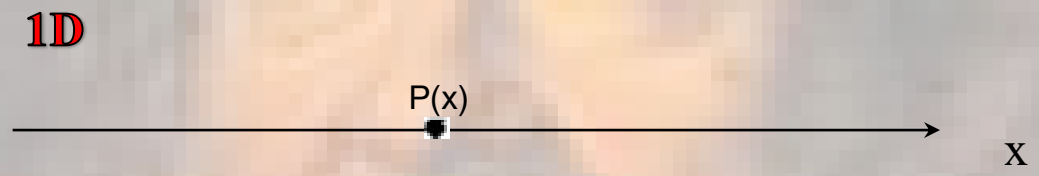
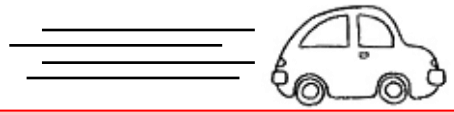
Cinematica in una dimensione



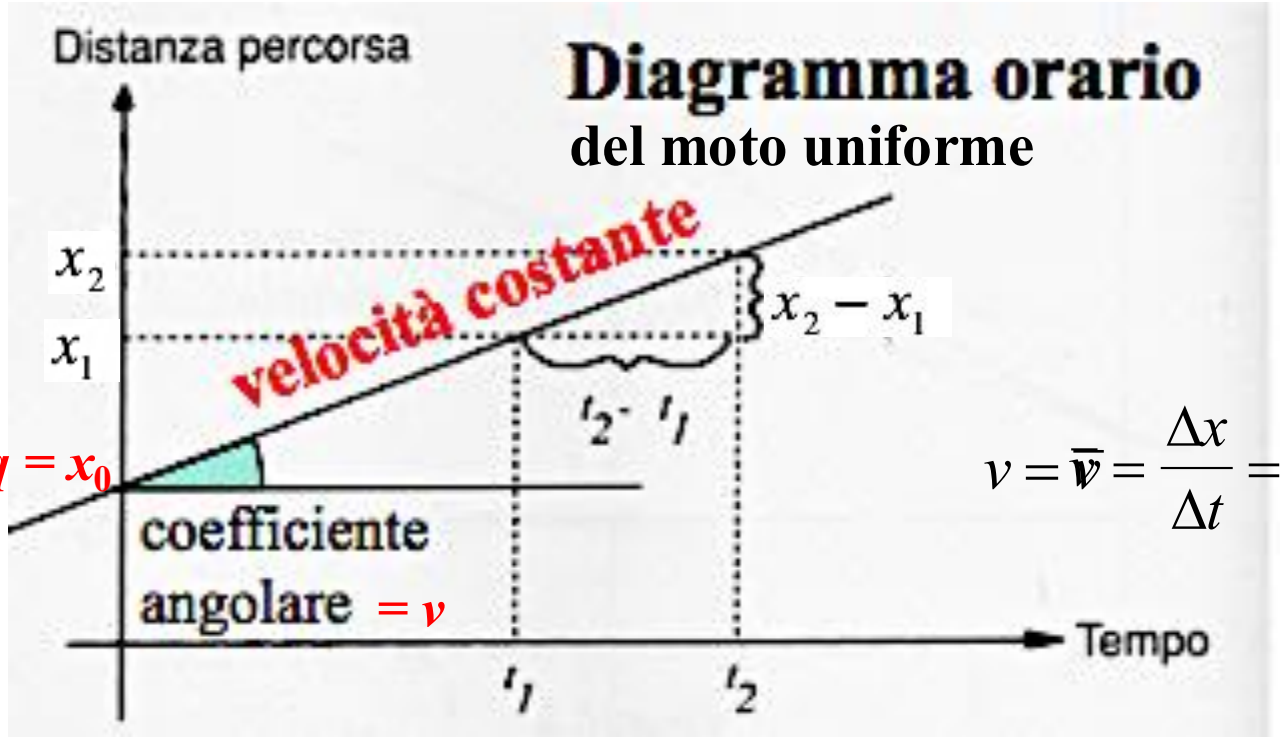
Il Moto Uniforme (v = costante)



Un corpo si muove di **moto uniforme** se la sua velocità scalare v è **costante**. Questo vuol dire che il corpo percorre **spazi uguali in tempi uguali** e la sua velocità, ad ogni istante, è uguale alla sua velocità media: $v = \overline{v}$

Equazione del moto uniforme $x(t) = x_o + vt$

Equazione di una retta, del tipo: $y = q + mx$



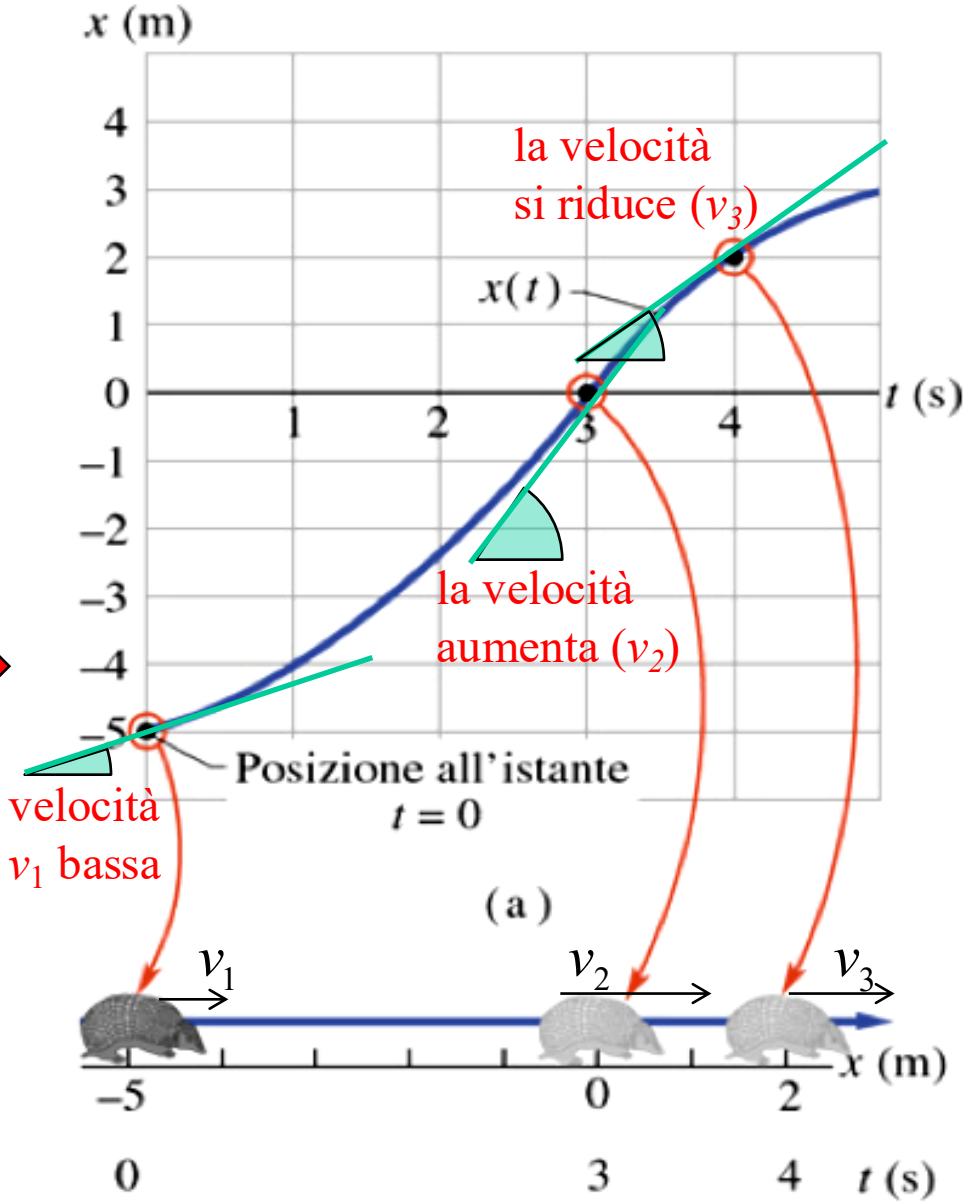
$$v = \overline{v} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1}$$

La velocità istantanea è la derivata prima dello spostamento!

La velocità istantanea non è nient'altro che la **derivata prima** dello spazio rispetto al tempo calcolata in un certo istante di tempo e coincide dunque con il **coefficiente angolare della retta tangente** alla curva oraria $x = f(t)$ in quell'istante di tempo:

$$v(t) = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{dx}{dt}$$

E' possibile fare una valutazione qualitativa **approssimata** della velocità istantanea in un punto della curva oraria valutando «ad occhio» il valore del **coefficiente angolare** della retta tangente in quel punto...

