

*This PDF originates from <https://sheafofthoughts.org>.*

# Aritmetica modulare di base

## Fermat's Christmas Theorem series

2025-12-14

ENG ITA

### Introduzione

Siamo alla fermata dell'autobus, in attesa che arrivi il nostro autobus. Sul tabellone è scritto che ci sono tre autobus in arrivo a breve:

- L'autobus  $A$  arriva tra 2 minuti;
- L'autobus  $B$  arriva tra 5 minuti;
- L'autobus  $C$  arriva tra 10 minuti.

Ovviamente non siamo fortunati, e dobbiamo aspettare l'autobus  $C$ . Mentre guardiamo gli autobus arrivare e ripartire, ci chiediamo:

**Domanda:** Gli autobus  $A$ ,  $B$  e  $C$  arriveranno mai simultaneamente?

Leggiamo sul tabellone che:

- L'autobus  $A$  passa ogni 3 minuti;
- L'autobus  $B$  passa ogni 24 minuti;
- L'autobus  $C$  passa ogni 23 minuti.

Abbiamo con noi il quaderno, quindi affrontiamo il problema nel modo brutale. Elenchiamo tutti gli istanti in cui passano gli autobus  $A$ ,  $B$  e  $C$  (i numeri sono i tempi di attesa in minuti):

- L'autobus  $A$  passerà tra  
2, 5, 8, 11, 14, 17, ...
- L'autobus  $B$  passerà tra  
5, 29, 53, 77, 101, ...

- L'autobus  $C$  passerà tra

$$10, 33, 56, 79, 102, \dots$$

Non sappiamo se, continuando questa lista, troveremo un numero comune a tutte e tre le liste (il che significherebbe un arrivo simultaneo). Questo metodo è tedioso, quindi vogliamo un modo più efficiente per risolvere il problema in generale.

Traduciamo il problema in un contesto matematico. Che cosa significa che l'autobus  $A$  passa ogni 3 minuti e arriva tra 2 minuti? Significa che i possibili istanti (in minuti) in cui l'autobus  $A$  passerà sono della forma  $3 \cdot n + 2$ , dove  $n$  è un intero non negativo (cioè  $n = 0, 1, 2, \dots$ ; convinciti di questo). Infatti, tutti i numeri che abbiamo elencato per  $A$  sono di questa forma.

Allo stesso modo, i tempi di attesa per l'autobus  $B$  sono della forma  $24 \cdot k + 5$  e i tempi di attesa per l'autobus  $C$  sono della forma  $23 \cdot \ell + 10$ . Quindi, trovare un tempo  $x$  (sempre in minuti) in cui  $A$ ,  $B$  e  $C$  arrivano simultaneamente significa trovare tre interi non negativi  $n, k, \ell$  tali che

$$x = 3 \cdot n + 2, \quad x = 24 \cdot k + 5, \quad x = 23 \cdot \ell + 10.$$

In altre parole, il tempo totale di attesa  $x$  deve essere di tutte e tre le forme nello stesso momento.

## Congruenze di interi

Rendiamo la notazione un po' migliore e più utile.

**Definizione:** Siano  $n$ ,  $m$  e  $q$  interi, con  $q > 0$ . Scriviamo

$$n \equiv_q m$$

se il resto della divisione di  $n$  per  $q$  e il resto della divisione di  $m$  per  $q$  sono uguali.

La scrittura  $n \equiv_q m$  si legge: “ $n$  è congruente a  $m$  modulo  $q$ ”.

**Example 0.1.** Consideriamo  $n = 14$  e  $q = 3$ . Allora  $14 \equiv_3 2$ . Infatti

$$14 = 3 \cdot 4 + 2$$

ha resto 2, e anche 2 ha resto 2 quando viene diviso per 3.

*Remark 0.1.* Per ogni intero  $n$  e ogni  $q$  con  $q > 0$ , se  $r$  è il resto della divisione di  $n$  per  $q$ , allora  $n \equiv_q r$ .

Il seguente fatto è fondamentale.

