

# Fisica per applicazioni di realtà virtuale

Anno Accademico 2022-23

Prof. Matteo Brogi  
[matteo.brogi@unito.it](mailto:matteo.brogi@unito.it)

Dipartimento di Fisica, stanza B3, nuovo edificio

**Lezione 1**  
Introduzione al corso e concetti fondamentali

# Introduzione al corso: testi ed esame

- **Serway** - Principi di Fisica - ed. EdiSES
- **Walker** - Fondamenti di Fisica - ed. Pearson
- **Halliday, Resnik, Walker** - Fisica - ed. Ambrosiana
- **Ragazzino** - Elementi di Fisica - ed. EdiSES

*Per approfondire o per comprendere meglio certi concetti*

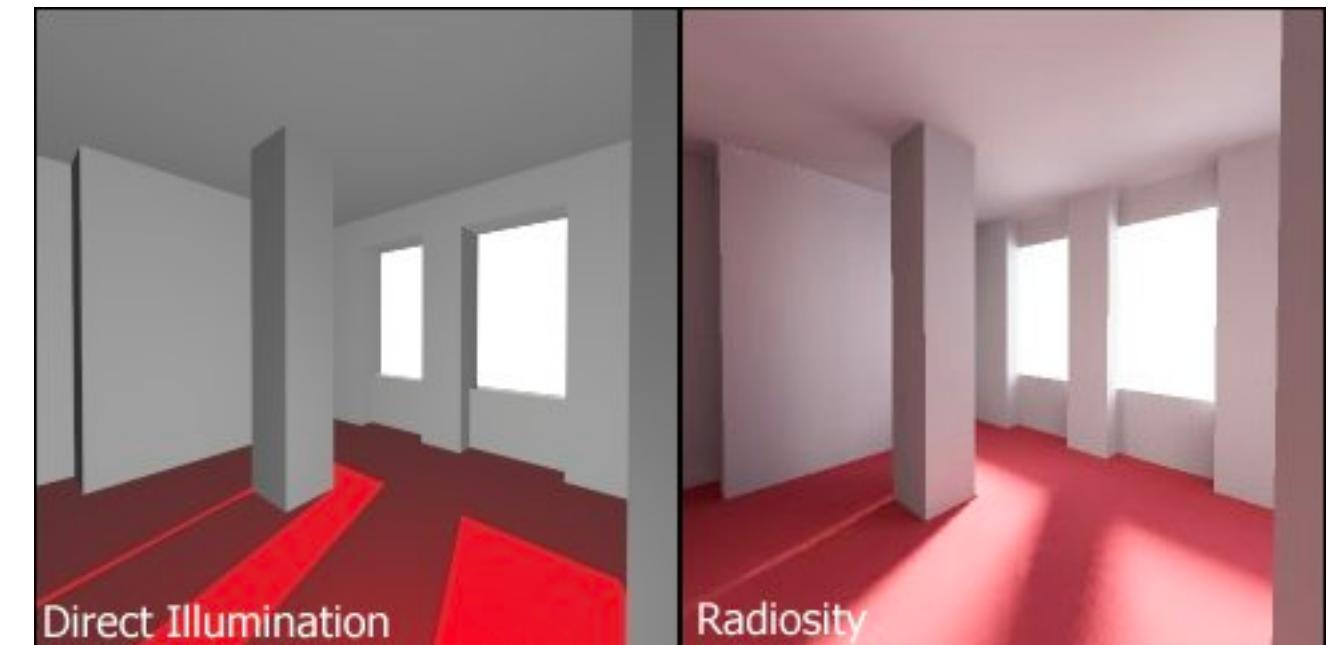
*Tutto il necessario per passare il corso è presentato a lezione e messo a disposizione su **Moodle***

**L'esame è *orale* e verte su *teoria ed esercizi* (visti in classe o simili)**

*Esame: data fissa per appello + d'accordo con il docente*

# Filosofia del corso

- ▶ 1985-90: i migliori giochi hanno i migliori controlli
- ▶ 2000s: i giochi con fisica hanno un più alto livello di immersione
- ▶ 2010s: l'accuratezza nel modello di illuminazione influenza il realismo
- ▶ 2020s: In VR l'immersione legata al realismo:
  - Moti imperfetti (lanciare / lasciare oggetti)
  - Incorretta propagazione del suono (eco, variazione dell'intonazione)
  - Incorretto rendering (almeno direct illumination)



# Sommario del corso

Priorità alla **continuità** con l'AA precedente

- ▶ Metodo scientifico, cenni storici, grandezze e unità, vettori e operazioni
- ▶ Cinematica (leggi che descrivono il moto dei corpi)
- ▶ Dinamica (leggi che spiegano il moto dei corpi)
- ▶ Energia e lavoro
- ▶ Dinamica dei sistemi (corpi estesi, non più punti)
- ▶ Fenomeni ondulatori (onde meccaniche/acustiche, ottica)
- ▶ Meccanica dei fluidi

*Leggi fisiche descrivono le interazioni con l'ambiente in VR  
e la sua rappresentazione visiva*

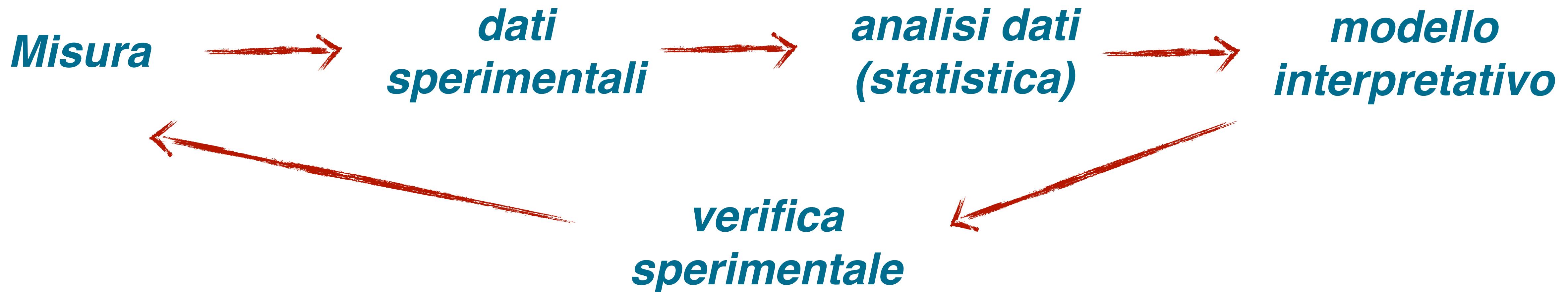
*Leggi fisiche sono il benchmark per algoritmi di machine learning  
(per es. ray tracing in NVIDIA RTX, fluidi)*

# Introduzione al corso

## Fisica

**cos'è:** lo studio dei fenomeni naturali  
**come:** misura delle grandezze fisiche

*La base della fisica è l'evidenza sperimentale*



Un modello è **inadeguato** se non verificato dall'evidenza sperimentale  
Limiti nelle **misure** influenzano l'evidenza sperimentale

# Cenni storici: l'antichità

*Prime osservazioni sperimentali e fondamenti di matematica  
(Assiri, Babilonesi, Caldei, Egizi, Sumeri, Fenici...)*

*Mondo ellenistico: sintesi e scienza classica*

- Termini “moderni”: elementi, energia, forza, etc.
- Teorie (atomismo, eliocentrismo, sfericità della Terra) e discipline (astronomia e cosmologia) “moderne”
- Importanti risultati basati sulla misura (es: raggio e sfericità della Terra)
- Teorie basate su ragionamenti “filosofici” o “fideistici” (nel senso moderno)
- Mancanza della verifica sperimentale (ragioni culturali e tecnologiche)

# Cenni storici: la misura del raggio terrestre

Eratostene, 240-230 a.C.