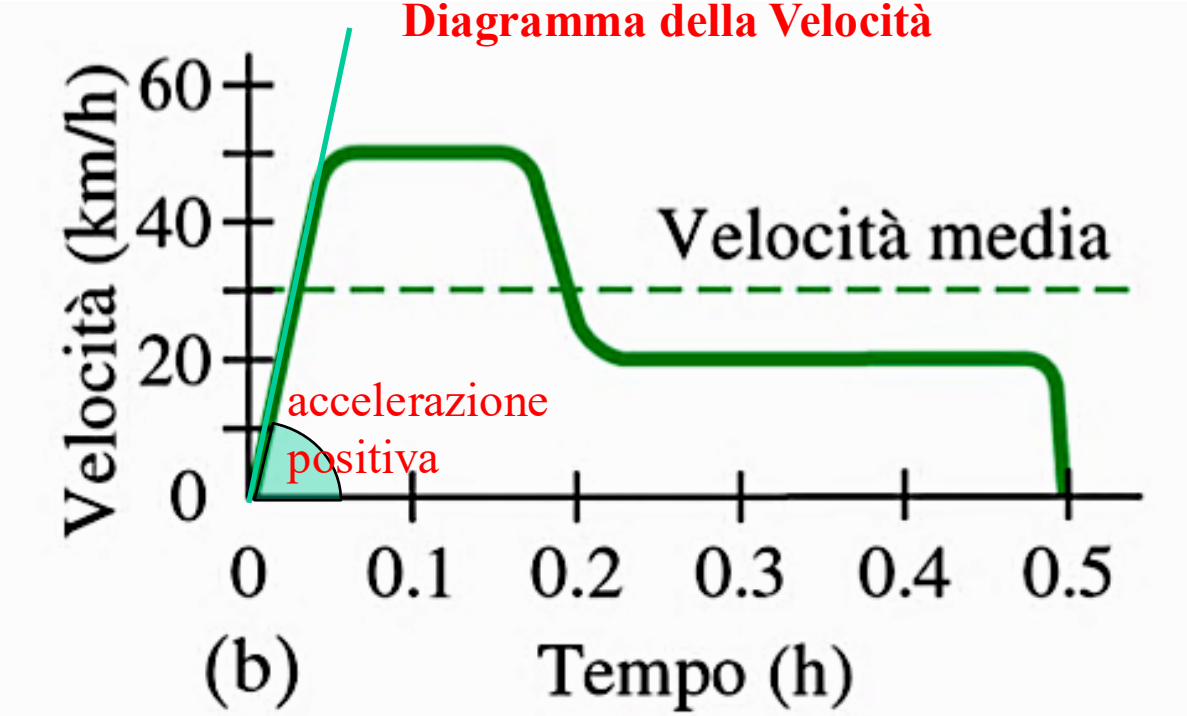


Accelerazione istantanea

L'accelerazione istantanea (o semplicemente accelerazione) è la rapidità di variazione della velocità in un certo istante ed è matematicamente rappresentata dalla derivata prima della velocità rispetto al tempo:

$$a(t) = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{dv}{dt}$$

Geometricamente rappresenta dunque la **pendenza della curva v(t)** in un certo punto.



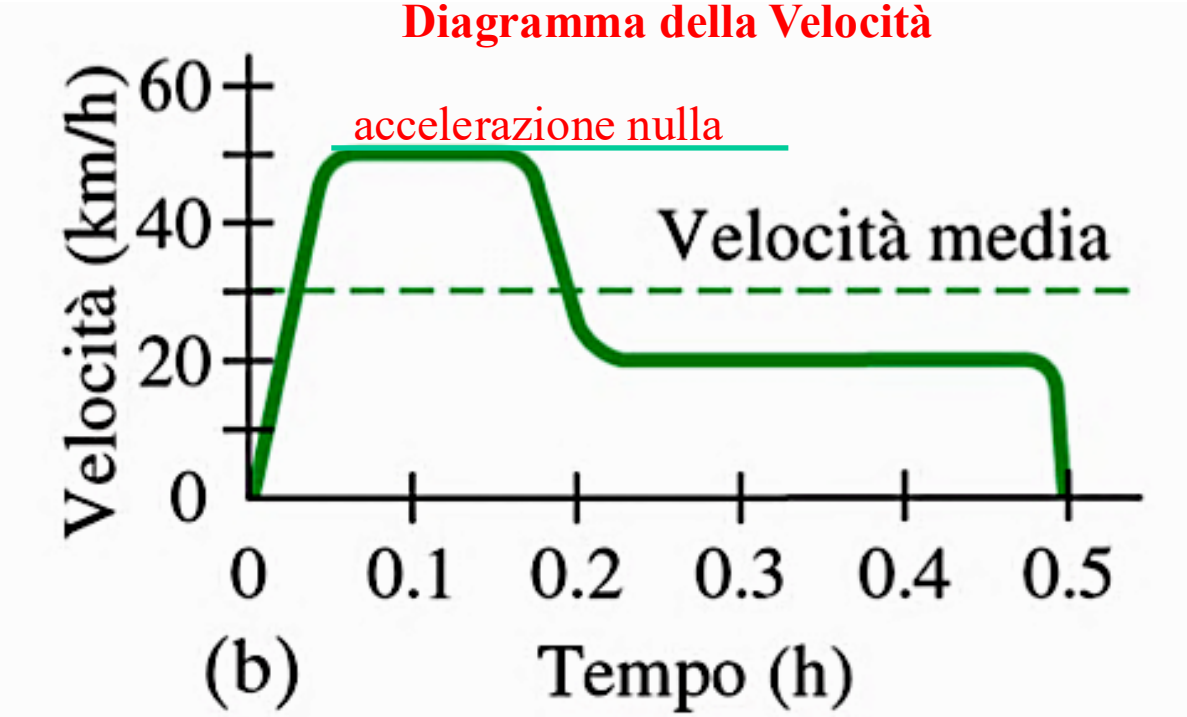
Accelerazione istantanea

L'accelerazione istantanea (o semplicemente accelerazione) è la rapidità di variazione della velocità in un certo istante ed è matematicamente rappresentata dalla derivata prima della velocità rispetto al tempo:

$$a(t) = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{dv}{dt}$$

Geometricamente rappresenta dunque la **pendenza della curva v(t)** in un certo punto.

Diagramma della Velocità



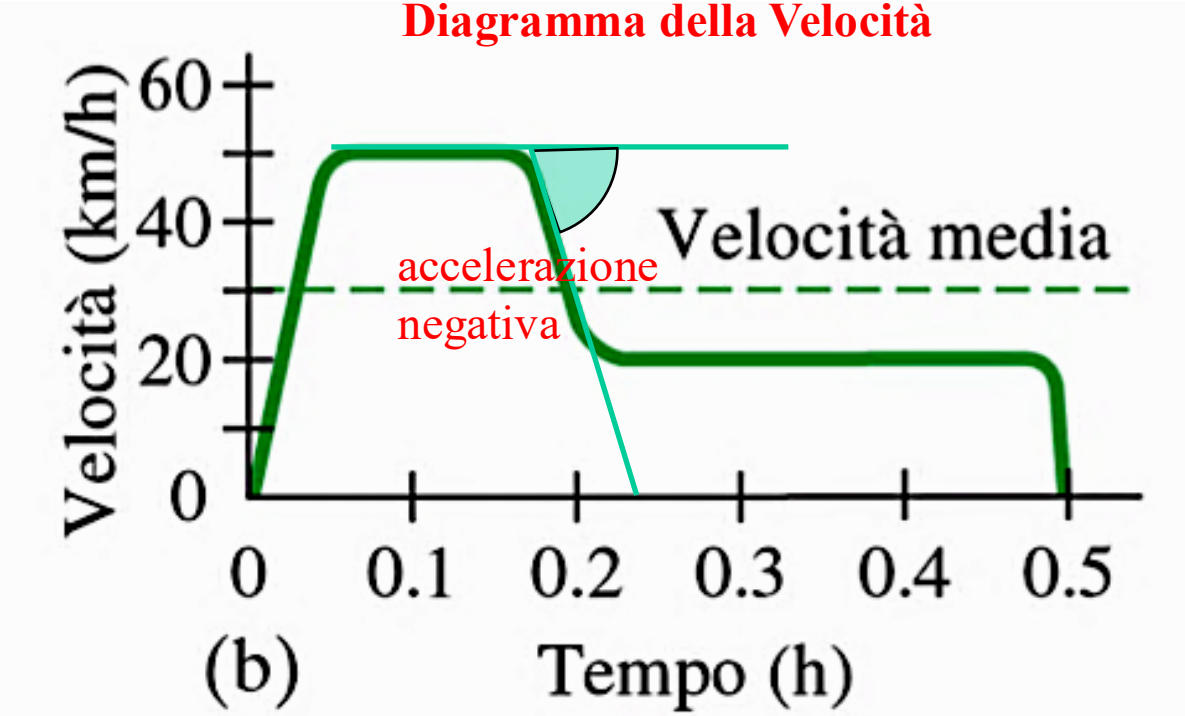
Accelerazione istantanea

L'accelerazione istantanea (o semplicemente accelerazione) è la rapidità di variazione della velocità in un certo istante ed è matematicamente rappresentata dalla derivata prima della velocità rispetto al tempo:

$$a(t) = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{dv}{dt}$$

Geometricamente rappresenta dunque la **pendenza della curva v(t)** in un certo punto.

