ è detto **zero divisore** se esiste $y \in A \setminus \{0\}$ tale che $xy = 0$.

Definizione: Diciamo che un elemento $x \in A$ è **invertibile** se è un elemento invertibile del monoide (A, \cdot) .

Proposizione: Sia A un anello commutativo. Allora l'insieme degli elementi invertibili di A è disgiunto dall'insieme degli zero-divisori di A .

Dimostrazione: Siano $x, y \in A$ tali che $xy = 0$. Se x è invertibile, allora $x^{-1}xy = y = 0$, quindi x non è uno zero-divisore.

Proposizione (legge di cancellazione): Sia A un anello commutativo e sia $x \in A$ un elemento che non è uno zero-divisore. Allora $xy = xz \rightarrow y = z, \forall y, z \in A$.

Dimostrazione: Se $xy = xz$ allora $x(y - z) = 0$. Poiché x non è uno zero-divisore, allora $y - z = 0$, ossia $y = z$.

Definizione: Un anello commutativo privo di zero-divisori non nulli è detto **dominio di integrità**.

Definizione: Un anello commutativo i cui elementi non nulli sono tutti invertibili è detto **campo**.

Esempio: L'anello \mathbb{Z} è un dominio di integrità, ma non è un campo. Gli anelli $\mathbb{Q}, \mathbb{R}, \mathbb{C}$ sono campi.

1.7 Ideali

Definizione: Sia A un anello commutativo. Un sottoinsieme $I \subseteq A$ è detto **ideale** di A se:

- I è un sottogruppo di $(A, +)$
- $ax \in I, \forall a \in A, x \in I$

Esempio: Abbiamo già visto che ogni sottogruppo di $(\mathbb{Z}, +)$ è del tipo $n\mathbb{Z} = \{kn : k \in \mathbb{Z}\}$, dove $n \in \mathbb{N}$. Inoltre, se $a \in \mathbb{Z}$ e $x \in n\mathbb{Z}$, ossia $x = kn$ per qualche $k \in \mathbb{Z}$, si ha che $ax = akn \in n\mathbb{Z}$. Quindi $n\mathbb{Z}$ è un ideale di \mathbb{Z} , $\forall n \in \mathbb{N}$, e tutti gli ideali di \mathbb{Z} sono di questo tipo.

Osservazioni: Siano $I, J \subseteq A$ ideali di un anello commutativo A . Allora :

- $I \cap J$ è un ideale di A
- $I + J := \{x + y : x \in I, y \in J\}$ è un ideale di A
- $IJ := \langle \{xy : x \in I, y \in J\} \rangle$ è un ideale di A

Definizione: Sia $S \subseteq A$ un sottoinsieme di un anello commutativo. **L'ideale generato da S** è l'intersezione di tutti gli ideali di A che contengono S e lo indichiamo con $\langle S \rangle$. Se $S = \{x\}$, diciamo che $\langle S \rangle$ è **l'ideale principale generato da $x \in A$** .

Esempio: Abbiamo visto che gli ideali di \mathbb{Z} sono tutti e soli i sottoinsiemi $n\mathbb{Z} = \langle n \rangle, n \in \mathbb{N}$. Quindi gli ideali di \mathbb{Z} sono tutti principali.

Definizione: un anello i cui ideali sono tutti principali si dice **anello ad ideali principali**.

Proposizione: Sia A un anello commutativo e $I \subseteq A$ un ideale. Allora:

- $I = A$ se e solo se I contiene un elemento invertibile
- A è un campo sse i suoi unici ideali sono $\langle 0 \rangle$ e $A = \langle 1_A \rangle$

Dimostrazione:

- se $I = A$ allora $1_A \in I$ e 1_A è invertibile.
Sia $u \in I$ un elemento invertibile. Allora $u^{-1} \in A$ e quindi $1_A u u^{-1} \in I$. Ne segue che $A = \langle 1_A \rangle \subseteq I$. e quindi $I = A$.
- Sia A un campo e sia $I \neq \langle 0 \rangle$.
se $n \in I$ e $x \neq 0$ allora x è invertibile e quindi $I = A$ per il punto sopra.
Viceversa, se $\langle 0 \rangle$ e A sono gli unici ideali di A , e se $x \in A \setminus \{0\}$, allora $\langle x \rangle = \langle 1_A \rangle$, ossia $ax = 1_A$ per qualche $a \in A$. Quindi x è invertibile.

