

**A.A. 2015-2016. CORSO DI ALGEBRA 1.**  
**PROFF. P. PIAZZA, E. SPINELLI.**  
**SOLUZIONE ESERCIZI FOGLIO 4.**

**Esercizio 4.1.** Data una coppia  $a, b \in \mathbb{N}^*$ , consideriamo la loro fattorizzazione in primi. Esprimere in termini di  $\text{MCD}(a, b)$  e  $a \cdot b$  il prodotto dei fattori non comuni nelle fattorizzazioni di  $a$  e  $b$ . Determinare eventuali coppie  $(a, b) \in \mathbb{N}^* \times \mathbb{N}^*$  tali che:

$$\text{MCD}(a, b) = 77, a \cdot b = 847; \quad \text{MCD}(a, b) = 21, a \cdot b = 9261$$

$$\text{MCD}(a, b) = 70, a \cdot b = 9800; \quad \text{MCD}(a, b) = 75, a \cdot b = 2025$$

*Soluzione.* Sia  $M = \text{MCD}(a, b)$  allora  $a = \alpha \cdot M$  e  $b = \beta \cdot M$ . Vogliamo scrivere il prodotto  $\alpha \cdot \beta$  in termini di  $a \cdot b$  e  $\text{MCD}(a, b)$ :

$$\alpha \cdot \beta = \frac{a \cdot b}{M^2} = \frac{a \cdot b}{\text{MCD}(a, b)^2}$$

Individuata la relazione che sussiste tra il prodotto dei fattori non comuni e le quantità  $a \cdot b$  e  $\text{MCD}(a, b)$ , osserviamo che essa ci fornisce un rapido test per verificare se una coppia di naturali  $(k_1, k_2) \in \mathbb{N}^* \times \mathbb{N}^*$  può essere l'MCD e il prodotto di una coppia di numeri  $(a, b) \in \mathbb{N}^* \times \mathbb{N}^*$ :  $k_2/(k_1)^2$  deve infatti essere un numero naturale.

$\text{MCD}(a, b) = 77, a \cdot b = 847$ ; cominciamo sfruttando quanto appreso nella prima parte: è facile vedere che  $847/77^2$  non è un numero naturale, pertanto non può esistere alcuna coppia  $(a, b) \in \mathbb{N}^* \times \mathbb{N}^*$  tale che  $\text{MCD}(a, b) = 77$  e  $a \cdot b = 847$ . Si può anche procedere in modo meno brutale utilizzando la scomposizione in fattori primi dei due numeri:  $77 = 7 \cdot 11$  mentre  $847 = 7 \cdot 11^2$ ; la fattorizzazione in primi del prodotto di  $a$  e  $b$  deve contenere il quadrato della fattorizzazione in primi del MCD, ne deduciamo che una tale coppia di numeri naturali  $(a, b)$  non può esistere.

$\text{MCD}(a, b) = 21, a \cdot b = 9261$ ; sfruttiamo il test di compatibilità dimostrato nella prima parte:  $9261/21^2 = 21$ , è quindi possibile trovare coppie che realizzino le due condizioni sul MCD e sul prodotto. Fattorizziamo in primi: abbiamo che  $\text{MCD}(a, b) = 7 \cdot 21, a \cdot b = 3^3 \cdot 7^3$  e, utilizzando la notazione precedentemente introdotta,  $\alpha \cdot \beta = 3 \cdot 7$ . Per trovare le coppie  $(a, b) \in \mathbb{N}^* \times \mathbb{N}^*$  che risolvono il problema ci basta "redistribuire" il prodotto dei fattori non comuni in modo tale da mantenere fissato il Massimo Comun Divisore: abbiamo dunque 4 possibilità:  $(7^2 \cdot 3, 7 \cdot 3^2), (7 \cdot 3^2, 7^2 \cdot 3), (7 \cdot 3, 7^2 \cdot 3^2)$  e  $(7^2 \cdot 3^2, 7 \cdot 3)$ .