**A:** Alessandria d'Egitto - angolo di  $7.2^\circ$

**S:** Syene - perpendicolare

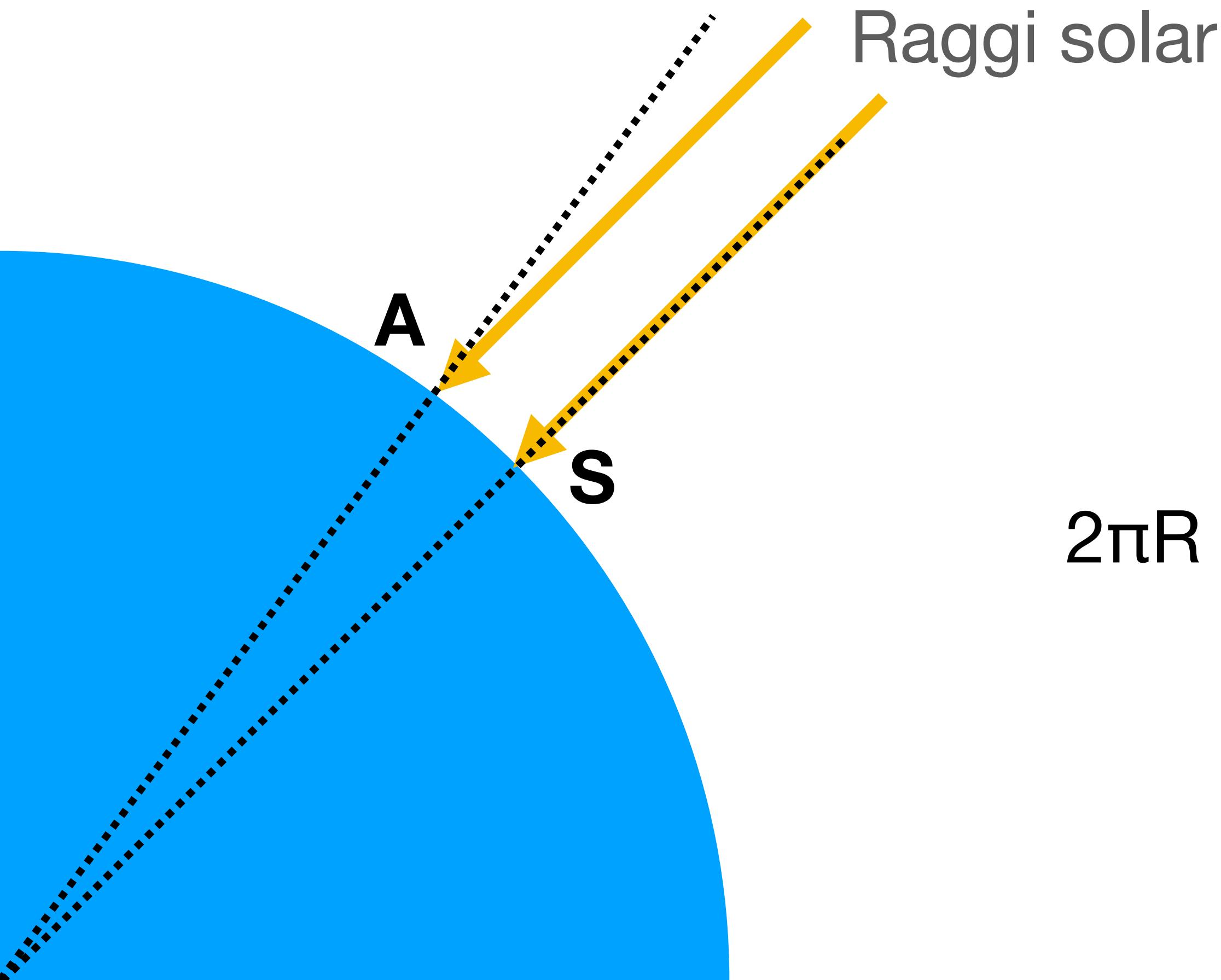
$d(A-B)$ : 5000 stadi

circonferenza :  $d = 360^\circ : 7.2^\circ$

$2\pi R : d = 360^\circ : 7.2^\circ$

$$2\pi R = d * (360/7.2) \sim 250'000 \text{ stadi} (40'000 \text{ km})$$

(valore moderno = 40'100 km!!)



# La prima rivoluzione scientifica (XVI-XVII sec.)

Nuove **idee**, **misure** più accurate, nuovi **strumenti** (telescopio)  
(Copernico, Galileo, Newton, Cartesio, Keplero, Eulero, Boyle, Pascal, Laplace...)

- ▶ Supera concetti aristotelici (elementi) e geocentrismo
- ▶ Modifica concetti di *energia / moto / forza.*
- ▶ Introduce leggi della *dinamica*
- ▶ Separa *fisica* e *filosofia*, definisce il **metodo scientifico**

*La fisica classica predice il comportamento di sistemi anche complessi*  
⇒ *illuminismo e rivoluzione industriale*

*Fisica “classica”: descrive bene la realtà alle **scale abituali**;*  
*coerente con l’**intuizione** dei fenomeni naturali*  
⇒ *soggetto di questo corso (riprodurre la realtà virtualmente)*

# La seconda rivoluzione scientifica (XIX-XX sec.)

Necessità di spiegare fenomeni macro-/microscopici  
(Planck, Einstein, Bohr, Hubble...)

- ▶ Meccanica quantistica: a livello atomico/molecolare la natura è discreta
- ▶ Fisica atomica / sub-atomica, radioattività
- ▶ Relatività generale, espansione dell'universo, big bang
- ▶ Forze fondamentali e la loro unificazione

*La fisica moderna **contrasta** con l'intuizione ma consente lo sviluppo di tecnologie moderne (celle fotovoltaiche, CCDs, esami medici)*

*Fisica moderna eredita il metodo scientifico, ma:*

*La misura può essere **distruttiva***

*Certi sistemi vanno descritti **stocasticamente***

# Grandezze fisiche

## **Dimensionali**

*Necessitano unità di misura  
(es. lunghezza, tempo, massa...)*

## **Adimensionali**

*Numeri puri  
(es. radiante = arco/raggio)*

## **Fondamentali**

*come massa, spostamento, tempo*

## **Derivate**

*Combinazione di grandezze fondamentali  
(es. velocità, forza, energia)*

## **Scalari**

*Descritte interamente da un valore*

## **Vettoriali**

*Descritte da un valore, una direzione,  
e un verso*

# Unità di misura: il sistema internazionale

Dal 1978 per evitare confusione e potenziali errori

Uso comune dipende da fattori culturali (es. la sonda Mars Climate Orbiter, 1999)