1.7.1 Anelli quoziente

Sia A un anello commutativo e $I \subseteq A$ un ideale.

In particolare, A con l'operazione $+$ è un gruppo abeliano e I è un sottogruppo di A . Allora possiamo definire il gruppo quoziente A/I .

Con l'operazione $[x] \cdot [y] := [xy]$, per ogni $[x], [y] \in A/I$, abbiamo che A/I è un anello commutativo con unità $[1_A]$.

Infatti, mostriamo che l'operazione è ben definita. Siano $x' \in [x]$ e $y' \in [y]$. Allora esistono $i_x \in I$ e $i_y \in I$ tali che $x' = x + i_x$ e $y' = y + i_y$.

Quindi $x'y' = (x + i_x)(y + i_y) = xy + \underbrace{xi_y + yi_x + i_xi_y}_{\in I \text{ perchè } I \text{ è un ideale di } A}$

Quindi $[x'y'] = [xy]$.

Inoltre $[1_A][x] = [1_Ax] = [x]$, per ogni $[x] \in A/I$, quindi $[1_A]$ è l'unità di A/I .

Esempio: Abbiamo visto che $n\mathbb{Z} = \{kn : k \in \mathbb{Z}\}$ è un ideale dell'anello \mathbb{Z} . Quindi il quoziente $\mathbb{Z}_n = \mathbb{Z}/n\mathbb{Z}$ ha la struttura di anello.

- $\mathbb{Z}_0 \simeq \mathbb{Z}$
- $\mathbb{Z}_1 \simeq \{0\}$ anello nullo.
- $\mathbb{Z}_2 \simeq \{\bar{0}, \bar{1}\}$

\cdot	$\bar{0}$	$\bar{1}$
$\bar{0}$	$\bar{0}$	$\bar{0}$
$\bar{1}$	$\bar{0}$	$\bar{1}$

- $\mathbb{Z}_3 \simeq \{\bar{0}, \bar{1}, \bar{2}\}$ è un campo perchè $\bar{1}$ è invertibile e $\bar{2} \cdot \bar{2} = \bar{1}$, quindi anche $\bar{2}$ è invertibile.

\cdot	$\bar{0}$	$\bar{1}$	$\bar{2}$
$\bar{0}$	$\bar{0}$	$\bar{0}$	$\bar{0}$
$\bar{1}$	$\bar{0}$	$\bar{1}$	$\bar{2}$
$\bar{2}$	$\bar{0}$	$\bar{2}$	$\bar{1}$

- $\mathbb{Z}_4 = \{\bar{0}, \bar{1}, \bar{2}, \bar{3}\}$ dove $\bar{2} \cdot \bar{2} = \bar{0}$, quindi \mathbb{Z}_4 non è un dominio di integrità. In particolare non è un campo.

\cdot	$\bar{0}$	$\bar{1}$	$\bar{2}$	$\bar{3}$
$\bar{0}$	$\bar{0}$	$\bar{0}$	$\bar{0}$	$\bar{0}$
$\bar{1}$	$\bar{0}$	$\bar{1}$	$\bar{2}$	$\bar{3}$
$\bar{2}$	$\bar{0}$	$\bar{2}$	$\bar{0}$	$\bar{2}$
$\bar{3}$	$\bar{0}$	$\bar{3}$	$\bar{2}$	$\bar{1}$

Vediamo che \mathbb{Z}_n è un campo se e solo se $n \in \mathbb{N} \setminus \{0, 1\}$ è un numero primo (per $n = 0$ abbiamo $\mathbb{Z}_0 \simeq \mathbb{Z}$ e per $n = 1$ abbiamo l'anello nullo).

Un ideale di \mathbb{Z}_n è un sottogruppo di \mathbb{Z}_n .

Poiché \mathbb{Z}_n è ciclico, i suoi sottogruppi sono ciclici e sono $\{\langle \bar{m} \rangle : \bar{m} \in \mathbb{Z}_n\}$. Inoltre $\langle \bar{m} \rangle \subseteq \mathbb{Z}_n$

è un ideale, $\forall \overline{m} \in \mathbb{Z}_n$. Infatti, se $\overline{a} \in \mathbb{Z}$, allora $\overline{a}\overline{m} = \overline{am} = \underbrace{\overline{m} + \overline{m} + \dots + \overline{m}}_{a \text{ volte}} \in \langle \overline{m} \rangle$

Quindi $\{\langle \overline{m} \rangle : \overline{m} \in \mathbb{Z}_n\}$ è l'insieme degli ideali di \mathbb{Z}_n (\mathbb{Z}_n è anello ad ideali principali).