$\text{MCD}(a, b) = 70, a \cdot b = 9800$ ; calcoliamo  $\frac{a \cdot b}{\text{MCD}(a, b)^2} = \frac{9800}{70^2} = 2$ , possiamo quindi trovare delle coppie  $(a, b) \in \mathbb{N}^*$  che realizzano i valori scelti per il Massimo Comun Divisore e per il prodotto. Ragionando in analogia con il caso precedente ci accorgiamo che vi sono due coppie possibili:  $(70, 140)$  e  $(140, 70)$ .

$\text{MCD}(a, b) = 75, a \cdot b = 2025$ . Utilizziamo il test di compatibilità per le due condizioni:  $\frac{a \cdot b}{\text{MCD}(a, b)^2} = \frac{2025}{75^2} = \frac{9}{25}$ . Il numero così trovato non è un naturale, quindi non possono esistere coppie  $(a, b) \in \mathbb{N}^* \times \mathbb{N}^*$  compatibili.  $\square$

**Esercizio 4.2.** Siano dati due numeri primi distinti  $p$  e  $q$ . Utilizzando l'esercizio precedente determinare al variare di  $(i, j) \in \mathbb{N}^* \times \mathbb{N}^*$  il numero di coppie  $(a, b) \in \mathbb{N}^* \times \mathbb{N}^*$  tali che:  $\text{MCD}(a, b) = p \cdot q$  e  $a \cdot b = p^i \cdot q^j$ .

*Soluzione.* In questo esercizio si chiede di formalizzare in astratto quanto fatto nell'esercizio precedente. Si chiede di determinare al variare delle coppie  $(i, j) \in \mathbb{N}^* \times \mathbb{N}^*$  il numero di coppie (ordinate)

$(a, b) \in \mathbb{N}^* \times \mathbb{N}^*$  che realizzano  $\text{MCD}(a, b) = p \cdot q$  e  $a \cdot b = p^i \cdot q^j$ , dove  $p$  e  $q$  sono due numeri primi distinti.

La prima osservazione è che, per via della condizione di compatibilità dimostrata nell'esercizio 4.1, il rapporto  $\frac{a \cdot b}{\text{MCD}(a, b)^2} = \frac{p^i \cdot q^j}{p^2 \cdot q^2}$  deve essere un numero intero. Questo implica che il numero di coppie che realizzano  $\text{MCD}(a, b) = p \cdot q$  e  $a \cdot b = p^i \cdot q^j$  è zero per le coppie  $(i, j) \in \{(1, 1), (1, 2), (2, 1)\}$ . Supponiamo quindi che si abbia  $i, j \geq 2$ . Cominciamo con tre casi semplici.

$i = j = 2$ . Sappiamo che  $a = \alpha \cdot \text{MCD}(a, b)$  e che  $b = \beta \cdot \text{MCD}(a, b)$ . Dobbiamo quindi avere  $p^2 \cdot q^2 = a \cdot b = \alpha \cdot \beta \cdot (p \cdot q)^2$ . Questo implica  $\alpha = \beta = 1$  e dunque per  $i = j = 2$  vi è un'unica coppia  $(a, b) \in \mathbb{N}^* \times \mathbb{N}^*$  che realizza le condizioni imposte, ovvero  $a = p \cdot q$  e  $b = p \cdot q$ .

$i = 2, j = 3$ . In tal caso si verifica facilmente che il prodotto dei fattori non comuni  $\alpha \cdot \beta$  è proprio uguale a  $q$ . Abbiamo quindi  $p^2 q^3 = a \cdot b = q \cdot (p q)^2$ . Le soluzioni  $(a, b) \in \mathbb{N}^* \times \mathbb{N}^*$  sono quindi  $(p q^2, p q)$  e  $(p q, p q^2)$ .

$i = 3, j = 2$ . In analogia con il caso precedente si fa vedere che le soluzioni sono  $(p q, p^2 q)$  e  $(p^2 q, p q)$ .

$i = 3, j = 3$ . In questo caso il prodotto dei fattori non comuni  $\alpha \cdot \beta = \frac{a \cdot b}{\text{MCD}(a, b)^2} = \frac{p^3 q^3}{p^2 q^2} = p q$ . Tale prodotto può essere redistribuito senza restrizioni; le soluzioni sono quindi  $(p q, p^2 q^2)$ ,  $(p^2 q^2, p q)$ ,  $(p^2 q, p q^2)$ ,  $(p q^2, p^2 q)$ .