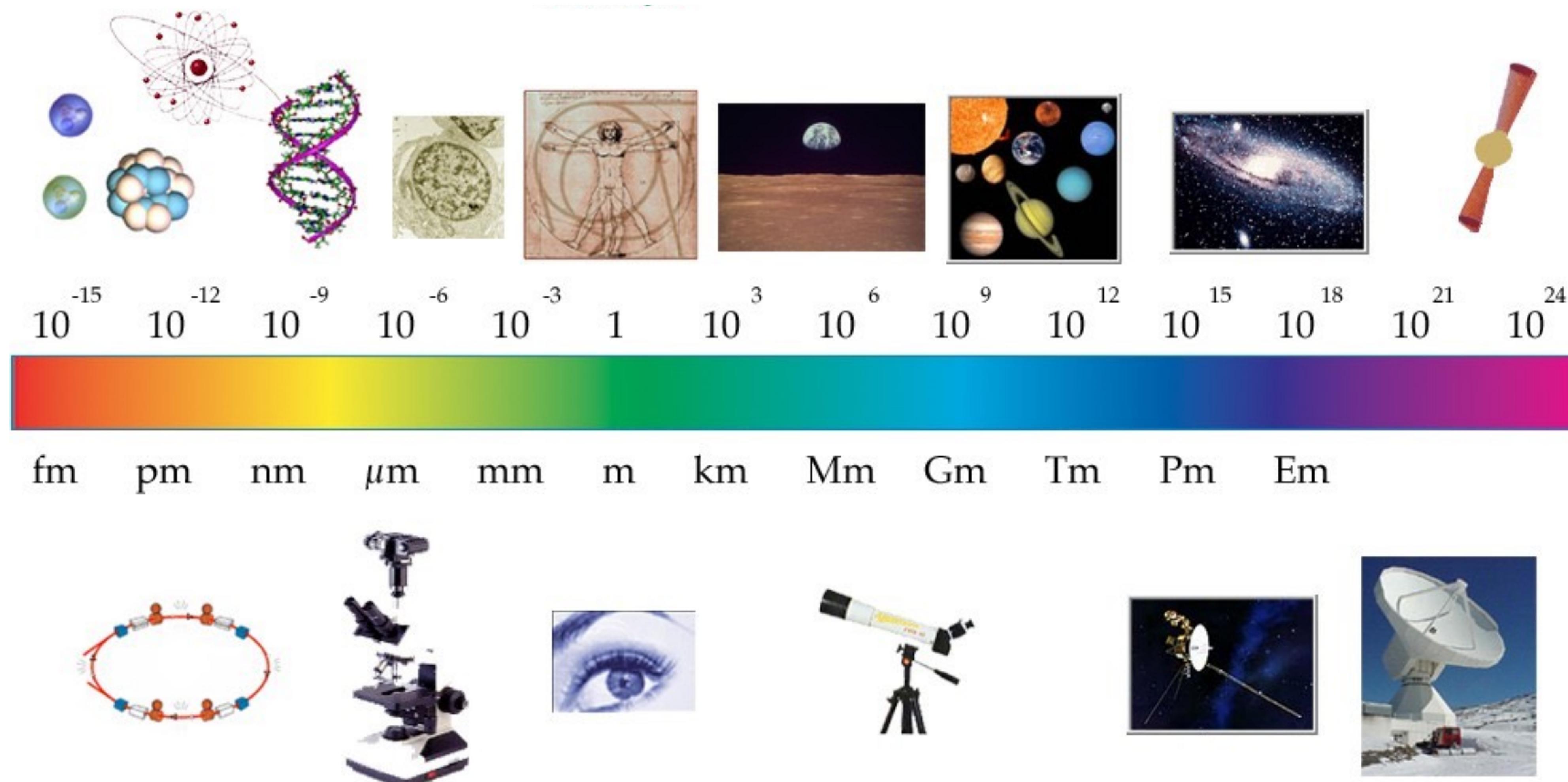
Grandezza fisica	Simbolo della grandezza	Nome dell'unità di misura	Simbolo dell'unità di misura
lunghezza	l	metro	m
massa	m	kilogrammo	kg
tempo	t	secondo	s
corrente elettrica	I	ampere	A
temperatura	T	kelvin	K
quantità di sostanza	n	mole	mol
intensità luminosa	i <sub>v</sub>	candela	cd

# Prefissi e simboli per le potenze del 10

Grandezze fisiche variano su ordini di grandezza => potenze del 10  
kilo-peta dovrebbero risultare familiare, ma attenzione:  $10^3 \neq 2^{10}$

Potenza	$10^{15}$	$10^{12}$	$10^9$	$10^6$	$10^3$	$10^2$	$10^1$	$10^{-1}$	$10^{-2}$	$10^{-3}$	$10^{-6}$	$10^{-9}$	$10^{-12}$	$10^{-15}$
Prefisso	peta	tera	giga	mega	kilo	etto	deca	deci	centi	milli	micro	nano	pico	femto
Abb.r.	P	T	G	M	k	h	da	d	c	m	$\mu$	n	p	f

# Le scale della fisica: dal microscopico all'Universo



Lunghezze non-SI tipiche di alcune discipline della fisica:  
Å (Angstrom,  $10^{-10}$  m), pc (parsec,  $3.09 \times 10^{16}$  m)

# Analisi dimensionale

Specificare la dimensione = specificare il tipo di grandezza

La dimensione si indica tra parentesi quadre [...]

Molto utile per verificare che formule e risultati abbiano senso

Distanza [L]

Area [ $L^2$ ]

Volume [ $L^3$ ]

Tempo [T]

Velocità [ $L T^{-1}$ ]

Massa [M]

## Esempio 1

verificare che la formula

$$x = x_0 + vt$$

è dimensionalmente consistente

## Soluzione

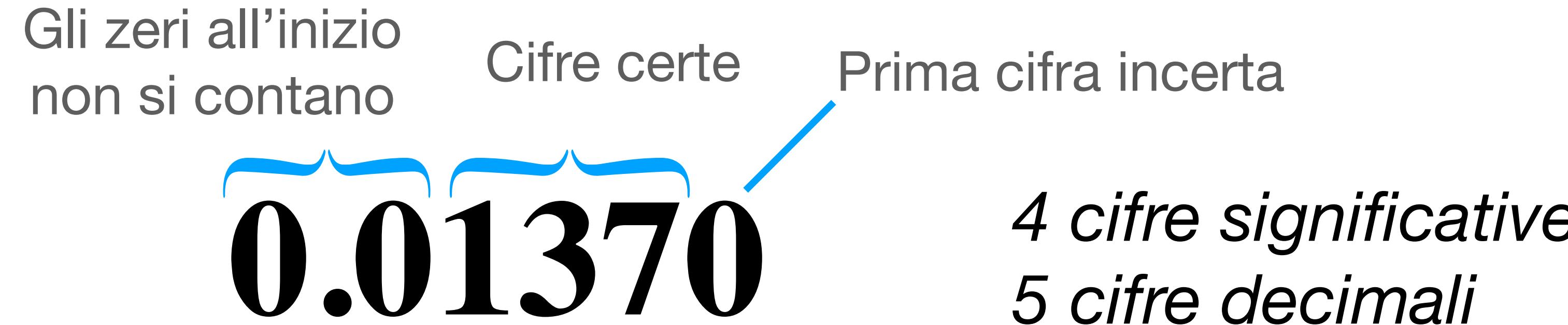
$$[L] = [L] + [L T^{-1}] [T]$$

$$[L] = [L] + [L]$$

# Cifre significative vs. cifre decimali

Ogni misura ha un **errore** associato ⇒ il numero di cifre usate ha un significato!