Diagramma della Velocità



Moto uniformemente accelerato

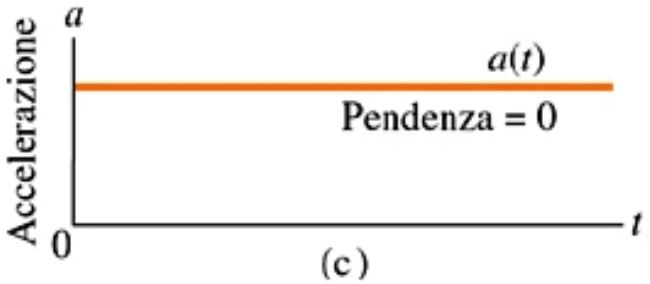
In molti dei più comuni tipi di moto l'accelerazione è **costante** o pressochè costante (ad esempio quando deceleriamo avvicinandoci a un semaforo rosso, o quando acceleriamo ripartendo al verde).

Quando l'accelerazione è costante, la **distinzione** tra accelerazione media e istantanea perde di significato e quindi possiamo scrivere:

$$a = \bar{a} = \frac{v - v_0}{t - 0}$$

dove v_0 è la velocità al tempo t=0 e v è la velocità al generico istante di tempo t.

Diagramma dell'accelerazione



Moto uniformemente accelerato

In molti dei più comuni tipi di moto l'accelerazione è **costante** o pressochè costante (ad esempio quando deceleriamo avvicinandoci a un semaforo rosso, o quando acceleriamo ripartendo al verde).

Quando l'accelerazione è costante, la **distinzione** tra accelerazione media e istantanea perde di significato e quindi possiamo scrivere:

$$a = \bar{a} = \frac{v - v_0}{t - 0}$$

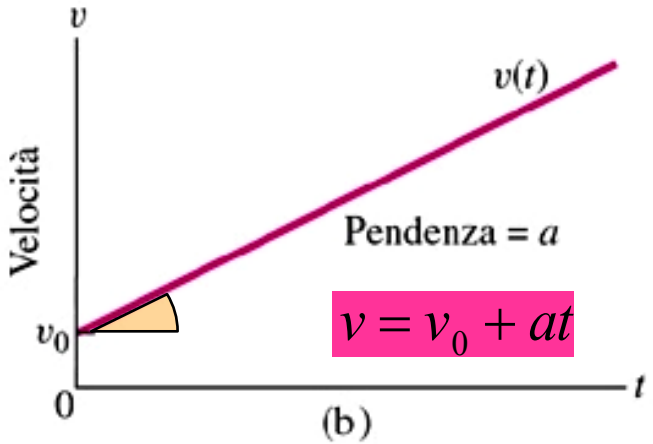
dove v_0 è la velocità al tempo t=0 e v è la velocità al generico istante di tempo t.

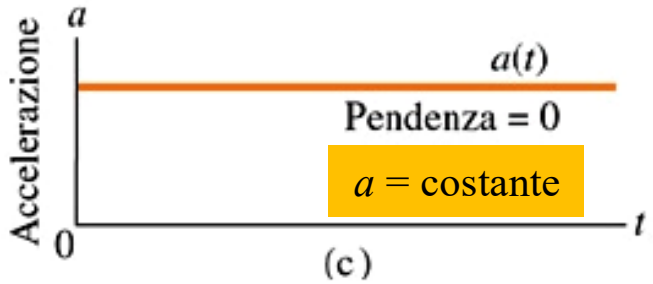
Avremo quindi la seguente **relazione tra velocità e accelerazione**:

$$\frac{v - v_o}{t} = a \quad \square \quad v(t) = v_0 + at$$

che è l'equazione di una retta, cioè del tipo:

$$y = q + mx$$





Moto uniformemente accelerato

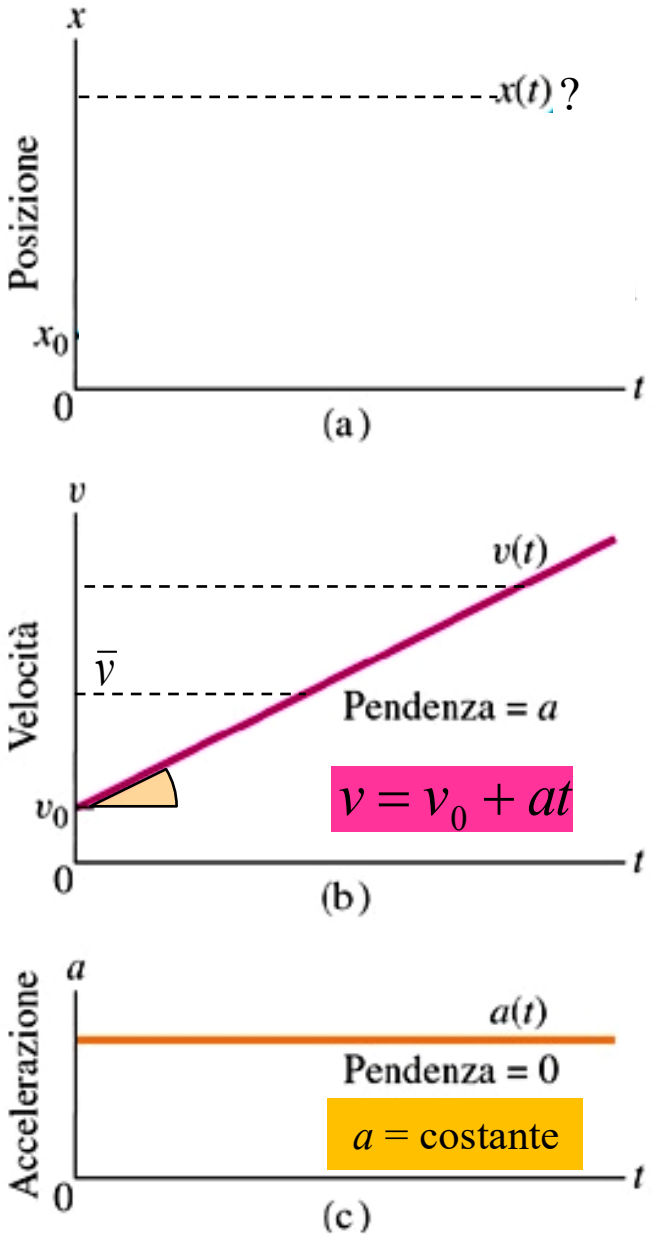
Analogamente possiamo scrivere:

$$\bar{v} = \frac{x - x_0}{t - 0} \quad \square \quad x(t) = x_0 + \bar{v}t$$

dove x_0 è la posizione del punto materiale considerato al tempo t=0 e $\bar{v}$ è la **velocità media** tra t=0 e un istante successivo t. Questa l'equazione è uguale a quella, già incontrata, che descrive lo **spostamento nel moto uniforme** (una retta nel diagramma orario), ma stavolta c'è la *velocità media* al posto della velocità costante.

Essendo, come visto poc'anzi, la velocità funzione **lineare** del tempo, possiamo esprimere la velocità media $\bar{v}$ anche come **media aritmetica** tra la velocità nel punto iniziale v_0 e la velocità nel generico punto finale v=v(t):

$$\bar{v} = \frac{1}{2}(v_0 + v)$$



Moto uniformemente accelerato

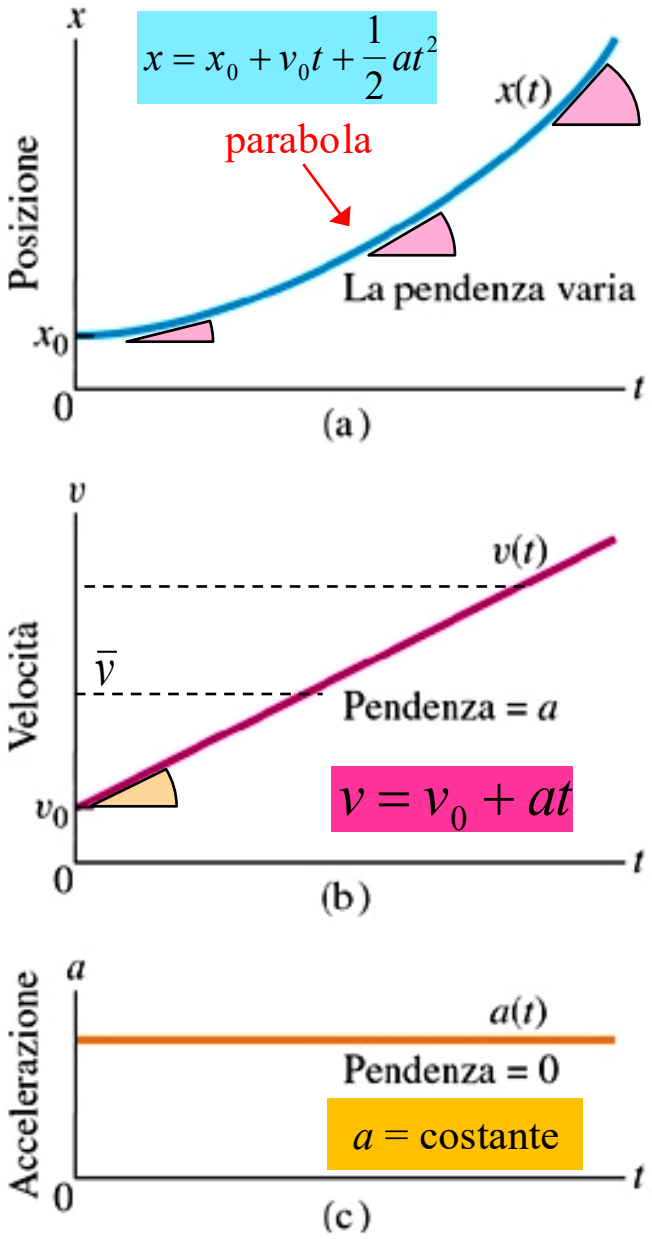
Utilizzando infine l'espressione $v = v_0 + at$, sostituiamo la v nell'equazione precedente ottenendo:

$$\bar{v} = \frac{1}{2}[v_0 + (v_0 + at)] = v_0 + \frac{1}{2}at$$

che sostituita a sua volta nell'espressione $x(t) = x_0 + \bar{v}t$, darà finalmente la **dipendenza dello spostamento dall'accelerazione**:

$$x(t) = x_0 + v_0 t + \frac{1}{2}at^2$$

che è una dipendenza di tipo quadratico (equazione di una **parabola** nel diagramma orario, la cui **pendenza** punto per punto è rappresentata dalla corrispondente velocità istantanea – che evidentemente aumenta nel moto uniformemente accelerato).



Moto con accelerazione costante

Manipolando algebricamente le **due equazioni** fondamentali appena ricavate, e cioè:

$$v(t) = v_0 + at \qquad x(t) = x_0 + v_0 t + \frac{1}{2}at^2$$

si ricava un'altra **equazione** molto utile nella risoluzione dei problemi pratici riguardanti il moto ad accelerazione costante, in particolare quando tra i dati iniziali non c'è il tempo:

Si ricava t dalla prima equazione e si sotituisce nella seconda…

$$\begin{cases} v(t) = v_0 + at \\ x(t) = x_0 + v_0 t + \frac{1}{2}at^2 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} t = \frac{v - v_0}{a} \\ x(t) = x_0 + v_0 \frac{v - v_0}{a} + \frac{1}{2}a\left(\frac{v - v_0}{a}\right)^2 \end{cases} \Rightarrow$$

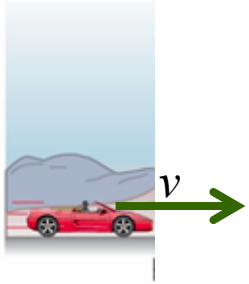
Provate a ricavarla da soli….

$$v^2 = v_0^{\,2} + 2a(x - x_0)$$

Equazioni del moto uniformemente accelerato (a=cost)		Grandezza mancante
(I)	$v = v_0 + at$	$x - x_0$
(II)	$x = x_0 + v_0 t + \frac{1}{2}at^2$	v
(III)	$v^2 = v_0^{\,2} + 2a(x - x_0)$	t

Esercizio di esempio

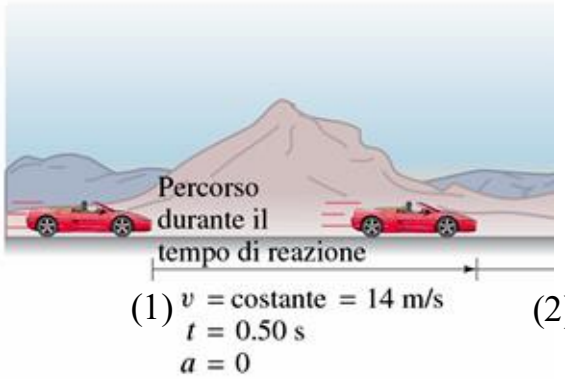
Determiniamo la minima distanza di frenata di un'automobile che viaggia ad una velocità costante $v = 14\text{m/s}$.



Distinguiamo **2 intervalli** di tempo:

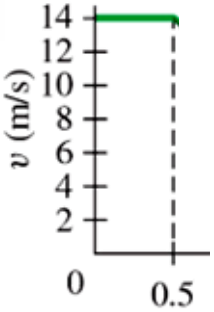
Esercizio di esempio

Determiniamo la minima distanza di frenata di un'automobile che viaggia ad una velocità costante v = 14m/s.



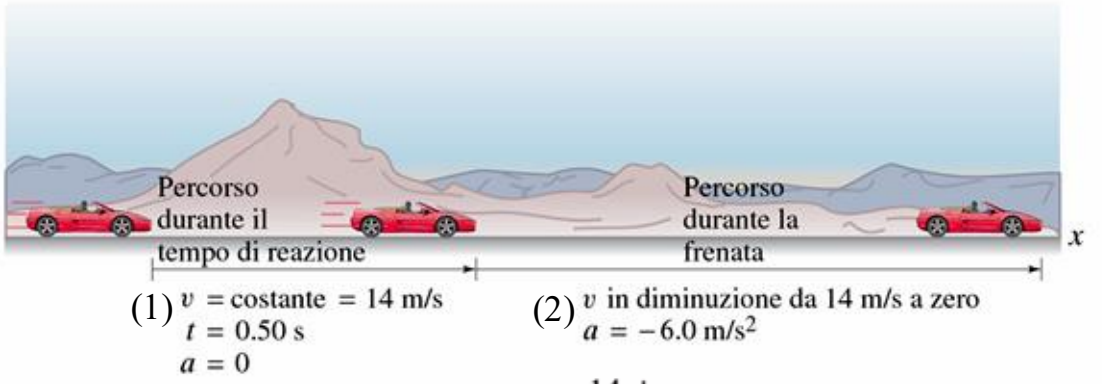
Distinguiamo **2 intervalli** di tempo:

(1) **Tempo di reazione**: comincia quando il guidatore decide di premere il pedale del freno e finisce quando il piede tocca il pedale. In questo intervallo, che assumiamo sia 0.50s, l'accelerazione è nulla.



Esercizio di esempio

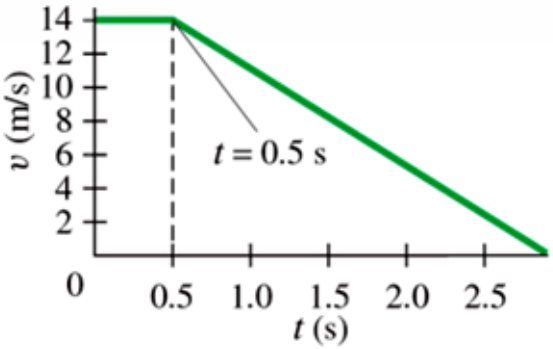
Determiniamo la minima distanza di frenata di un'automobile che viaggia ad una velocità costante v = 14m/s.



Distinguiamo **2 intervalli** di tempo:

(1) **Tempo di reazione**: comincia quando il guidatore decide di premere il pedale del freno e finisce quando il piede tocca il pedale. In questo intervallo, che assumiamo sia 0.50s, l'accelerazione è nulla.

(2) **Tempo di frenata**: comincia quando l'auto inizia a frenare e termina quando l'auto è completamente ferma. Assumiamo che l'accelerazione in questo intervallo sia costante e pari ad a= – 6 m/s^2.



Quale equazione scegliere per determinare lo spazio percorso durante il tempo di reazione? (il moto qui è uniforme)

(1) Dati:

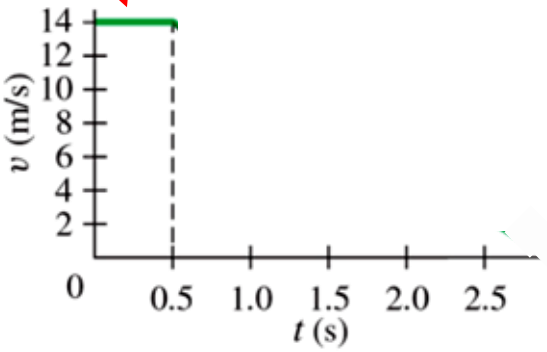
$t = 0.50$ s

$v_0 = 14$ m/s

$v = 14$ m/s

$a = 0$

$x_0 = 0$



- **incognita**: x
- **accelerazione nulla**: a

Equazioni del moto uniformemente accelerato (a=cost) — Grandezza mancante

(I) $v = v_0 + at$ ⟶ $x - x_0$

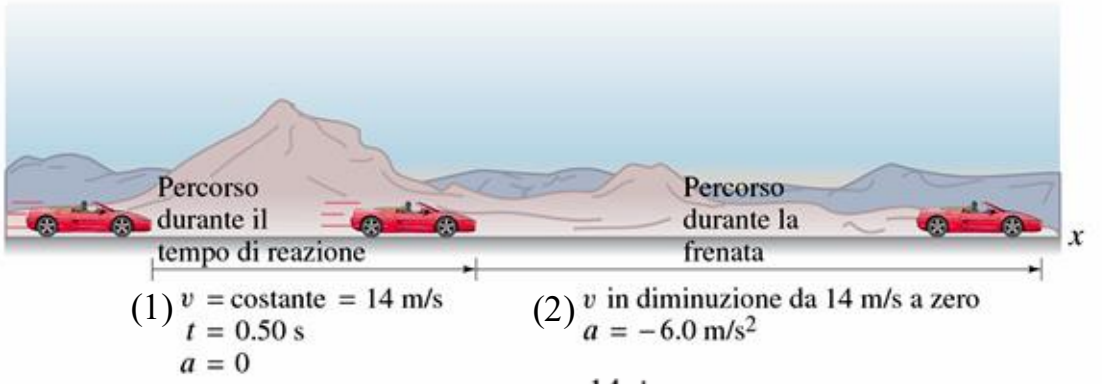
Equazione del moto uniforme

(II) $x = x_0 + v_0 t + \frac{1}{2} a t^2$ ⟶ v

(III) $v^2 = v_0^2 + 2a(x - x_0)$ ⟶ t

Esercizio di esempio

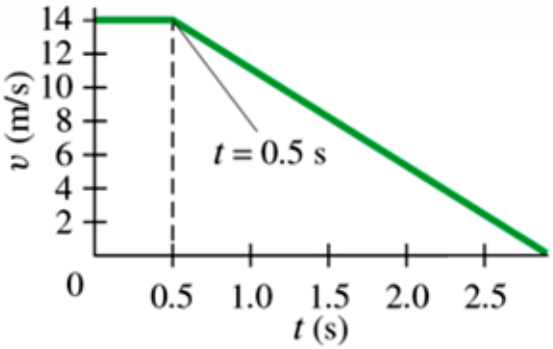
Determiniamo la minima distanza di frenata di un'automobile che viaggia ad una velocità costante v = 14m/s.



Distinguiamo **2 intervalli** di tempo:

(1) **Tempo di reazione**: comincia quando il guidatore decide di premere il pedale del freno e finisce quando il piede tocca il pedale. In questo intervallo, che assumiamo sia 0.50s, l'accelerazione è nulla.

(2) **Tempo di frenata**: comincia quando l'auto inizia a frenare e termina quando l'auto è completamente ferma. Assumiamo che l'accelerazione in questo intervallo sia costante e pari ad a= – 6 m/s^2.



Soluzione

(1) **Spazio percorso durante il tempo di reazione**: occorre utilizzare l'equazione II del moto uniformemente accelerato (con a=0 in questo caso): $x = 0 + v_0 t = (14 m/s)(0.50 s) = 7.0 m$

(1) Dati:

t = 0.50 s

v_0= 14 m/s

v = 14 m/s

a = 0

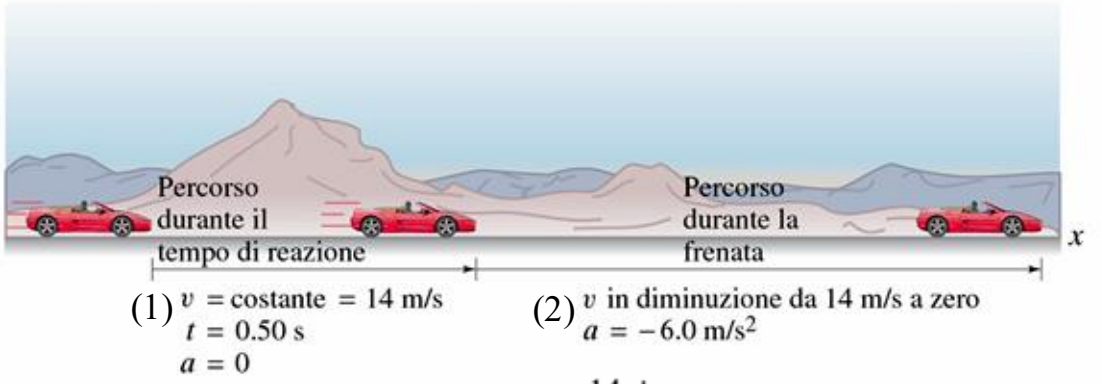
x_0 = 0

Incognita:

x

Esercizio di esempio

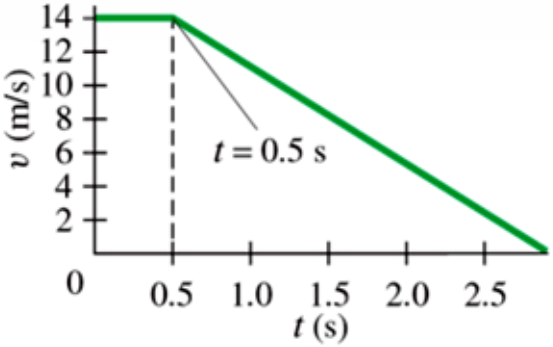
Determiniamo la minima distanza di frenata di un'automobile che viaggia ad una velocità costante v = 14m/s.



Distinguiamo **2 intervalli** di tempo:

(1) **Tempo di reazione**: comincia quando il guidatore decide di premere il pedale del freno e finisce quando il piede tocca il pedale. In questo intervallo, che assumiamo sia 0.50s, l'accelerazione è nulla.

(2) **Tempo di frenata**: comincia quando l'auto inizia a frenare e termina quando l'auto è completamente ferma. Assumiamo che l'accelerazione in questo intervallo sia costante e pari ad a= – 6 m/s^2.



Soluzione

(1) **Spazio percorso durante il tempo di reazione**: occorre utilizzare l'equazione II del moto uniformemente accelerato (con a=0 in questo caso): $x = 0 + v_0 t = (14 m/s)(0.50 s) = 7.0 m$

(2) **Spazio totale percorso**:

(1) **Dati:**
t = 0.50 s
v_0= 14 m/s
v = 14 m/s
a = 0
x_0 = 0

(2) **Dati:**
x_0 = 7.0 m
v_0= 14 m/s
v = 0
a = – 6 m/s^2

Incognita:
x

Quale equazione scegliere per determinare lo spazio percorso durante la decelerazione?

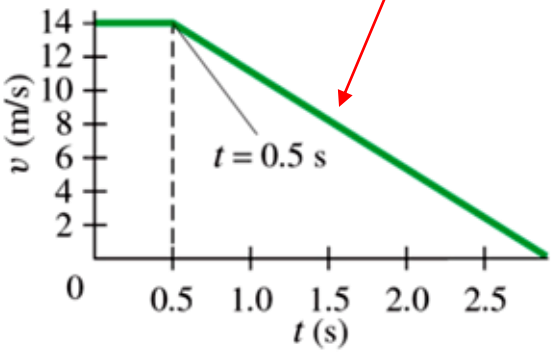
(2) Dati:

$x_0 = 7.0$ m

$v_0 = 14$ m/s

$v = 0$

$a = -6$ m/s^2

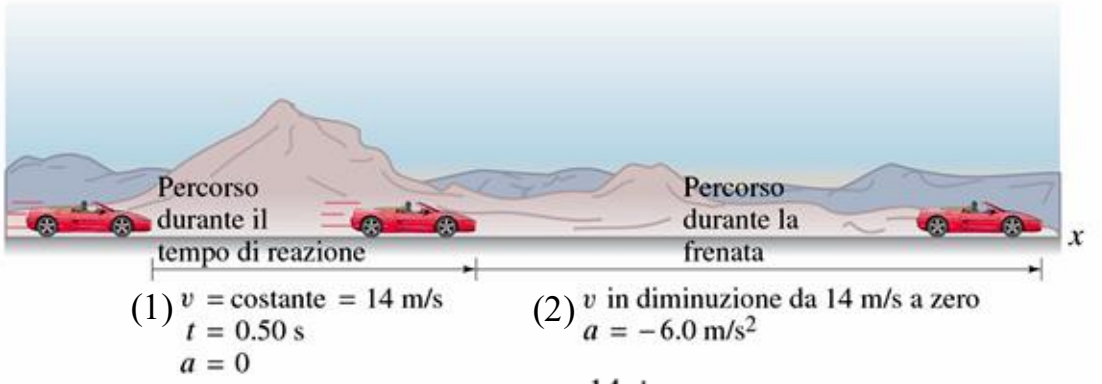


- **incognita**: x
- **grandezza mancante**: t

Equazioni del moto uniformemente accelerato (a=cost)		Grandezza mancante
(I)	$v = v_0 + at$	$x - x_0$
(II)	$x = x_0 + v_0 t + \frac{1}{2} a t^2$	v
(III)	$v^2 = v_0^{\,2} + 2a(x - x_0)$	t

Esercizio di esempio

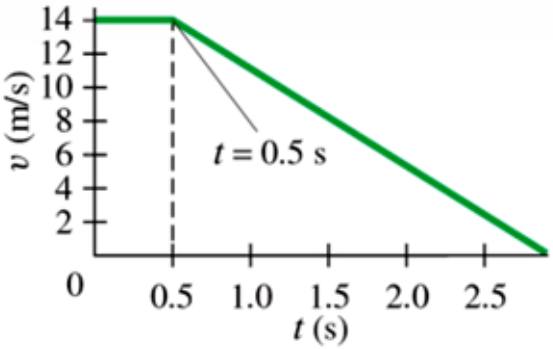
Determiniamo la minima distanza di frenata di un'automobile che viaggia ad una velocità costante v = 14m/s.