Inoltre, se $n > 1$, $\{\langle \overline{m} \rangle \overline{m} \in \mathbb{Z}_n\} = \{\{\overline{0}\}, \mathbb{Z}_n\} \cup \{\langle \overline{m} \rangle : MCD_{m \neq 0}\{m, n\} \neq 1\}$

Quindi \mathbb{Z}_n è un campo se e solo se $\{\langle \overline{m} \rangle : \overline{m} \in \mathbb{Z}_n\} = \{\{\overline{0}\}, \mathbb{Z}_n\}$ se e solo se n è un numero primo.

Esempio: \mathbb{Z}_3 è un campo, si ha che $\overline{2}^{-1} = \overline{2}$. Infatti $\overline{2} \cdot \overline{2} = \overline{4} = \overline{1}$.
Invece \mathbb{Z}_4 non lo è; infatti $\overline{2} \cdot \overline{2} = \overline{0}$ e quindi $\overline{2}$ non è invertibile.

1.8 Algoritmo di Euclide e identità di Bézout su \mathbb{Z}

Vogliamo calcolare il massimo comun divisore tra 1876 e 365.

Usiamo l'algoritmo di Euclide:

$$\begin{aligned} 1876 &= 5 \cdot 365 + 51 \\ 365 &= 7 \cdot 51 + 8 \\ 51 &= 6 \cdot 8 + 3 \\ 8 &= 2 \cdot 3 + 2 \\ 3 &= 1 \cdot 2 + 1 \\ 2 &= 2 \cdot 1 + 0 \end{aligned}$$

Quindi $MCD\{1876, 365\} = 1$.

Adesso vogliamo trovare due numeri $x, y \in \mathbb{Z}$ tali che $1876x + 365y = 1$.

Un'identità del tipo $ax + by = MCD\{a, b\}$ si chiama **identità di Bézout**.

Dall'algoritmo di Euclide abbiamo:

$$\begin{aligned} 1 &= 3 - 2 \cdot 1 \\ 2 &= 8 - 3 \cdot 2 \\ 3 &= 51 - 6 \cdot 8 \\ 8 &= 365 - 7 \cdot 51 \\ 51 &= 1876 - 5 \cdot 365 \end{aligned}$$

Quindi

$$\begin{aligned} 1 &= 3 - 2 = \\ &= 3 - (8 - 3 \cdot 2) = 3 \cdot 3 - 8 \\ &= 3 \cdot (51 - 6 \cdot 8) - 8 = 3 \cdot 51 - 8 \cdot 19 \\ &= 3 \cdot 51 - 19(365 - 51 \cdot 7) \\ &= 136 \cdot 51 - 19 \cdot 365 \\ &= 136 \cdot (1876 - 365 \cdot 5) - 19 \cdot 365 \\ &= 136 \cdot 1876 - 699 \cdot 365 \end{aligned}$$

Quindi $x = -699$ e $y = 136$.

In generale possiamo enunciare il seguente teorema:

Teorema: siano $a, b \in \mathbb{N} \setminus 0$, se $a \mid b$, allora $a = MCD\{a, b\}$.

se $a \nmid b$ e r è l'ultimo resto non nullo dell'algoritmo di Euclide, allora $r = MCD\{a, b\}$.

inoltre esistono $x, y \in \mathbb{Z}$ tali che $ax + by = MCD\{a, b\}$.

Dimostrazione: Sia $I = \{ax + by : x, y \in \mathbb{Z}\}$ l'insieme dei multipli di a e b .

Poiché I è un ideale di \mathbb{Z} , allora $I = n\mathbb{Z}$ per qualche $n \in \mathbb{N}$.

Poiché $a \in I$, allora $n \mid a$.

Poiché $b \in I$, allora $n \mid b$.

Quindi $n = \text{MCD}\{a, b\}$.

Inoltre, poiché $r \in I$, allora $r = ax + by$ per qualche $x, y \in \mathbb{Z}$.