**Proposition 0.1.** Siano  $n$ ,  $m$  e  $q$  interi con  $q > 0$ . Allora  $n \equiv_q m$  se e solo se  $q$  divide  $n - m$ .

*Proof.* Supponiamo che  $n \equiv_q m$ . Allora il resto della divisione di  $n$  per  $q$  è lo stesso del resto della divisione di  $m$  per  $q$ . Chiamiamo questo resto comune  $r$ .

Per la divisione euclidea, esistono interi  $k$  e  $\ell$  tali che

$$n = q \cdot k + r, \quad m = q \cdot \ell + r,$$

con  $0 \leq r < q$ .

Sottraiamo la seconda equazione dalla prima:

$$n - m = (q \cdot k + r) - (q \cdot \ell + r).$$

Ora semplifichiamo:

$$n - m = q \cdot k + r - q \cdot \ell - r,$$

e cancellando  $r$  a destra otteniamo

$$n - m = q \cdot k - q \cdot \ell.$$

Raccogliamo  $q$ :

$$n - m = q \cdot (k - \ell).$$

Questo significa esattamente che  $q$  divide  $n - m$ .

Viceversa, supponiamo che  $q$  divida  $n - m$ . Questo significa che esiste un intero  $t$  tale che

$$n - m = q \cdot t.$$

Riordiniamo:

$$n = m + q \cdot t.$$

Ora dividiamo  $m$  per  $q$ : per la divisione euclidea esistono interi  $\ell$  e  $r$  con  $0 \leq r < q$  tali che

$$m = q \cdot \ell + r.$$

Sostituiamo nella formula precedente:

$$n = (q \cdot \ell + r) + q \cdot t = q \cdot (\ell + t) + r.$$

Quindi, dividendo  $m$  per  $q$  otteniamo resto  $r$ , e dividendo  $n$  per  $q$  otteniamo ancora resto  $r$ . Dunque  $n \equiv_q m$ . □

Facciamo ora qualche esempio. Osserviamo che  $14 \equiv_3 2$  e che  $19 \equiv_3 1$ . Ci chiediamo che cosa sia

$$14 + 19 \equiv_3 ?$$

Forse l'hai già intuito: abbiamo

$$14 + 19 \equiv_3 2 + 1.$$

Quindi stiamo dicendo che

$$33 \equiv_3 3.$$

Ma sappiamo anche che  $3 \equiv_3 0$  (infatti 3 ha resto 0 quando viene diviso per 3), quindi

$$33 \equiv_3 0.$$

Questo significa che 33 è divisibile per 3.

Chiediamoci lo stesso per il prodotto:

$$14 \cdot 19 \equiv_3 ?$$

Siamo di nuovo fortunati: otteniamo

$$14 \cdot 19 \equiv_3 2 \cdot 1,$$

il che significa che

$$266 \equiv_3 2,$$

cioè 266 ha resto 2 quando viene diviso per 3.

Enunciamo precisamente questo fatto nella proposizione seguente.

**Proposition 0.2.** *Siano  $n, m, n', m'$  e  $q$  interi con  $q > 0$ . Se  $n \equiv_q m$  e  $n' \equiv_q m'$ , allora*

$$n + n' \equiv_q m + m'$$

e

$$n \cdot n' \equiv_q m \cdot m'.$$

## Parte facile del Teorema di Natale

**Proposition 0.3.** *Sia  $n$  un intero dispari che può essere scritto come somma di due quadrati. Allora  $n \equiv_4 1$ , cioè  $n$  ha resto 1 quando viene diviso per 4.*

*Remark 0.2.* In particolare, il teorema ci dice anche che se  $p$  è un primo dispari che può essere scritto come somma di due quadrati, allora ha resto 1 quando viene diviso per 4, che è parte di ciò che afferma il Teorema di Natale.