Distinguiamo **2 intervalli** di tempo:

(1) **Tempo di reazione**: comincia quando il guidatore decide di premere il pedale del freno e finisce quando il piede tocca il pedale. In questo intervallo, che assumiamo sia 0.50s, l'accelerazione è nulla.

(2) **Tempo di frenata**: comincia quando l'auto inizia a frenare e termina quando l'auto è completamente ferma. Assumiamo che l'accelerazione in questo intervallo sia costante e pari ad a= – 6 m/s^2.



Soluzione

(1) **Spazio percorso durante il tempo di reazione**: occorre utilizzare l'equazione II del moto uniformemente accelerato (con a=0 in questo caso): $x = 0 + v_0 t = (14 m/s)(0.50 s) = 7.0 m$

(2) **Spazio totale percorso**: dal calcolo precedente abbiamo ricavato x_0 = 7.0 m, e stavolta utilizziamo l'equazione III del moto uniformemente accelerato, risolta però rispetto ad x:

(1) Dati:
t = 0.50 s
v_0= 14 m/s
v = 14 m/s
a = 0
x_0 = 0

(2) Dati:
x_0 = 7.0 m
v_0= 14 m/s
v = 0
a = – 6 m/s^2

Incognita:
x

$$x = x_0 + \frac{v^2 - v_0^2}{2a} = 7.0m + \frac{0 - (14 m/s)^2}{2(-6.0 m/s^2)} = 7.0m + \frac{-196 m^2/s^2}{-12 m/s^2} = 7.0m + 16m = 23m$$

Dall'equazione III del moto uniformemente accelerato notiamo che la **distanza di frenata**, cioè lo spazio totale $(x - x_0)$ percorso dall'auto dal momento in cui si preme il freno fino all'arresto completo del'auto, aumenta proporzionalmente al **quadrato** della velocità iniziale, ossia in maniera **non lineare**: andando a velocità doppia occorrerà quindi una distanza di frenata quattro volte maggiore, e così via...

$$v^2 = v_0^{\,2} + 2a(x - x_0) \longrightarrow x = x_0 + \frac{v^2 - v_0^{\,2}}{2a} \xrightarrow{v=0} x - x_0 = \frac{-v_0^{\,2}}{2a}$$

E' dunque consigliabile, per chi guida, tenerne conto per la valutazione della corretta distanza di sicurezza da tenere rispetto al veicolo che ci precede, al fine di evitare **spiacevoli "inconvenienti"**...



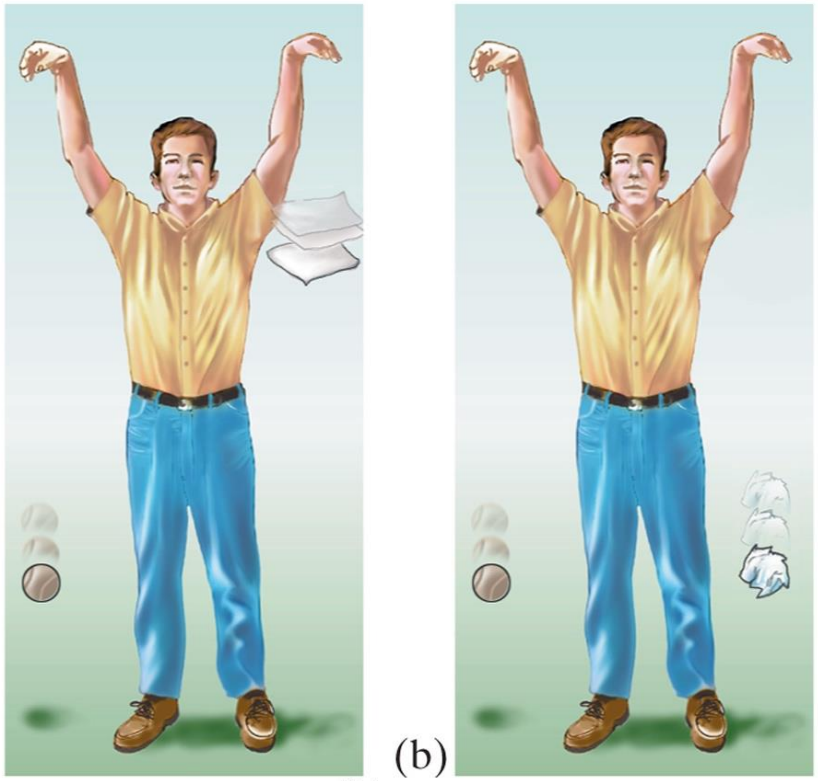


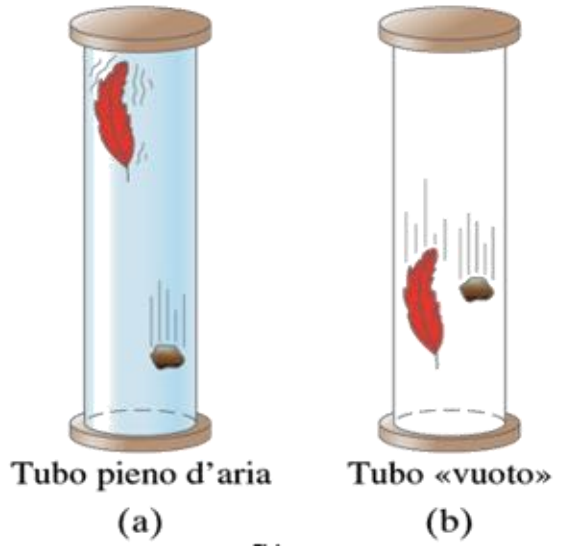
Accelerazione nel moto di caduta libera

Uno degli esempi più comuni di moto uniformemente accelerato unidimensionale è quello di un **oggetto lasciato libero di cadere in prossimità della superficie terrestre**.

Galileo fu il primo a rendersi conto che **non è vero** che gli oggetti più pesanti cadono più velocemente di quelli più leggeri e ad ipotizzare che, **in assenza di aria o di altre resistenze, tutti gli oggetti cadrebbero con la stessa accelerazione costante.**





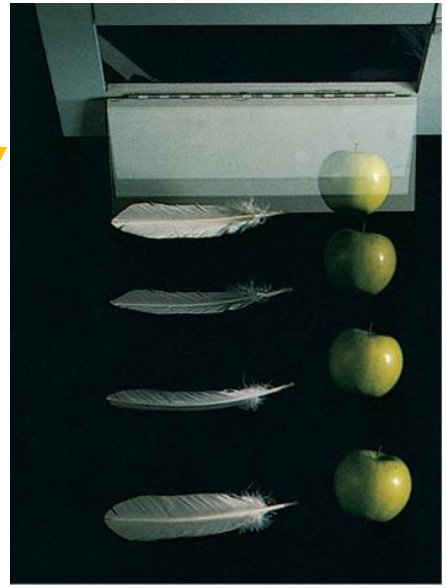


Accelerazione nel moto di caduta libera

https://www.youtube.com/watch?v=4GJg-6AHSt8



Accelerazione di Gravità g



Da Newton in poi sappiamo che l'accelerazione costante in gioco nel moto di caduta libera è **l'accelerazione di gravità g**, che – in assenza di resistenza dell'aria – è effettivamente indipendente dalle caratteristiche dell'oggetto che cade (massa, densità, forma, etc.). Al livello del mare **g = 9.8 m/s^2** (valore misurato per la prima volta nel 1640 da G.Riccioli).