Quindi $r = \text{MCD}\{a, b\}$.

fatta da copilot, controllare a pag 40 di "a concrete introduction to higher algebra" di Lindsay Childs

1.9 Equazioni diofantee lineari

sono equazioni del tipo $ax + by = c$, con $a, b, c \in \mathbb{Z}$.

Proposizione: siano $a, b, c \in \mathbb{Z}$.

allora esistono $x, y \in \mathbb{Z}$ tali che $ax + by = c$ se e solo se $\text{MCD}\{a, b\} \mid c$.

Dimostrazione: Se $ax + by = c$, allora $\text{MCD}\{a, b\} \mid c$.

Viceversa, se $d := \text{MCD}\{a, b\} \mid c$, allora abbiamo un'identità di Bézout $ax + by = d$ $\forall x, y \in \mathbb{Z}$.

se $d \mid c$ cioè se $c = d \cdot k$ per qualche $k \in \mathbb{Z}$, $a(kx) + b(ky) = kd = c$

Esempio: l'equazione diofantea:

$365x - 1876y = 24$ ha soluzione perchè $\text{MCD}\{365, 1876\} = 1$ e $1 \mid 24$.

Avevamo l'identità di Bézout $365(-699) - 1876(-136) = 1$, moltiplicando per 24 otteniamo

$365(-699 \cdot 24) - 1876(-136 \cdot 24) = 24$.

ossia una soluzione è $x = -699 \cdot 24$ e $y = -136 \cdot 24$.

Esempio: in \mathbb{Z}_{1876} calcolare, se esiste, l'inverso moltiplicativo di $\overline{365}$.

abbiamo che $\overline{365} \cdot \overline{a} = \overline{1}$ in \mathbb{Z}_{1876}

se e solo se esistono $a, b \in \mathbb{Z}$ t.c. $365 \cdot a = 1 + b \cdot 1876 \Leftrightarrow 365 \cdot a - 1876 \cdot b = 1$.

una soluzione è $a = -699$ e $b = 136$, ossia $\overline{365}^{-1} = \overline{-699} = \overline{1177}$.

1.10 Morfismi di anelli

Definizione: se $p \in \mathbb{N}$ è un numero primo, scriviamo $\mathbb{F}_p := \mathbb{Z}_p$;
il campo \mathbb{F}_p ha p elementi.

Definizione: Siano A, B due anelli. Un'applicazione $f : A \rightarrow B$ è un **morfismo di anelli** se:

- $f : (A, +) \rightarrow (B, +)$ è un morfismo di gruppi.
- $f : (A, \cdot) \rightarrow (B, \cdot)$ è un morfismo di monoidi.

Definizione: il nucleo di un morfismo di anelli
 $f : A \rightarrow B$ è l'insieme $\text{Ker}(f) := \{a \in A : f(a) = 0\}$.

Osservazione: $\text{Ker}(f)$ è un ideale di A , A anello commutativo.

Esempio: sia $I \subseteq A$ un ideale di un anello commutativo A .
allora la proiezione canonica $\pi : A \rightarrow A/I$ che mappa $a \rightarrow [a]$
è un morfismo di anelli il cui nucleo è I .

Esempio: si consideri l'anello dei numeri complessi \mathbb{C} .
allora il coniugio $\bar{z} = \overline{a + bi} = a - bi$ è un morfismo di anelli da \mathbb{C} in \mathbb{C} :
 $\bar{1} = 1, \overline{z_1 + z_2} = \bar{z}_1 + \bar{z}_2, \overline{z_1 \cdot z_2} = \bar{z}_1 \cdot \bar{z}_2$

Teorema (di isomorfismo per anelli commutativi): Sia $f : A \rightarrow B$
un morfismo di anelli commutativi. Allora esiste un morfismo iniettivo di anelli
 $\Psi : A/\text{Ker}(f) \rightarrow B$ tale che il seguente diagramma è commutativo:

$$\begin{array}{ccc} A & \xrightarrow{f} & B \\ \pi \downarrow & \nearrow \Psi & \\ A/\text{Ker}(f) & & \end{array}$$

in particolare, se f è suriettivo, allora Ψ è un isomorfismo di anelli.

Notazione: $\bar{x} \in \mathbb{Z}_n$. La classe di equivalenza \bar{x} la scriveremo anche $x \bmod n$.