Affrontiamo ora il caso generale. Poiché il prodotto di  $a$  e  $b$  si fattorizza come potenze di  $p$  e  $q$  e poiché sia in  $a$  che in  $b$  devono apparire sia  $p$  che  $q$  almeno con potenza 1, il problema si riduce a trovare tutte le coppie di prodotti  $p^{i_1} q^{j_1}, p^{i_2} q^{j_2}$  con  $i_1 + i_2 = i$ ,  $j_1 + j_2 = j$  e  $\min\{i_1, i_2\} = \min\{j_1, j_2\} = 1$ . Ne segue che, non appena  $i \geq 3$  e  $j \geq 3$ , il numero di coppie compatibili con le condizioni  $a \cdot b = p^i q^j$ ,  $\text{MCD}(a, b) = p \cdot q$  è sempre uguale a 4 e le coppie sono  $(p^{i-1} q^{j-1}, p q)$ ,  $(p q, p^{i-1} q^{j-1})$ ,  $(p^{i-1} q, p q^{j-1})$ ,  $(p q^{j-1}, p^{i-1} q)$ .  $\square$

**Esercizio 4.3.** Denotiamo con  $\mathbb{Z}_n$  il gruppo  $\mathbb{Z}/n\mathbb{Z}$  e con  $\mathcal{U}(\mathbb{Z}_n)$  l'insieme degli elementi invertibili.

(A) Determinare  $\mathcal{U}(\mathbb{Z}_{24})$ .

(B) Dire se esistono elementi che sono inversi di se stessi. In caso affermativo determinare l'insieme di tali elementi.

(C) Verificare che il sottoinsieme degli elementi di  $\mathcal{U}(\mathbb{Z}_n)$  il cui quadrato è congruo ad 1 modulo  $n$  è chiuso rispetto al prodotto.

(D) Siano ora  $R_{yz} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$  e  $R_{xy} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$ . Verificare che hanno entrambe ordine<sup>1</sup> 2 ma

che il loro prodotto non ha tale ordine. Quale argomento utilizzato nel punto precedente non può essere applicato in questa nuova situazione?

*Soluzione.* Ricordiamo che per trovare gli invertibili di  $\mathcal{U}(\mathbb{Z}_n)$  è sufficiente trovare tutti i numeri  $1 \leq x \leq n - 1$  che sono coprimi con  $n$  e poi considerare le loro classi modulo  $n$ .

Tenendo a mente il fatto precedente cominciamo fattorizzando 24 come prodotto di primi:  $24 = 2^3 \cdot 3$ . Dobbiamo quindi trovare tutti i numeri tra 1 e 23 che non hanno fattori in comune con 24 (quindi numeri la cui fattorizzazione in primi non contenga né 2 né 3). La lista completa degli elementi di  $\mathcal{U}(\mathbb{Z}_{24})$  è quindi la seguente:  $\mathcal{U}(\mathbb{Z}_{24}) = \{\bar{1}, \bar{5}, \bar{7}, \bar{11}, \bar{13}, \bar{17}, \bar{19}, \bar{23}\}$ . Questo risolve il punto (A) dell'esercizio.

<sup>1</sup>Dato un gruppo  $G$  e un elemento  $a \in G \setminus \{1_G\}$  l'ordine dell'elemento  $a$  è definito come il più piccolo intero positivo  $k$  tale che  $a^k = 1_G$ .