*Proof.* Se  $n$  può essere scritto come somma di due quadrati, significa che esistono interi  $a, b$  tali che

$$n = a^2 + b^2.$$

Osserviamo che  $n$  è dispari, quindi ha resto 1 quando viene diviso per 2, cioè

$$n \equiv_2 1.$$

Quindi

$$a^2 + b^2 \equiv_2 1.$$

Se sia  $a$  sia  $b$  fossero dispari, allora  $a \equiv_2 1$  e  $b \equiv_2 1$ , quindi

$$a^2 \equiv_2 1, \quad b^2 \equiv_2 1,$$

il che implicherebbe

$$a^2 + b^2 \equiv_2 1 + 1 \equiv_2 2 \equiv_2 0,$$

e quindi  $n \equiv_2 0$ , impossibile perché  $n$  è dispari.

Allo stesso modo, se  $a$  e  $b$  fossero entrambi pari, allora  $a^2 + b^2 \equiv_2 0$ , che è ancora impossibile.

Dunque uno è dispari e l'altro è pari. Chiamiamo  $a$  quello dispari e  $b$  quello pari. Abbiamo

$$a \equiv_2 1, \quad b \equiv_2 0.$$

Poiché  $b$  è pari, quando dividiamo  $b$  per 4 otteniamo resto 0 oppure resto 2 (altrimenti sarebbe dispari). Quindi

$$b \equiv_4 0 \quad \text{oppure} \quad b \equiv_4 2.$$

In entrambi i casi otteniamo

$$b^2 \equiv_4 0.$$

Allo stesso modo, poiché  $a$  è dispari, abbiamo

$$a \equiv_4 1 \quad \text{oppure} \quad a \equiv_4 3.$$

In entrambi i casi (controlla!) otteniamo

$$a^2 \equiv_4 1.$$

Quindi

$$a^2 + b^2 \equiv_4 1 + 0 \equiv_4 1,$$

il che significa che

$$n \equiv_4 1.$$

□

## Numeri invertibili modulo $q$

Ricordiamo che cos'è il massimo comun divisore.

**Definizione:** Siano  $n$  e  $m$  due interi diversi da 0. Il massimo comun divisore  $\text{MCD}(n, m)$  è il prodotto dei primi comuni che compaiono nelle fattorizzazioni di  $n$  e  $m$ , presi con la potenza più piccola.

**Example 0.2.** Calcoliamo il massimo comun divisore tra 72 e 540. Abbiamo

$$72 = 2^3 \cdot 3^2, \quad 540 = 2^2 \cdot 3^3 \cdot 5,$$

quindi

$$\text{MCD}(72, 540) = 2^2 \cdot 3^2.$$

Supponiamo di avere due interi  $n$  e  $q$  con  $q > 0$ . Ci chiediamo quando esiste un altro intero  $m$  tale che

$$n \cdot m \equiv_q 1.$$

Proviamo qualche esempio:

- Se  $n = 4$  e  $q = 7$ , allora

$$4 \cdot 2 \equiv_7 1.$$

- Se  $n = 4$  e  $q = 6$ , allora non possiamo trovare un tale  $m$ .
- Se  $n = 3$  e  $q = 9$ , non possiamo trovare un tale  $m$ .
- Se  $n = 3$  e  $q = 5$ , allora

$$3 \cdot 2 \equiv_5 1.$$

Prova qualche esempio anche tu.

**Definizione:** Siano  $n$  e  $q$  interi con  $q > 0$ . Diciamo che  $n$  è *invertibile modulo  $q$*  se esiste un intero  $m$  tale che

$$n \cdot m \equiv_q 1.$$

La risposta alla domanda è data dalla proposizione seguente.

**Proposition 0.4.** *Siano  $n$  e  $q$  interi con  $q > 0$ . Allora  $n$  è invertibile modulo  $q$  se e solo se  $\text{MCD}(n, q) = 1$ .*

## Teorema Cinese del Resto

Ora enunciamo il teorema che ci permetterà di risolvere in modo efficiente il problema degli autobus.