Teorema (Teorema cinese dei resti): siano $n_1, n_2, \dots, n_k \in \mathbb{N} \setminus \{0, 1\}$ tali che $MCD\{n_i, n_j\} = 1$ per ogni $1 \leq i, j \leq k, i \neq j$.

sia $n := n_1 \cdot n_2 \cdot \dots \cdot n_k$.

allora la funzione $\Psi : \mathbb{Z}_n \rightarrow \mathbb{Z}_{n_1} \times \mathbb{Z}_{n_2} \times \dots \times \mathbb{Z}_{n_k}$ che mappa

$x \bmod n \rightarrow (x \bmod n_1, x \bmod n_2, \dots, x \bmod n_k)$ è un isomorfismo di anelli.

Dimostrazione: vediamo prima di tutto che Ψ è un morfismo di anelli dove $f : \mathbb{Z} \rightarrow \mathbb{Z}_{n_1} \times \mathbb{Z}_{n_2} \times \dots \times \mathbb{Z}_{n_k}$ è definita da $f(x) = (x \bmod n_1, x \bmod n_2, \dots, x \bmod n_k) \forall x \in \mathbb{Z}$.

- $f(a + b) = ((a + b) \bmod n_1, \dots, (a + b) \bmod n_k)$
 $= (a \bmod n_1 + b \bmod n_1, \dots, a \bmod n_k + b \bmod n_k)$
 $= (a \bmod n_1, \dots, a \bmod n_k) + (b \bmod n_1, \dots, b \bmod n_k)$
 $= f(a) + f(b), \forall a, b \in \mathbb{Z}$
- $f(1) = (1 \bmod n_1, \dots, 1 \bmod n_k)$ e $(1 \bmod n_1, \dots, 1 \bmod n_k)$ è l'unità del prodotto diretto di anelli $\mathbb{Z}_{n_1} \times \mathbb{Z}_{n_2} \times \dots \times \mathbb{Z}_{n_k}$
- $f(a \cdot b) = ((a \cdot b) \bmod n_1, \dots, (a \cdot b) \bmod n_k)$
 $= (a \bmod n_1 \cdot b \bmod n_1, \dots, a \bmod n_k \cdot b \bmod n_k)$
 $= (a \bmod n_1, \dots, a \bmod n_k) \cdot (b \bmod n_1, \dots, b \bmod n_k)$
 $= f(a) \cdot f(b), \forall a, b \in \mathbb{Z}$

ora mostriamo che f è suriettivo:

sia $(a_1 \bmod n_1, \dots, a_k \bmod n_k) \in \mathbb{Z}_{n_1} \times \mathbb{Z}_{n_2} \times \dots \times \mathbb{Z}_{n_k}$

osserviamo che $MCD\{n_i, n_1 n_2 \dots n_{i-1} n_{i+1} \dots n_k\} = 1, \forall 1 \leq i \leq k$.

quindi abbiamo le identità di Bézout: $c_i n_i + b_i \frac{n}{n_i} = 1$ ossia

$u_i + v_i = 1$ dove $u_i = c_i n_i \in \langle n_i \rangle$ e $v_i = b_i \frac{n}{n_i} \in \langle \frac{n}{n_i} \rangle$.

definiamo $x := a_1 v_1 + \dots + a_k v_k$ e abbiamo che $f(x) = (a_1 \bmod n_1, \dots, a_k \bmod n_k)$.

infatti $v_i \bmod n_j = \begin{cases} 0 & \text{se } i \neq j \\ 1 & \text{se } i = j \end{cases}$

dal teorema di isomorfismo abbiamo che $\mathbb{Z}/\text{Ker}(f) \simeq \mathbb{Z}_{n_1} \times \dots \times \mathbb{Z}_{n_k}$ come anelli.

ma abbiamo che $\text{Ker}(f) = \langle n_1 \rangle \cap \langle n_2 \rangle \cap \dots \cap \langle n_k \rangle$

$= \langle \text{mcm}\{n_1, \dots, n_k\} \rangle = \langle n_1 n_2 \dots n_k \rangle$ dato che n_i e n_j sono coprimi $\forall i \neq j$.

quindi $\mathbb{Z}/\text{Ker}(f) = \mathbb{Z}/\langle n \rangle = \mathbb{Z}_n$ e l'isomorfismo $\Psi : \mathbb{Z}_n \rightarrow \mathbb{Z}_{n_1} \times \dots \times \mathbb{Z}_{n_k}$

è quello dell'enunciato del teorema.