- ▶ Cifre **significative** = numero di cifre che compongono il numero
- ▶ Cifre **decimali** = numero di cifre dopo la virgola
- ▶ Eccezione: gli **zeri all'inizio** del numero non si contano come significativi
- ▶ Tutte le cifre ad esclusione dell'ultima sono *certe*
- ▶ L'ultima cifra è *incerta*



*Attenzione ai casi ambigui (es. 4700: qual è la prima cifra incerta?)*

# Cifre significative e operazioni algebriche

## Moltiplicazione / divisione

*Risultato espresso con numero di cifre **significative** della quantità più incerta*

$d = 21.26 \text{ cm}$  (4 cifre significative, 2 decimali)

$t = 8.5 \text{ s}$  (2 cifre significative, 1 decimale)

$v = d/t = 2.50117647\ldots = 2.5 \text{ cm s}^{-1}$  (**2 cifre significative**, 1 decimale)

**Arrotondo, non tronco!** (es.  $2.55146\ldots = 2.6$ )

## Somma / sottrazione

*Risultato espresso con il minor numero di cifre **decimali** presente in ogni addendo*

$v_0 = 1.384 \text{ cm s}^{-1}$  (4 cifre significative, 3 decimali)

$v + v_0 = 1.384 + 2.5 = 3.9 \text{ cm s}^{-1}$  (2 cifre significative, **1 decimale**)

*Queste regole vengono dalla **teoria degli errori***

# Notazione scientifica e incertezza nella misura

- ▶ Esprime qualsiasi numero con una cifra intera ( $\neq 0$ ) più decimali, moltiplicato per una potenza del 10

Massa della Terra:  $M_{\oplus} = 5,970,000,000,000,000,000,000,000 \text{ kg}$

Sposto la virgola di 24 posizioni a sx = fattore  $10^{24}$

$M_{\oplus} = 5.97 \times 10^{24} \text{ kg}$  (5.97E24 in programmazione)

- ▶ Stesse regole per cifre significative / decimali con operazioni algebriche

$$M_{\oplus} = 5.97 \times 10^{24} \text{ kg}$$

$$\text{Massa del protone } M_p = 1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

$$M_p/M_{\oplus} = 1.67/5.97 \times 10^{(-27-24)} \text{ kg} = 0.27973\dots \times 10^{-51} = \mathbf{2.80 \times 10^{-51}}$$

- ▶ Risolve i casi ambigui tipo 4700 (2, 3, o 4 cifre significative?)

# Errore di arrotondamento

*In calcoli con più passaggi, esprimere ogni passaggio intermedio con il giusto numero di cifre significative può portare a un errore di arrotondamento*

- $2.21\text{€} + 8\% \text{ tasse} = 2.3868\text{€} = 2.39\text{€}$
- $1.35\text{€} + 8\% \text{ tasse} = 1.458\text{€} = 1.46\text{€}$
- Importo totale inclusivo tasse:  $(1.46+2.39)\text{€} = \textcolor{red}{3.85}\text{€}$
- Importo totale iniziale =  $(2.21+1.35)\text{€} = 3.46\text{€} + 8\% \text{ tasse} = 3.8448\text{€} = \textcolor{green}{3.84}\text{€}$
- Usando tutte le cifre:  $(2.3868 + 1.458) \text{ €} = 3.8448\text{€} = \textcolor{green}{3.84}\text{€}$

*Consigliare usare più cifre significative (almeno una in più) e arrotondare alla fine*

# Conversioni fra unità di misura



$$1 \text{ mi} = 1.609 \text{ km}$$

$$1 = \frac{1.609 \text{ km}}{1 \text{ mi}}$$

$$26 \text{ mi} = 26 \text{ mi} \cdot \frac{1.609 \text{ km}}{1 \text{ mi}} =$$

$$= 41.834 \text{ km} = 42 \text{ km}$$

Vedi esempi alla lavagna con unità derivate (es. velocità)

# Calcoli con ordini di grandezza

Molto comuni in fisica, specialmente in astrofisica

- ▶ Approssimazione alla potenza del 10 più vicina (es.:  $2 \Rightarrow 1$ ,  $8 \Rightarrow 10$ )
- ▶ Alcune quantità si prestano bene, es.  $\pi^2 \sim 10$ ;  $1 \text{ anno} = \pi \times 10^7 \text{ s}$

*Utile per comprendere i fenomeni a un livello di base*

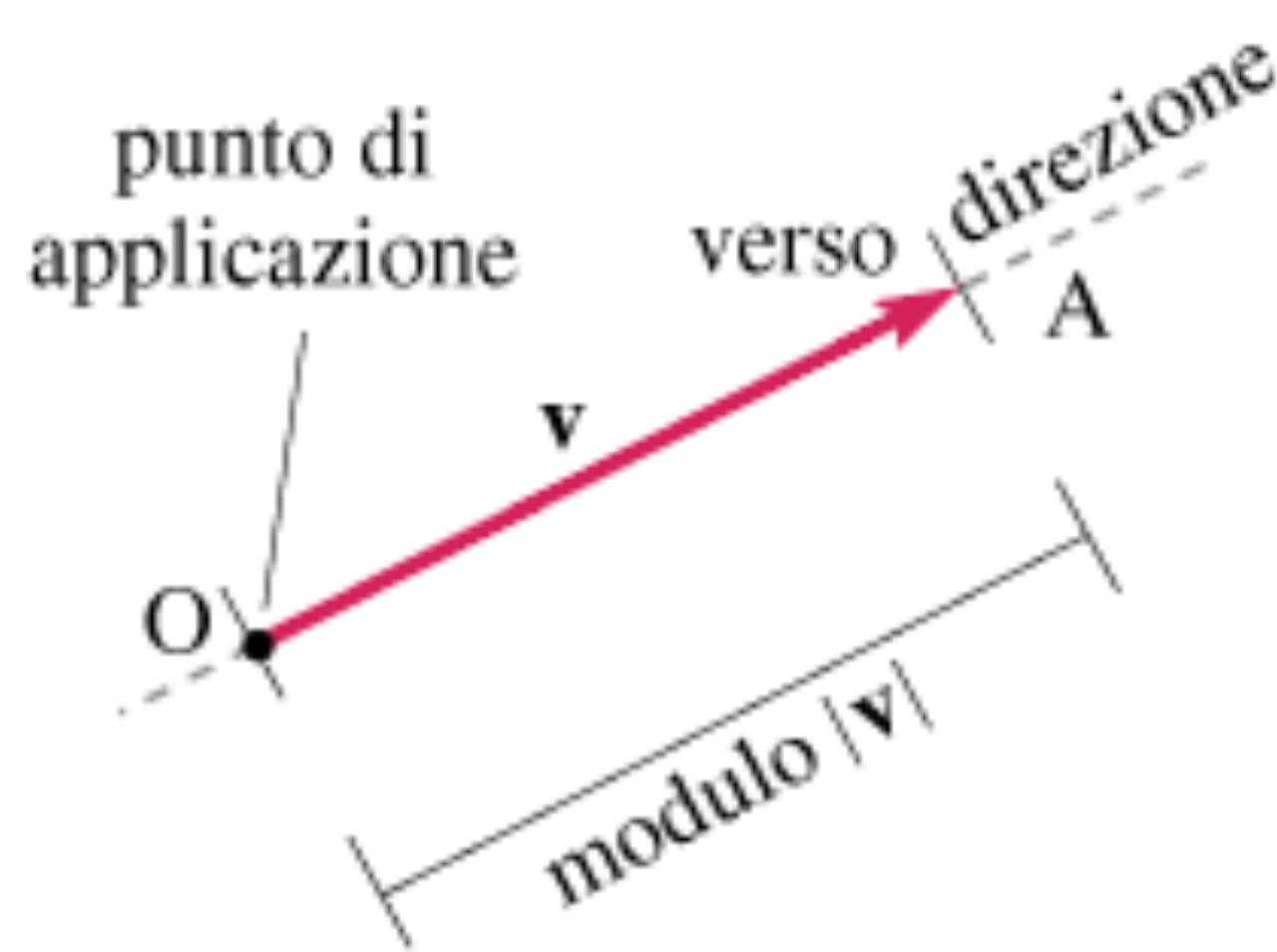
*Sempre accettabile a meno che l'esercizio non richieda una precisione esplicita*