Nel punto (B) veniva chiesto di individuare eventuali elementi di  $\mathcal{U}(\mathbb{Z}_{24})$  che fossero inversi di sé stessi, ovvero elementi di  $\mathcal{U}(\mathbb{Z}_{24})$  il cui quadrato fosse uguale ad  $\bar{1}$ , l'unità del gruppo moltiplicativo degli invertibili di  $\mathbb{Z}_{24}$ . A tale scopo è sufficiente prendere dei rappresentanti delle classi modulo 24 (ad esempio scegliamo i rappresentanti 1, 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23) farne i quadrati e vedere se qualcuno di essi è congruo ad 1 modulo 24. Ovviamente 1 è congruo ad 1 modulo 24;  $5^2 = 25 = 1 + 24$  dunque è congruo ad 1 modulo 24;  $7^2 = 49 = 1 + 48 = 1 + 2 \cdot 24$  e dunque anche  $\bar{7}^2 = \bar{1}$  in  $\mathcal{U}(\mathbb{Z}_{24})$ . Stessa cosa si verifica per tutti gli altri rappresentanti scelti. Ne segue che  $\mathcal{U}(\mathbb{Z}_{24})$  è composto esclusivamente da elementi il cui quadrato è uguale a  $\bar{1}$ .

Nel punto (C) si torna a considerare il caso generale  $\mathbb{Z}_n$ . Viene chiesto di dimostrare che il sottoinsieme degli elementi di  $\mathcal{U}(\mathbb{Z}_n)$  il cui quadrato è uguale ad  $\bar{1}$  è un sottoinsieme chiuso rispetto al prodotto. Per dimostrare questo fatto il modo più semplice è osservare che il gruppo  $\mathcal{U}(\mathbb{Z}_n)$  è commutativo. Siano quindi  $\bar{a}, \bar{b}$  due elementi di  $\mathcal{U}(\mathbb{Z}_n)$  tali che  $\bar{a}^2 = \bar{b}^2 = \bar{1}$ . Per commutatività del gruppo abbiamo che  $(\bar{a}\bar{b})^2 = \bar{a}^2\bar{b}^2 = \bar{1}$ , questo prova che il prodotto di due elementi di quadrato uguale ad  $\bar{1}$  è ancora un elemento il cui quadrato è uguale a  $\bar{1}$ .

Il punto (D) dell'esercizio aveva invece lo scopo di farvi osservare che, dato un generico gruppo (ad esempio il gruppo  $GL(3, \mathbb{R})$ , delle matrici  $3 \times 3$  invertibili) e presi due elementi di quadrato uguale all'identità del gruppo, il loro prodotto può non essere di quadrato uguale all'identità. A tale scopo è sufficiente osservare che  $R_{yz}R_{xy} \neq R_{xy}R_{yz}$  e che la matrice

$$R_{yz} \cdot R_{xy} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

non è di quadrato uguale ad Id nonostante  $R_{yz}^2 = \text{Id}$  e  $R_{xy}^2 = \text{Id}$ .  $\square$

**Esercizio 4.4.** Siano dati  $a, n \in \mathbb{Z}$ . Mostrare che vale una delle due condizioni:

- $\exists b \neq 0$  tale che  $a \cdot b \equiv 1 \pmod{n}$
- $\exists b \neq 0$  tale che  $a \cdot b \equiv 0 \pmod{n}$

Verificare con un esempio che se  $a \cdot b \equiv a \cdot c \pmod{n}$  (con  $a, b, c$  non nulli) non necessariamente risulta  $b \equiv c \pmod{n}$ . [Suggerimento. (A) Trovare una condizione necessaria e sufficiente affinché l'applicazione data da  $\mathbb{Z}_n \rightarrow \mathbb{Z}_n, b \rightarrow a \cdot b$  sia biiettiva. (B) Ricordare che un'applicazione tra due insiemi finiti della stessa cardinalità è biiettiva sse iniettiva sse suriettiva]

*Soluzione.* Per quanto riguarda la prima parte vi sono due modi di procedere. Il primo è sfruttando il Massimo Comun Divisore: sappiamo dalla teoria che un numero  $a$  è invertibile modulo  $n$  se e solo se  $\text{MCD}(a, n) = 1$ . Supponiamo ora che  $a$  sia un numero non congruo a 0 modulo  $n$  e tuttavia non coprimo con  $n$ ; sia dunque  $1 < M = \text{MCD}(a, n)$ . In particolare  $n = \alpha \cdot M$ . Osserviamo che  $0 < \alpha < n$ , poiché  $M > 1$ , e dunque esso è un elemento che non è congruo a 0 modulo  $n$ . Ma allora abbiamo che  $\alpha \cdot a \equiv 0 \pmod{n}$  con  $\bar{\alpha}$  non banale in  $\mathbb{Z}_n$ . Il caso in cui  $a$  è congruo a 0 modulo  $n$  è banale. Abbiamo quindi dimostrato che, assegnato  $n$ , per ogni numero  $a$  vale una delle due alternative enunciate nel testo dell'esercizio.