**Theorem 0.1.** *Siano  $s, t > 1$  interi con  $\text{MCD}(s, t) = 1$ . Allora per ogni intero  $a$  e ogni intero  $b$  esiste un intero  $x$  tale che*

$$x \equiv_s a \quad \text{e} \quad x \equiv_t b.$$

*Proof.* Vogliamo

$$x \equiv_s a \quad \text{e} \quad x \equiv_t b.$$

La prima congruenza  $x \equiv_s a$  significa che  $x - a$  è divisibile per  $s$ , quindi  $x$  è della forma

$$x = a + s \cdot n$$

per qualche intero  $n$ .

Ora imponiamo la seconda congruenza. Vogliamo  $x \equiv_t b$ , cioè

$$a + s \cdot n \equiv_t b.$$

Sottraiamo  $a$  da entrambi i membri:

$$s \cdot n \equiv_t b - a.$$

Quindi l'intero problema diventa: possiamo risolvere

$$s \cdot n \equiv_t (b - a)?$$

Poiché  $\text{MCD}(s, t) = 1$ , per Proposition 0.4 il numero  $s$  è invertibile modulo  $t$ . Questo significa che esiste un intero  $u$  tale che

$$s \cdot u \equiv_t 1.$$

Ora moltiplichiamo la congruenza  $s \cdot n \equiv_t (b - a)$  per  $u$ :

$$(s \cdot u) \cdot n \equiv_t u \cdot (b - a).$$

Ma  $s \cdot u \equiv_t 1$ , quindi il lato sinistro diventa

$$1 \cdot n \equiv_t u(b - a),$$

cioè

$$n \equiv_t u(b - a).$$

Quindi, se scegliamo  $n := u(b - a)$ , otteniamo una soluzione, che è

$$x = a + s \cdot u(b - a).$$

□



*Remark 0.3.* Osserviamo che Theorem 0.1 ci dice che una soluzione *esiste*. Tuttavia, in generale la soluzione non è unica. Infatti, supponiamo di avere una soluzione  $x$ . Allora anche  $x + st$  è una soluzione, perché

$$x + st \equiv_s x, \quad x + st \equiv_t x.$$

In particolare, dopo aver trovato una soluzione  $x$ , tutte le altre soluzioni sono della forma  $x + st \cdot k$  con  $k$  un intero.

## Soluzione del problema degli autobus

Sia  $x$  il tempo di attesa (in minuti) fino a un arrivo simultaneo.

Dai dati, otteniamo:

- Autobus  $A$ : passa ogni 3 minuti e arriva tra 2 minuti, quindi  $x = 3 \cdot n + 2$ , cioè

$$x \equiv_3 2.$$

- Autobus  $B$ : passa ogni 24 minuti e arriva tra 5 minuti, quindi

$$x \equiv_{24} 5.$$

- Autobus  $C$ : passa ogni 23 minuti e arriva tra 10 minuti, quindi

$$x \equiv_{23} 10.$$

Quindi vogliamo capire se esiste un  $x$  tale che

$$x \equiv_3 2, \quad x \equiv_{24} 5, \quad x \equiv_{23} 10.$$

Poiché 24 è un multiplo di 3, da  $x \equiv_{24} 5$  otteniamo che 24 divide  $x - 5$ . In particolare, 3 divide  $x - 5$ , quindi  $x \equiv_3 5$ .

Ma  $5 \equiv_3 2$ , quindi  $x \equiv_3 2$  automaticamente.

Dunque la condizione per l'autobus  $A$  è già implicata dalla condizione per l'autobus  $B$ , e il problema si riduce a risolvere soltanto

$$x \equiv_{24} 5, \quad x \equiv_{23} 10.$$

Una volta trovato un tale  $x$ , anche l'autobus  $A$  arriverà al tempo  $x$ . Theorem 0.1 ci dice che una tale soluzione esiste, poiché  $\text{MCD}(24, 23) = 1$ . Quindi gli autobus arriveranno simultaneamente prima o poi (puoi verificare che  $x = 125$  funziona).

---

Questo articolo fa parte della serie *Fermat's Christmas Theorem*.

**Precedente:** [How many primes are there?](#)