Per gli oggetti in **caduta libera** possiamo dunque utilizzare le **equazioni del moto uniformemente accelerato** tenendo conto che:

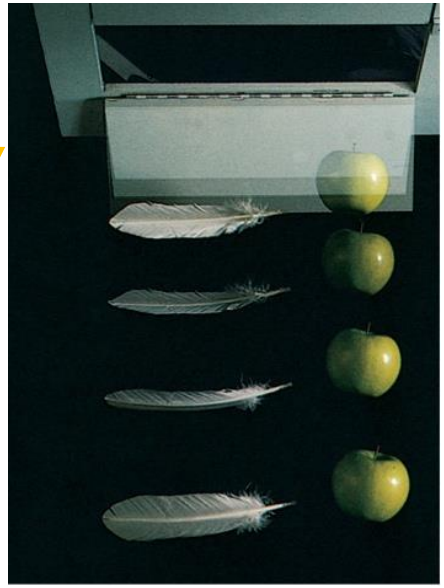
1) la direzione del moto è collocata stavolta lungo l'asse verticale y

2) se il verso positivo dell'asse y è quello in figura, l'accelerazione in caduta libera risulta *negativa* (a causa del suo verso non del suo modulo, che è ovviamente positivo) cosicchè possiamo riscrivere le equazioni I, II e III del moto uniformemente accelerato nella seguente forma:

Equazioni del moto di oggetti in caduta libera ($a = -g = \text{cost}$)

$$I)\ v = v_0 - gt \qquad II)\ y - y_0 = v_0 t - \frac{1}{2} g t^2 \qquad III)\ v^2 = v_0^{\,2} - 2g(y - y_0)$$

Accelerazione di Gravità g



Da Newton in poi sappiamo che l'accelerazione costante in gioco nel moto di caduta libera è **l'accelerazione di gravità g**, che – in assenza di resistenza dell'aria – è effettivamente indipendente dalle caratteristiche dell'oggetto che cade (massa, densità, forma, etc.). Al livello del mare **g = 9.8 m/s^2** (valore misurato per la prima volta nel 1640 da G.Riccioli).

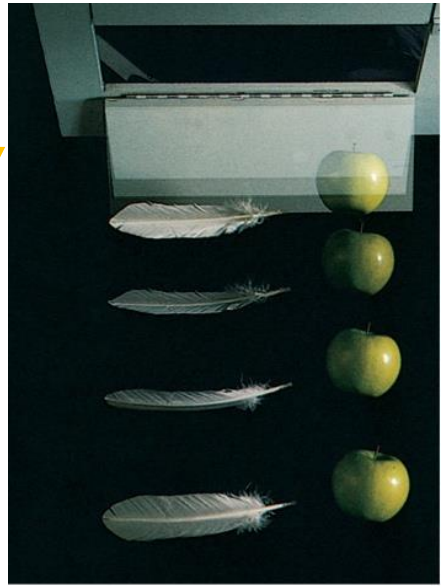
Per gli oggetti in **caduta libera** possiamo dunque utilizzare le **equazioni del moto uniformemente accelerato** tenendo conto che:
1) la direzione del moto è collocata stavolta lungo l'asse verticale y
2) se il verso positivo dell'asse y è quello in figura, l'accelerazione in caduta libera risulta *negativa* (a causa del suo verso non del suo modulo, che è ovviamente positivo) cosicchè possiamo riscrivere le equazioni I, II e III del moto uniformemente accelerato nella seguente forma:

Equazioni del moto di oggetti in caduta libera ($a = +g = \text{cost}$)

$$I)\ v = v_0 + gt \qquad II)\ y - y_0 = v_0 t + \frac{1}{2} g t^2 \qquad III)\ v^2 = v_0^{\,2} + 2g(y - y_0)$$

Se invece **invertiamo** il verso positivo dell'asse y in modo che quest'ultimo punti verso il basso, l'accelerazione di gravità diventa *positiva* e il segno **meno** nelle equazioni diventa nuovamente un segno **più**… negli esercizi si può ovviamente scegliere il verso che ci viene più comodo al fine di risolvere il problema che ci viene posto…

Accelerazione di Gravità g



Da Newton in poi sappiamo che l'accelerazione costante in gioco nel moto di caduta libera è **l'accelerazione di gravità g**, che – in assenza di resistenza dell'aria – è effettivamente indipendente dalle caratteristiche dell'oggetto che cade (massa, densità, forma, etc.). Al livello del mare **$g = 9.8\ m/s^2$** (valore misurato per la prima volta nel 1640 da G.Riccioli).

Per gli oggetti in **caduta libera** possiamo dunque utilizzare le **equazioni del moto uniformemente accelerato** tenendo conto che:

1) la direzione del moto è collocata stavolta lungo l'asse verticale y

2) se il verso positivo dell'asse y è quello in figura, l'accelerazione in caduta libera risulta *negativa* (a causa del suo verso non del suo modulo, che è ovviamente positivo) cosicchè possiamo riscrivere le equazioni I, II e III del moto uniformemente accelerato nella seguente forma:

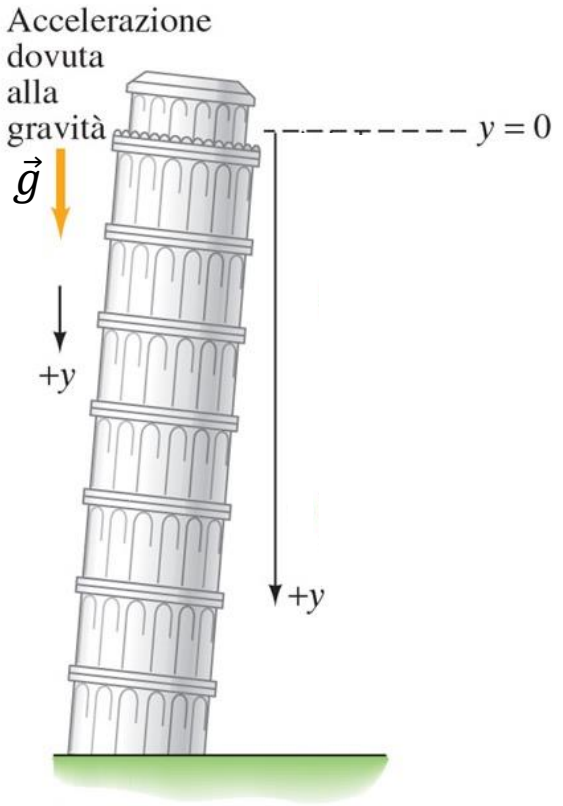
asse y

Equazioni del moto di oggetti in caduta libera ($a = +g = cost$)

$$I)\ v = v_0 + gt \qquad II)\ y - y_0 = v_0 t + \frac{1}{2} g t^2 \qquad III)\ v^2 = v_0^2 + 2g(y - y_0)$$

Dalla seconda equazione si vede subito quello che già ai suoi tempi aveva dimostrato anche Galileo, utilizzando per primo lo strumento matematico, e cioè che **la distanza percorsa da un oggetto che cade ($y - y_0$) risulta *proporzionale al quadrato del tempo trascorso***.

Vediamone un esempio...



asse y

Fisica

Copyright 2006 Casa Editrice Ambrosiana

Esempio 1: Caduta da una torre

Supponiamo che una palla sia lasciata cadere (v_0=0) da una torre alta 70.0 m. Di quanto sarà caduta dopo 1.00, 2.00 e 3.00 secondi?

Assumiamo come verso positivo dell'asse y quello rivolto verso il basso (così a = g = +9.80 m/s^2). Poniamo v_0=0 e y_0=0 e utilizziamo l'**equazione II** del moto in caduta libera:

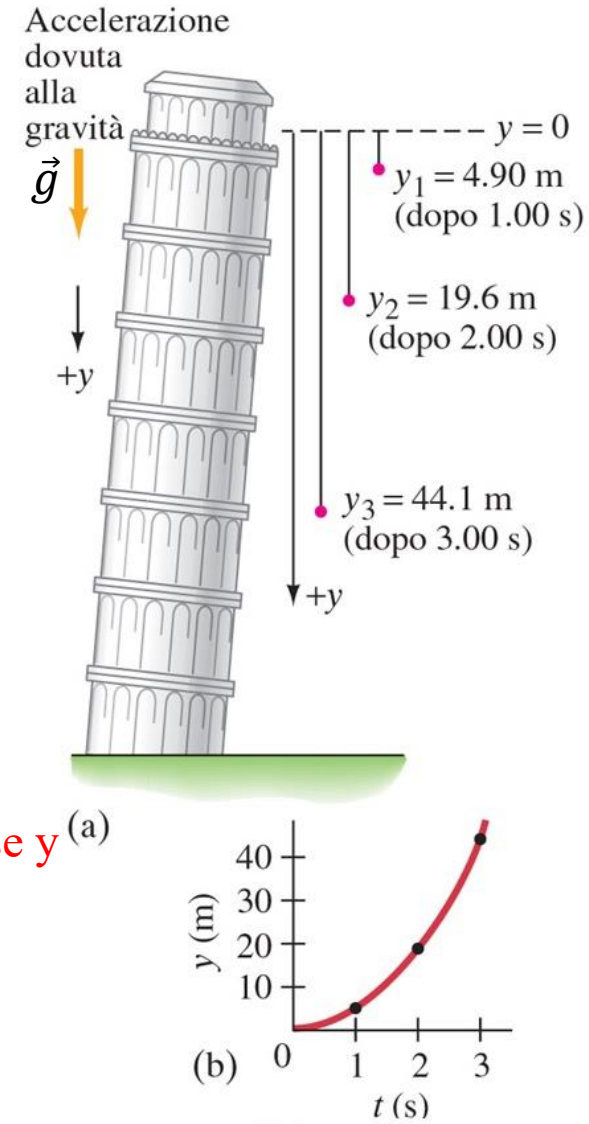
$$y - y_0 = v_0 t + \frac{1}{2} g t^2 \quad \square \quad y = \frac{1}{2} g t^2$$

Avremo dunque, nei tre casi richiesti:

$$y_1 = \frac{1}{2} g t_1^{\,2} = \frac{1}{2}(9.80 m/s^2)(1.00 s)^2 = 4.90 m$$

$$y_2 = \frac{1}{2} g t_2^{\,2} = \frac{1}{2}(9.80 m/s^2)(2.00 s)^2 = 19.6 m$$

$$y_3 = \frac{1}{2} g t_3^{\,2} = \frac{1}{2}(9.80 m/s^2)(3.00 s)^2 = 44.1 m$$



Fisica

Copyright 2006 Casa Editrice Ambrosiana

Esempio 1: Caduta da una torre

Supponiamo che una palla sia lasciata cadere (v_0=0) da una torre alta 70.0 m. Di quanto sarà caduta dopo 1.00, 2.00 e 3.00 secondi?