La via alternativa per risolvere questo esercizio è la seguente: possiamo definire la seguente mappa:

$$\ell_{\bar{a}}: \mathbb{Z}_n \rightarrow \mathbb{Z}_n, \quad \ell_{\bar{a}}: \bar{b} \mapsto \bar{a} \cdot \bar{b}$$

Osserviamo che tale applicazione è biiettiva se e solo se  $\bar{a}$  è invertibile: supponiamo che  $\bar{a}$  sia invertibile allora è possibile esplicitare un'inversa alla mappa  $\ell_{\bar{a}}$  semplicemente prendendo  $\ell_{\bar{a}^{-1}}$ ; viceversa supponiamo che  $\ell_{\bar{a}}$  sia biiettiva. In particolare la mappa è suriettiva e dunque esiste  $\bar{b} \in \mathbb{Z}_n$  tale che  $\bar{a} \cdot \bar{b} = \bar{1}$ , ne segue che  $\bar{b}$  è l'inverso di  $\bar{a}$  e che  $\bar{a}$  è dunque invertibile.

Supponiamo quindi che la mappa non sia biiettiva. Poiché si parla di un'applicazione tra insiemi della stessa cardinalità ne segue che la mappa non è iniettiva. Siano quindi  $\bar{b}_1$  e  $\bar{b}_2$  due elementi distinti con

la stessa immagine tramite  $\ell_{\bar{a}}$ . Ne segue che l'elemento  $\bar{b}_1 - \bar{b}_2 \neq \bar{0}$  viene inviato in  $\bar{0}$  da  $\ell_{\bar{a}}$ . Ne segue che  $\bar{a}$  deve essere un divisore dello zero. Questo conclude la seconda dimostrazione della prima parte dell'esercizio.

Nella seconda parte veniva chiesto di verificare con un esempio che  $a \cdot b \equiv a \cdot c \pmod{n}$  non necessariamente implica  $b \equiv c \pmod{n}$ . Si osservi quindi che  $6 \equiv 4 \pmod{2}$  mentre  $3 \not\equiv 2 \pmod{2}$ .  $\square$

**Esercizio 4.5.** Sia  $n = p_1^{h_1} \cdots p_m^{h_m}$  con  $p_i \neq p_j$  per  $i \neq j$  la fattorizzazione in primi di  $n$ .

(A) Sia  $a \in \mathbb{Z}$  tale che  $0 \leq a < n$ ;  $\bar{a} \in \mathbb{Z}_n$  è nilpotente se e soltanto se  $a = b \cdot p_1^{k_1} \cdots p_m^{k_m}$  e  $1 \leq k_i \leq h_i$  (dove  $b \in \mathbb{N}^*$ ).

(B) Determinare i nilpotenti di  $\mathbb{Z}_{150}$ .

(C) Dimostrare che  $\mathbb{Z}_n$  contiene nilpotenti se e solo se  $h_i > 1$  per almeno un indice  $i$ .

*Soluzione.* Ricordiamo che un elemento  $a \neq 0_A$  di un anello (associativo) unitario  $(A, +, \cdot)$  è detto *nilpotente* se  $a^n = 0_A$  per un'opportuna potenza  $n \in \mathbb{N} \setminus \{0\}$ .