**Esercizio 1.01:** In un temporale cade 1 cm di pioggia su un'area di  $100 \text{ km}^2$ .  
Quante gocce sono cadute?

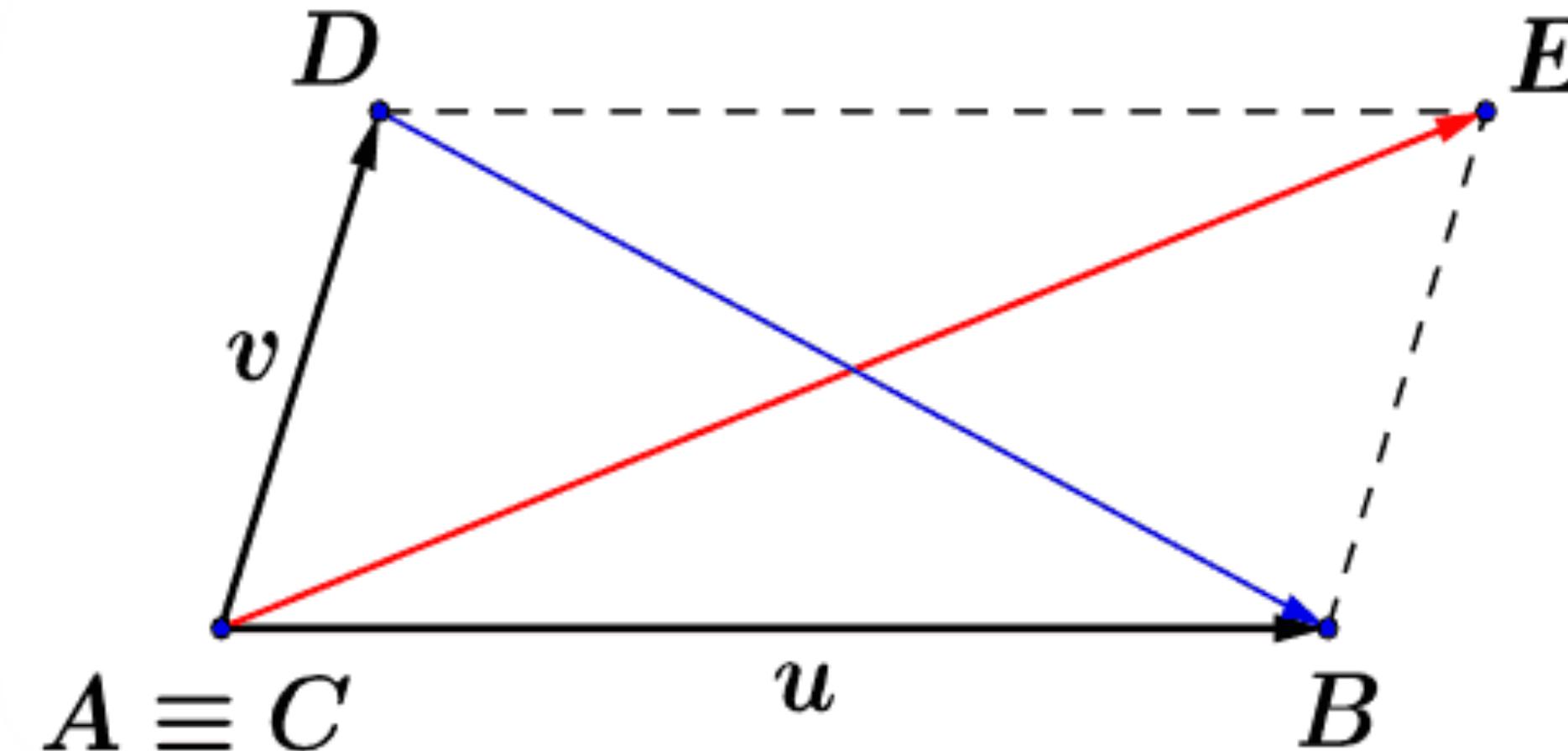
*L'esercizio 1.01 richiede una “educated guess” (una stima),  
comune nella comprensione base dei fenomeni fisici*

# Algebra vettoriale: definizione e somma di vettori

Quantità vettoriale: ha un modulo, una direzione e un verso  
(ENG: modulus and direction)



*Il punto di applicazione ( $O$ ) non è una proprietà del vettore!*



$$\overrightarrow{u} + \overrightarrow{v} = \overrightarrow{v} + \overrightarrow{u}$$

Somma

$$\overrightarrow{u} - \overrightarrow{v} = -(\overrightarrow{v} - \overrightarrow{u})$$

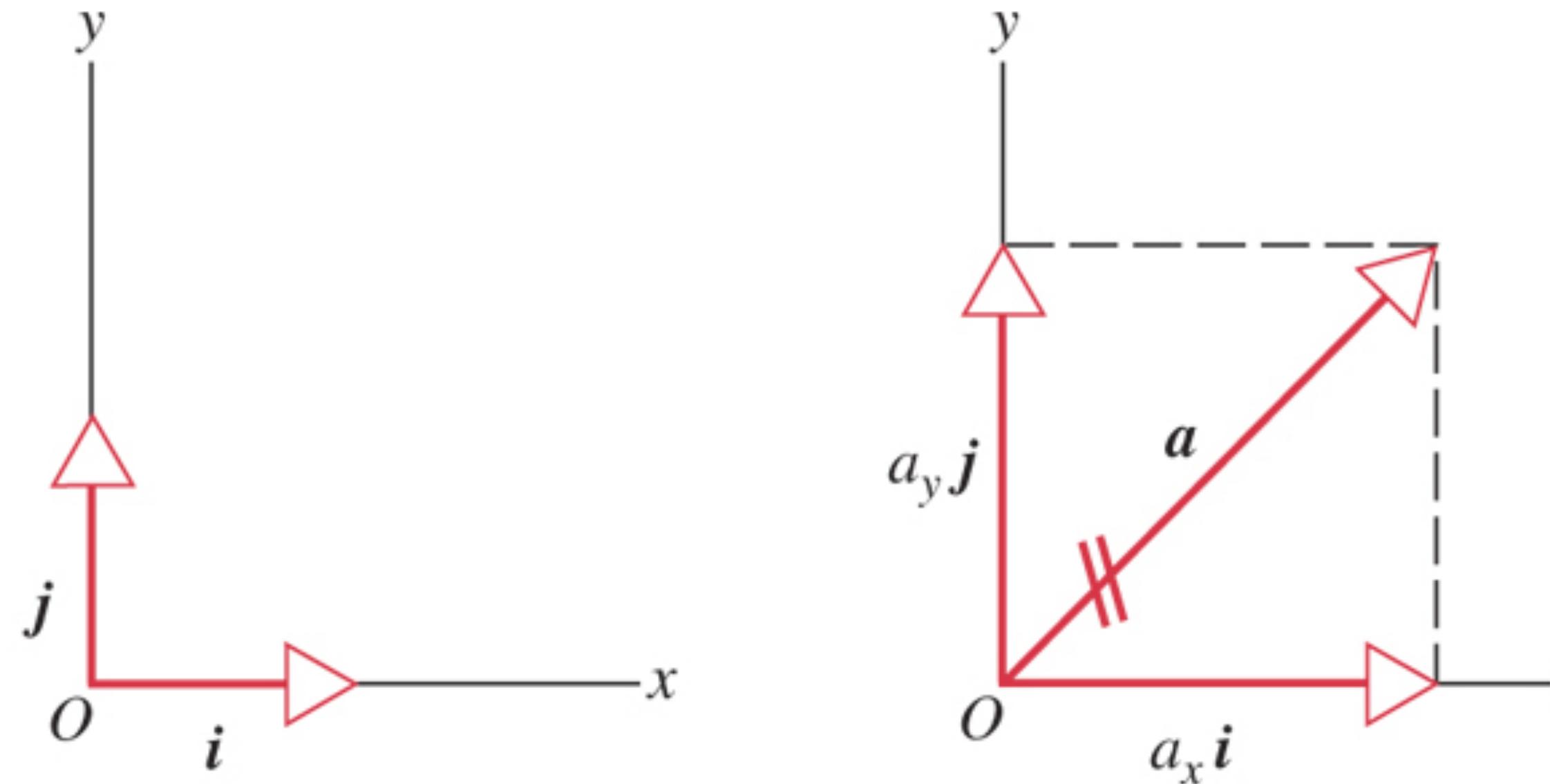
Differenza

*Operazioni “interne”: il risultato è un altro vettore*

# Algebra vettoriale: versori

Versori: vettori “speciali” di modulo unitario  
(direzione e verso)