Esempio: siano $n_1 = 3, n_2 = 7, n_3 = 10$. Allora $n := n_1 n_2 n_3 = 210$
e abbiamo l'isomorfismo di anelli $\mathbb{Z}_{210} \simeq \mathbb{Z}_3 \times \mathbb{Z}_7 \times \mathbb{Z}_{10}$.
sia $(2 \bmod 3, 5 \bmod 7, 4 \bmod 10) \in \mathbb{Z}_3 \times \mathbb{Z}_7 \times \mathbb{Z}_{10}$, questa terna corrisponde ad un elemento
 $x \bmod 210 \in \mathbb{Z}_{210}$ che soddisfa il sistema

$$\begin{cases} x \bmod 3 = 2 & \bmod 3 \\ x \bmod 7 = 5 & \bmod 7 \\ x \bmod 10 = 4 & \bmod 10 \end{cases}$$

la dimostrazione del teorema cinese dei resti ci dice come trovare x .
 $x = 2v_1 + 5v_2 + 4v_3$ dove se $3a + 70b = 1, 7a + 30b = 1$ e $10a + 21b = 1$
sono identità di Bézout, allora $v_1 = 70b, v_2 = 30b = 30, v_3 = 21b$

$$\begin{aligned} 3a + 70b = 1 &\rightarrow a = -23, b = 1 \rightarrow v_1 = 70 \\ 7a + 30b = 1 &\rightarrow 30 = 4 \cdot 7 + 2, 7 = 3 \cdot 2 + 1 \\ &\rightarrow 1 = 7 - 3 \cdot 2 = 7 - 3(30 - 4 \cdot 7) = \\ 13 \cdot 7 - 3 \cdot 30 &= 91 - 90 = 1 \rightarrow a = 13, b = -3 \rightarrow v_2 = -3 \cdot 30 \\ 10a + 21b = 1 &\rightarrow a = -2, b = 1 \rightarrow v_3 = 21 \end{aligned}$$

quindi $x = 2 \cdot 70 - 5 \cdot 3 \cdot 30 + 4 \cdot 21 = 194 \bmod 210$

Corollario: Sia $U(\mathbb{Z}_n)$ il gruppo degli elementi invertibili dell'anello \mathbb{Z}_n .
sia $n := n_1 \dots n_k$ dove $MCD\{n_i, n_j\} = 1 \forall 1 \leq i, j \leq k, i \neq j$.
e $n_i \in \mathbb{N} \setminus \{0, 1\} \forall 1 \leq i \leq k$.
allora come i gruppi $U(\mathbb{Z}_n) \simeq U(\mathbb{Z}_{n_1}) \times \dots \times U(\mathbb{Z}_{n_k})$

Dimostrazione: l'isomorfismo Ψ del teo. cinese dei resti, ristretto a $U(\mathbb{Z}_n)$ dà un
isomorfismo di gruppi

Poiché un elemento $\bar{x} \in \mathbb{Z}_n$ è invertibile s.s.e. esiste un'identità di Bézout $ax + bn = 1$
abbiamo che \bar{x} è invertibile s.s.e. $MCD\{x, n\} = 1$.
Quindi $|U(\mathbb{Z}_n)| = \varphi(n)$, con φ funzione di Eulero.

dal precedente Corollario e da questo segue un altro Corollario:

Corollario: Sia $\varphi : \mathbb{N} \setminus \{0\} \rightarrow \mathbb{N} \setminus \{0\}$ la funzione φ di Eulero.
siano $x, y \in \mathbb{N} \setminus \{0\}$ tali che $MCD\{x, y\} = 1$, allora $\varphi(xy) = \varphi(x) \cdot \varphi(y)$.

Dimostrazione: dal Corollario precedente abbiamo che $U(\mathbb{Z}_{xy}) \simeq U(\mathbb{Z}_x) \times U(\mathbb{Z}_y)$
come i gruppi, quindi:

$$\varphi(xy) = |U(\mathbb{Z}_{xy})| = |U(\mathbb{Z}_x) \times U(\mathbb{Z}_y)| = |U(\mathbb{Z}_x)| \cdot |U(\mathbb{Z}_y)| = \varphi(x) \cdot \varphi(y)$$