Partiamo dal punto (A). Sia  $\bar{a} \in \mathbb{Z}_n$  un elemento nilpotente. Sia  $a$  un rappresentante tra 0 ed  $n$  di  $\bar{a}$ .  $\bar{a}$  è nilpotente se e soltanto se esiste una potenza  $k \in \mathbb{N}$  tale che  $\bar{a}^k = \bar{0}$  se e soltanto se esiste una potenza  $k \in \mathbb{N}$  tale che  $a^k \equiv 0 \pmod{n}$  se e soltanto se esiste una potenza  $k \in \mathbb{N}$  tale che  $n \mid a^k$ . Sia ora  $q_1^{j_1} \cdots q_\ell^{j_\ell}$  la scomposizione in fattori primi di  $a$ . Per unicità della fattorizzazione in primi abbiamo che  $\bar{a}$  è nilpotente se e solo se  $q_1^{k j_1} \cdots q_\ell^{k j_\ell} = b \cdot p_1^{h_1} \cdots p_m^{h_m}$ . Questo è possibile se e soltanto se nella scomposizione in fattori primi di  $a$  compare ogni  $p_i$  della scomposizione in fattori primi di  $n$  con potenza almeno 1. Questo conclude la dimostrazione del punto (A).

Nel punto (B) ci viene chiesto di determinare i nilpotenti di  $\mathbb{Z}_{150}$ . Lo faremo sfruttando quanto visto nel punto (A). Fattorizziamo:  $150 = 2 \cdot 3 \cdot 5^2$ . I nilpotenti di  $\mathbb{Z}_{150}$  sono quindi gli elementi che ammettono i seguenti rappresentanti:  $m \cdot 2 \cdot 3 \cdot 5$  dove  $0 < m < 5$ , sono quindi  $\overline{30}, \overline{60}, \overline{90}, \overline{120}$ .

Per risolvere il punto (C) osserviamo che se  $h_i > 1$  per almeno un indice  $i$  allora il numero  $p_1 \cdots p_n$  non è congruo a zero modulo  $n$ , ed esso è quindi un rappresentante per un elemento nilpotente in  $\mathbb{Z}_n$ . Viceversa supponiamo che  $h_i = 1$  per ogni indice  $i$ . Se  $\bar{a} \in \mathbb{Z}_n$  fosse un elemento nilpotente di  $\mathbb{Z}_n$  e se  $0 < a < n$  fosse un suo rappresentante dovremmo avere, per il punto (A),  $a = m \cdot p_1 \cdots p_n$  con  $m > 0$ . Ma questo è incompatibile con l'ipotesi  $a < n$ .  $\square$

**Digressione.** Un'equazione congruenziale lineare è un'equazione del tipo  $aX \equiv b \pmod{n}$ . Una soluzione è un intero  $x$  tale che  $ax = b + kn$ , per un qualche  $k \in \mathbb{Z}$ . Utilizzando quanto visto negli esercizi precedenti è possibile osservare che non tutte le equazioni congruenziali ammettono soluzione: utilizzando gli esercizi 4.3 e 4.4 è facile accorgersi che l'equazione congruenziale lineare  $2X \equiv 1 \pmod{24}$  non ammette soluzione (infatti una soluzione di tale equazione determinerebbe un inverso moltiplicativo -naturalmente  $\pmod{24}$ - dell'elemento 2 in  $\mathbb{Z}_{24}$ ). Come vedrete (o avete visto) durante il corso, condizione necessaria e sufficiente affinché tale equazione ammetta soluzione è che  $\text{MCD}(a, n) \mid b$ . Non è difficile osservare (Cap. 2, Sezione 5, Proposizione 3 di *Appunti di Algebra 1*, G. Campanella) che  $x$  è una soluzione dell'equazione congruenziale lineare  $aX \equiv b \pmod{n}$ , se e solo se  $x + j \frac{n}{\text{MCD}(a, n)}$  è soluzione per ogni  $j \in \mathbb{Z}$ .

**Esercizio 4.6.** Siano  $a, b, n \in \mathbb{N}$ . Sia  $d = \text{MCD}(a, n)$ . Assumiamo che  $d \mid b$ . Dimostrare che l'insieme delle soluzioni di  $aX \equiv b \pmod{n}$  coincide con l'insieme delle soluzioni di  $\frac{a}{d}X \equiv \frac{b}{d} \pmod{\frac{n}{d}}$ .