Versori **cartesiani**: perpendicolari, individuano gli assi cartesiani

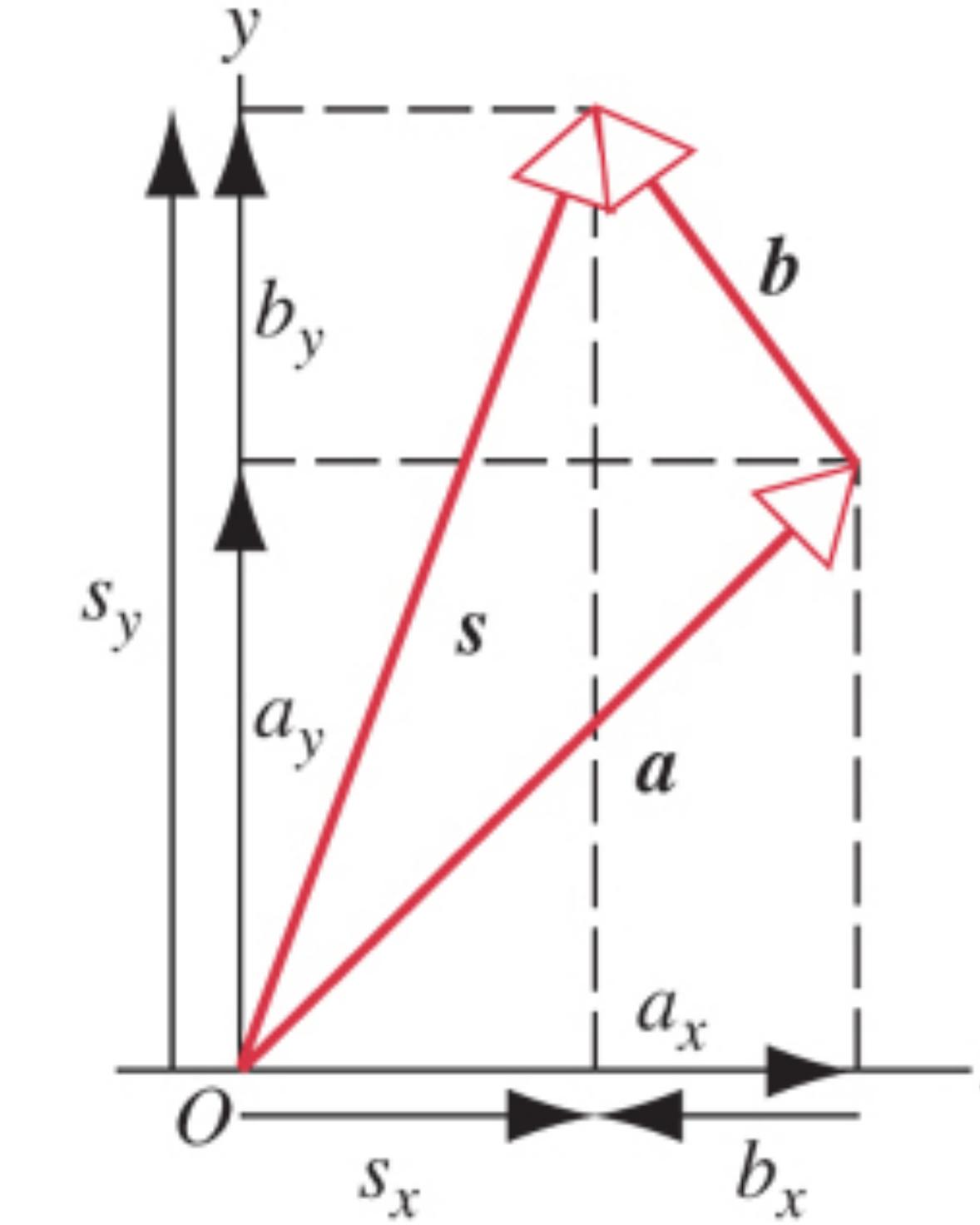
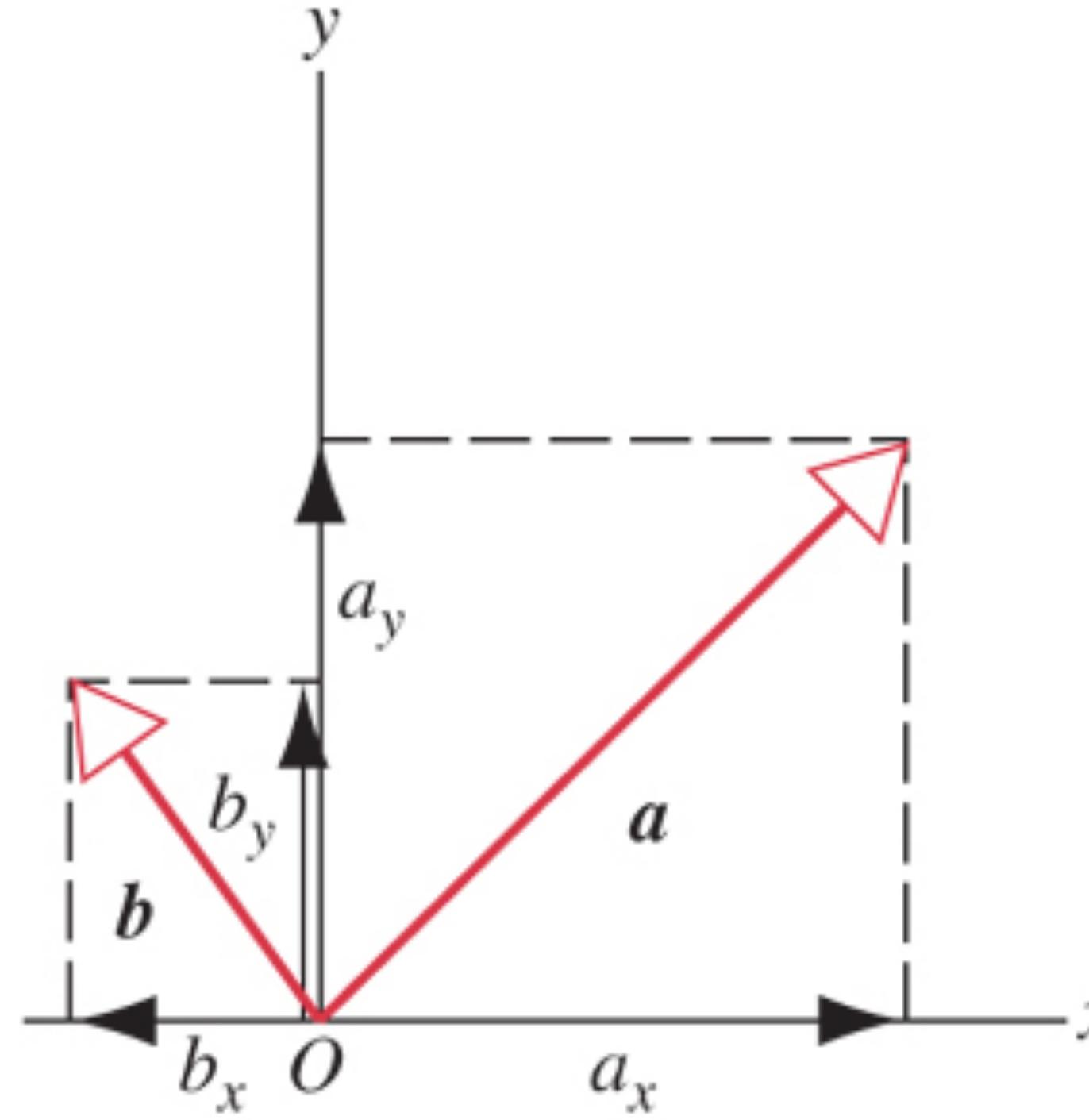