*Soluzione.* Sia  $x_0$  una soluzione della prima equazione. Questo significa che  $ax_0 = b + k_0n$ . Ora osserviamo che  $a = \alpha \cdot d$ ,  $b = m \cdot d$  e  $n = \nu \cdot d$ . Possiamo quindi dividere l'equazione precedente per  $d$  e ricavare la seguente:  $\frac{a}{d}x_0 = \alpha x_0 = m + k_0 \cdot \nu = \frac{b}{d} + k_0 \cdot \frac{n}{d}$ . Dunque  $x_0$  è anche soluzione dell'equazione  $\frac{a}{d}X \equiv \frac{b}{d} \pmod{\frac{n}{d}}$ . Viceversa sia  $x_0$  tale che  $\frac{a}{d}x_0 = \frac{b}{d} + k_0 \frac{n}{d}$  moltiplicando tutto per  $d$  osserviamo che  $x_0$  risolve anche l'equazione  $aX \equiv b \pmod{n}$ . Ne segue che i rispettivi insiemi delle soluzioni

coincidono.  $\square$

**Esercizio 4.7.** Determinare l'insieme delle soluzioni delle seguenti equazioni congruenziali lineari.

- $10X \equiv 2 \pmod{12}$ ; •  $121X \equiv 3 \pmod{13}$ ; •  $15 \equiv 5 \pmod{81}$
- $96X \equiv 14 \pmod{16}$ ; •  $117X \equiv 72 \pmod{13}$

*Soluzione.* Cominciamo dalla prima equazione. L'equazione è compatibile infatti  $\text{MCD}(12, 10) = 2 \mid 2$ .

$$10X \equiv 2 \pmod{12} \Leftrightarrow 5X \equiv 1 \pmod{6}$$

Osserviamo che  $25 \equiv 1 \pmod{6}$  e quindi

$$X \equiv 5 \pmod{6}$$

La generica soluzione è quindi  $x_k = 5 + k \cdot 6$ .

Consideriamo ora l'equazione  $121X \equiv 3 \pmod{13}$ . Riduciamo 121 modulo 13:  $121 - 13 \cdot 9 = 4$ , quindi l'equazione precedente è equivalente a  $4X \equiv 3 \pmod{13}$ . Osserviamo che l'equazione è compatibile, infatti  $\text{MCD}(4, 13) = 1 \mid 3$ . Notiamo che 10 è un inverso aritmetico modulo 13 di 4, quindi abbiamo:

$$4X \equiv 3 \pmod{13} \Leftrightarrow X \equiv 30 \pmod{13} \Leftrightarrow X \equiv 4 \pmod{13}$$

La soluzione generica della seconda equazione è pertanto  $x_k = 4 + k \cdot 13$ .

Verifichiamo la compatibilità della terza equazione:  $\text{MCD}(15, 81) = 3$  e  $\text{MCD}(15, 81) = 3 \nmid 5$ . Dunque l'equazione non è compatibile, ovvero non vi sono soluzioni all'equazione congruenziale in esame.

Verifichiamo la compatibilità della quarta equazione:  $\text{MCD}(96, 16) = 16$ .  $16 \nmid 15$ . Quindi l'equazione non è compatibile, ovvero non ammette soluzione.

Verifichiamo la compatibilità della quinta equazione:  $\text{MCD}(117, 13) = 13$ . Anche in questo caso l'equazione congruenziale non ammette soluzioni infatti  $13 \nmid 72$ .  $\square$

**Esercizio 4.8.** Dato che  $2 \cdot 3^{n-1} \equiv 2 \pmod{n}$  dimostrare che  $n$  è primo o alternativamente fornire un controesempio.

*Soluzione.* Innanzitutto ricordiamo l'enunciato del Piccolo Teorema di Fermat (seconda formulazione):

**Piccolo Teorema di Fermat** (Seconda formulazione). *Siano  $a, p \in \mathbb{Z}$  tali che  $\text{MCD}(a, p) = 1$ ; se  $p$  è primo allora*

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

È possibile esibire un controesempio: si consideri  $n = 4$ ; tale numero evidentemente non è primo e tuttavia verifica l'equazione precedente.  $\square$