Qualsiasi vettore è **scomponibile** in una somma di versori cartesiani

$$\vec{a} = a_x \hat{i} + a_y \hat{j} \equiv (a_x, a_y)$$

# Somma vettoriale in componenti cartesiane

Basta sommare o sottrarre le componenti - utile in programmazione



*Ricorda:  
il punto di applicazione non  
è una proprietà del vettore!*

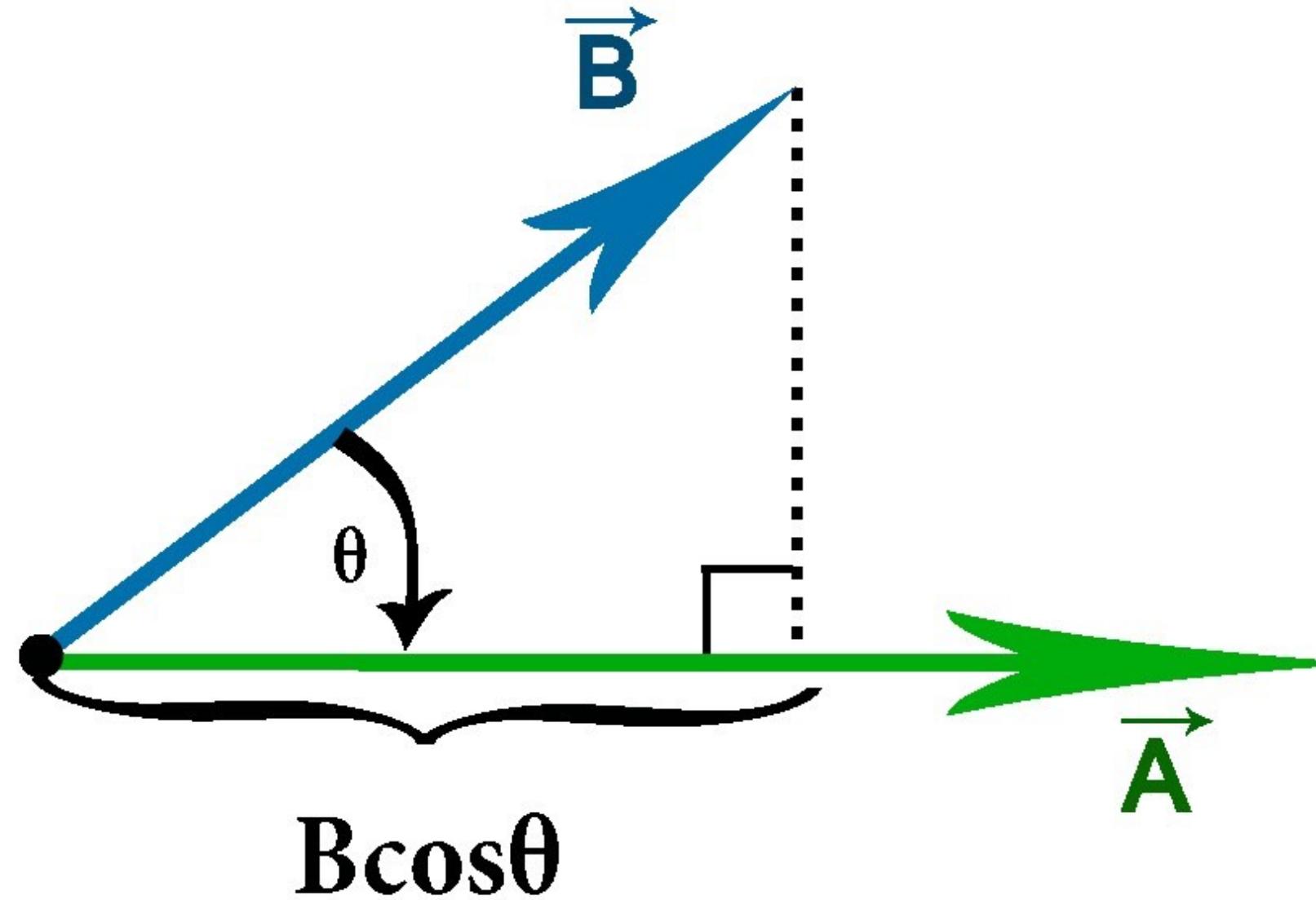
$$\vec{a} \pm \vec{b} = (a_x \pm b_x)\hat{i} + (a_y \pm b_y)\hat{j} = (a_x \pm b_x, a_y \pm b_y)$$

*Componenti  
lungo x*

*Componenti  
lungo y*

# Prodotto scalare (dot product)

Operazione **esterna**: il risultato è uno **scalare**



$$\vec{a} \cdot \vec{b} = ab \cos(\theta) = ab_a$$

( $b_a$  è la proiezione di  $b$  su  $a$ )

$$\vec{a} \cdot \vec{b} = \vec{b} \cdot \vec{a}$$

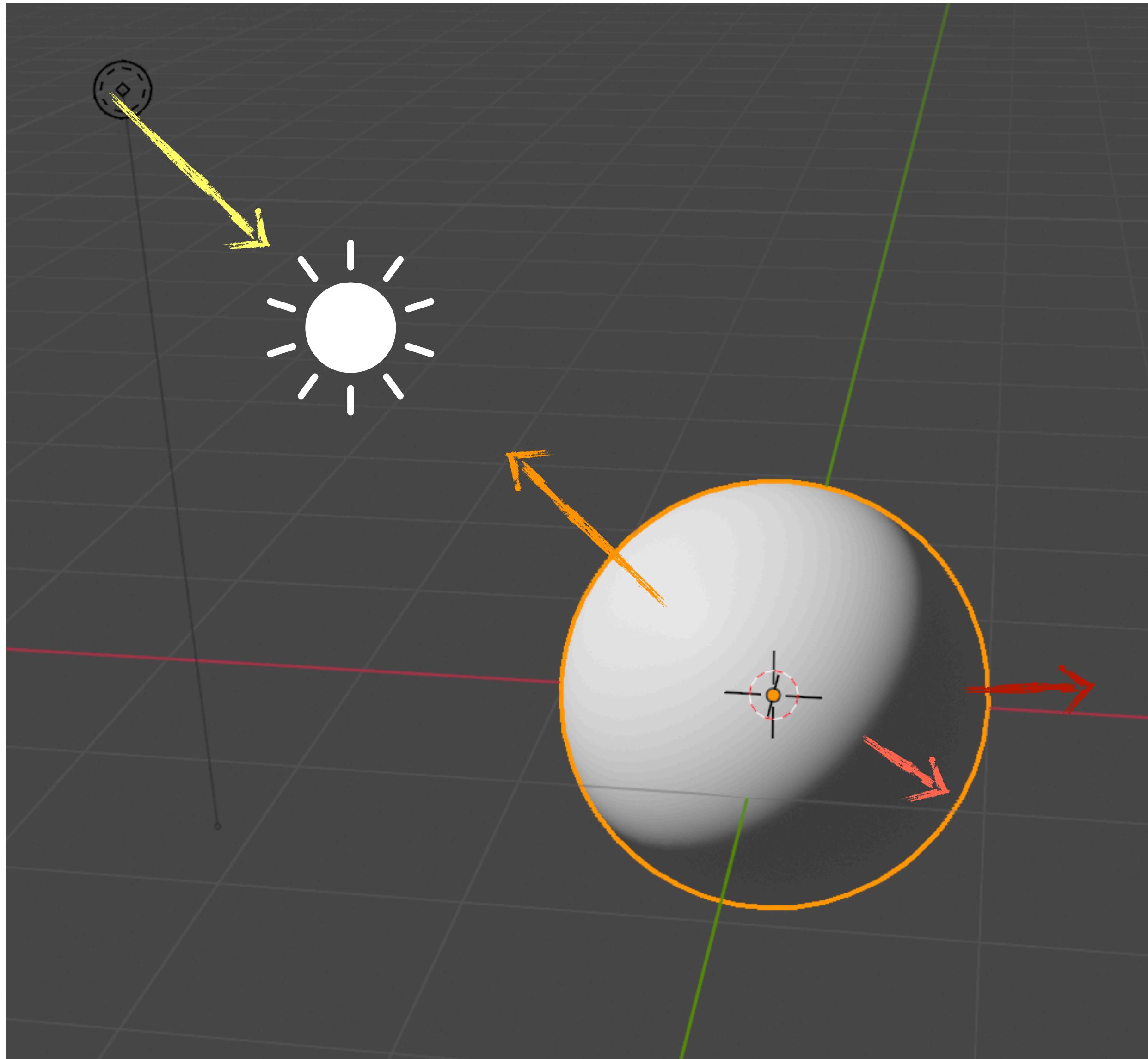
*in componenti cartesiane*

$$\vec{a} \cdot \vec{b} = (a_x b_x) + (a_y b_y)$$

*casi particolari*

$$\vec{a} \parallel \vec{b} \Rightarrow \vec{a} \cdot \vec{b} = ab$$
$$\vec{a} \perp \vec{b} \Rightarrow \vec{a} \cdot \vec{b} = 0$$

# Dot product in computer grafica: direct illumination

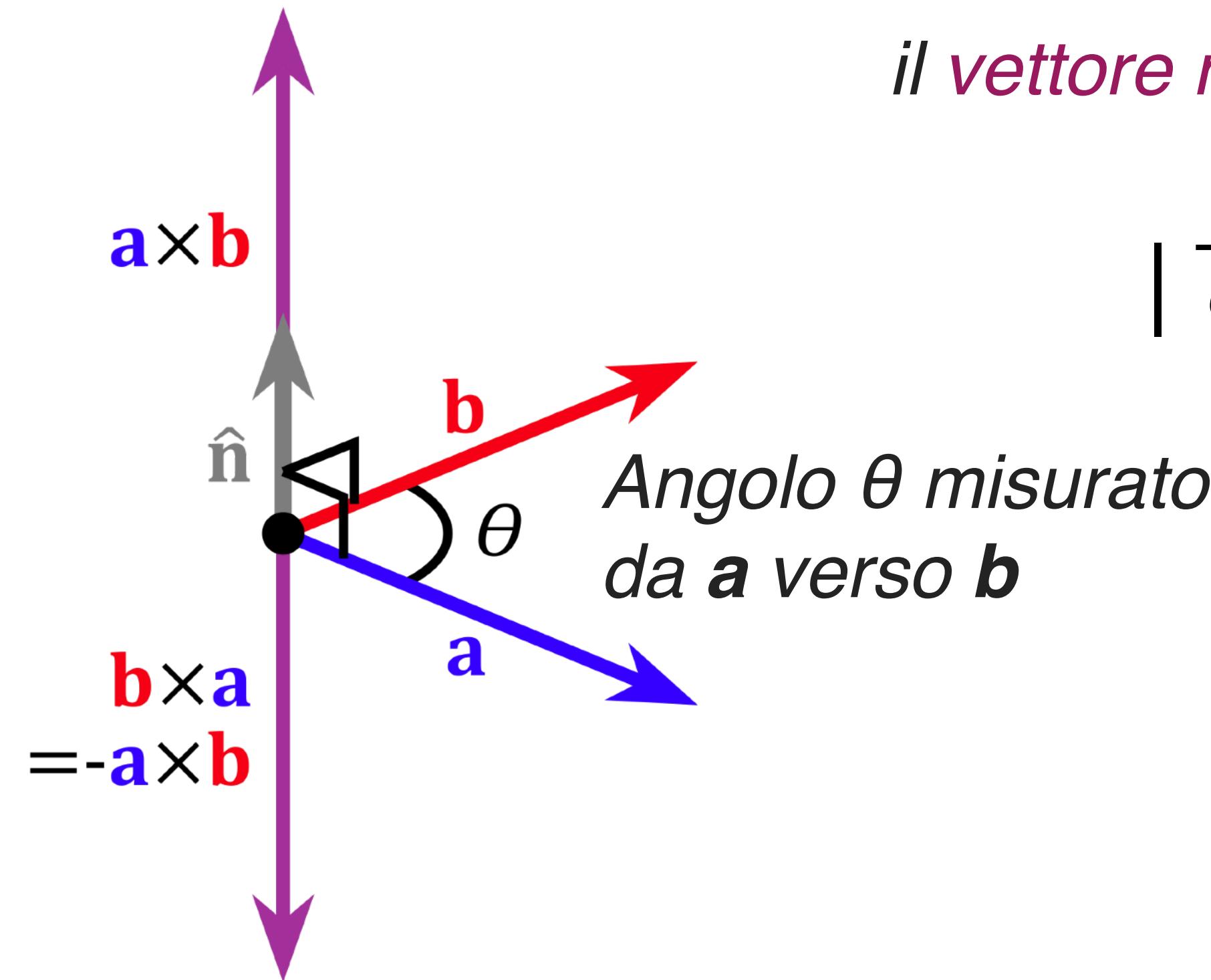


Basta guardare al **segno** del prodotto scalare tra il versore della **sorgente luminosa** e la **normale** alla superficie dell'oggetto (fatto di triangoli)

prodotto  $< 0$ : illuminato  
prodotto  $> 0$ : in ombra

# Prodotto vettoriale (cross product)

La “regola della mano destra” aiuta a capire il verso



casi particolari

$$\vec{a} \parallel \vec{b} \Rightarrow \vec{a} \wedge \vec{b} = 0$$

$$\vec{a} \perp \vec{b} \Rightarrow \vec{a} \cdot \vec{b} = ab$$

Operazione “interna”  
il vettore risultante è perpendicolare agli altri due!

$$| \vec{a} \wedge \vec{b} | \equiv | \vec{a} \times \vec{b} | = ab \sin(\theta)$$

$$\vec{a} \wedge \vec{b} = - \vec{b} \wedge \vec{a}$$

In componenti cartesiane richiede  
il **determinante** di una matrice

$$\vec{a} \wedge \vec{b} = \begin{vmatrix} \hat{i} & \hat{j} & \hat{k} \\ a_x & a_y & a_z \\ b_x & b_y & b_z \end{vmatrix}$$