Assumiamo come verso positivo dell'asse y quello rivolto verso il basso (così a = g = +9.80 m/s^2). Poniamo v_0=0 e y_0=0 e utilizziamo l'**equazione II** del moto in caduta libera:

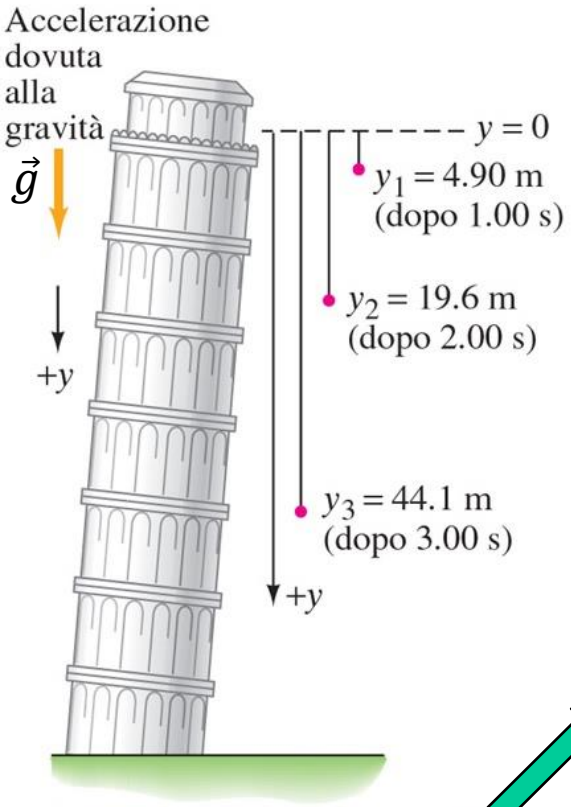
$$y - y_0 = v_0 t + \frac{1}{2} g t^2 \quad \square \quad y = \frac{1}{2} g t^2$$

Avremo dunque, nei tre casi richiesti:

$$y_1 = \frac{1}{2} g t_1^2 = \frac{1}{2}(9.80 m/s^2)(1.00 s)^2 = 4.90 m$$

$$y_2 = \frac{1}{2} g t_2^2 = \frac{1}{2}(9.80 m/s^2)(2.00 s)^2 = 19.6 m$$

$$y_3 = \frac{1}{2} g t_3^2 = \frac{1}{2}(9.80 m/s^2)(3.00 s)^2 = 44.1 m$$



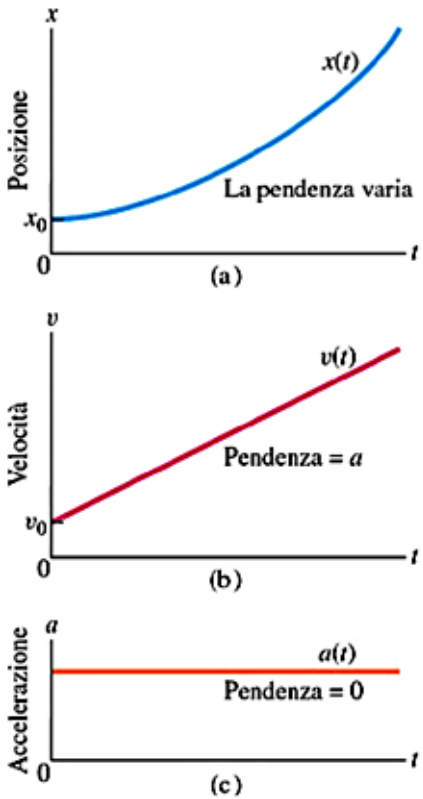
Fisica
Copyright 2006 Casa Editrice Ambrosiana

Esempio 1: Caduta da una torre

Supponiamo che una palla sia lasciata cadere (v_0=0) da una torre alta 70.0 m. Di quanto sarà caduta dopo 1.00, 2.00 e 3.00 secondi?

Assumiamo come verso positivo dell'asse y quello rivolto verso il basso (così a = g = +9.80 m/s^2). Poniamo v_0=0 e y_0=0 e utilizziamo l'**equazione II** del moto in caduta libera:

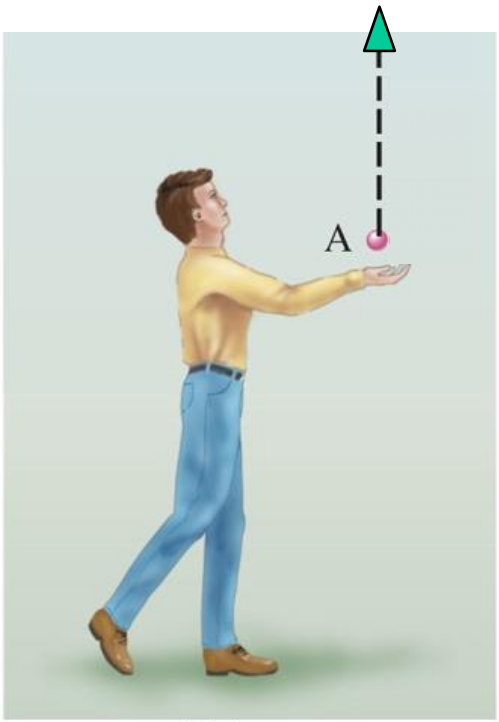
$$y - y_0 = v_0 t + \frac{1}{2} g t^2 \quad \square \quad y = \frac{1}{2} g t^2$$



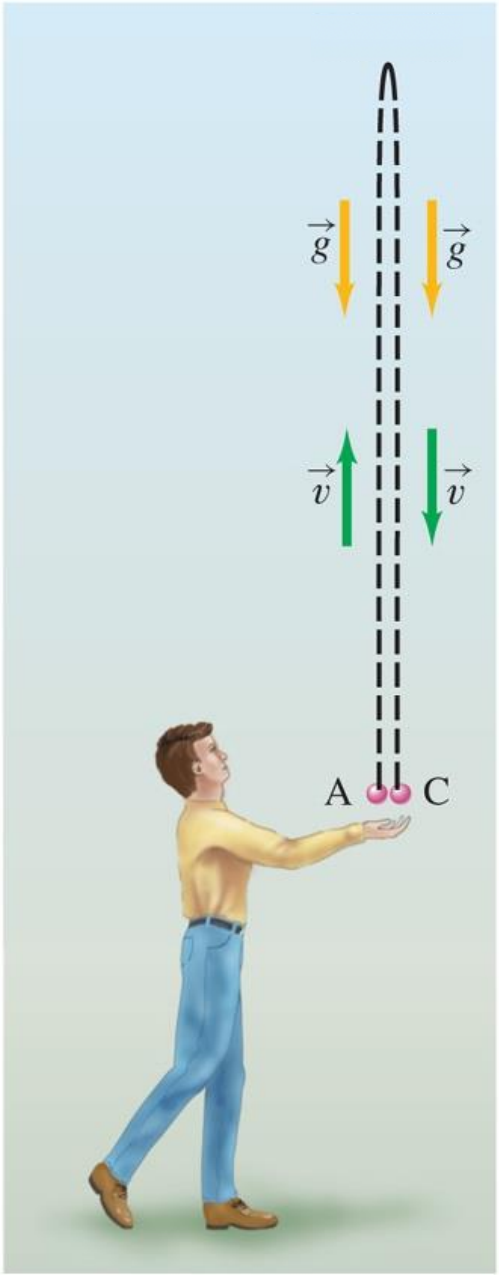
Quesito. Che valori di y avremmo trovato se invece di essere lasciata cadere (v_0=0) la palla fosse stata lanciata verso il basso con una **velocità iniziale** di v_0=3.0 m/s ? E quali sarebbero stati i **valori finali** della velocità nei tre casi richiesti? Provateci da soli….

Esempio 2:
Immaginiamo adesso di **lanciare un oggetto verso l'alto** e di attendere che ci ricada in mano…

Sfatiamo due diffusi preconcetti
(1) E' vero che l'accelerazione e la velocità hanno sempre lo stesso verso? (2) E' vero che l'oggetto lanciato verso l'alto ha accelerazione zero nel punto più elevato della sua traiettoria verticale?



Fisica
Copyright 2006 Casa Editrice Ambrosiana



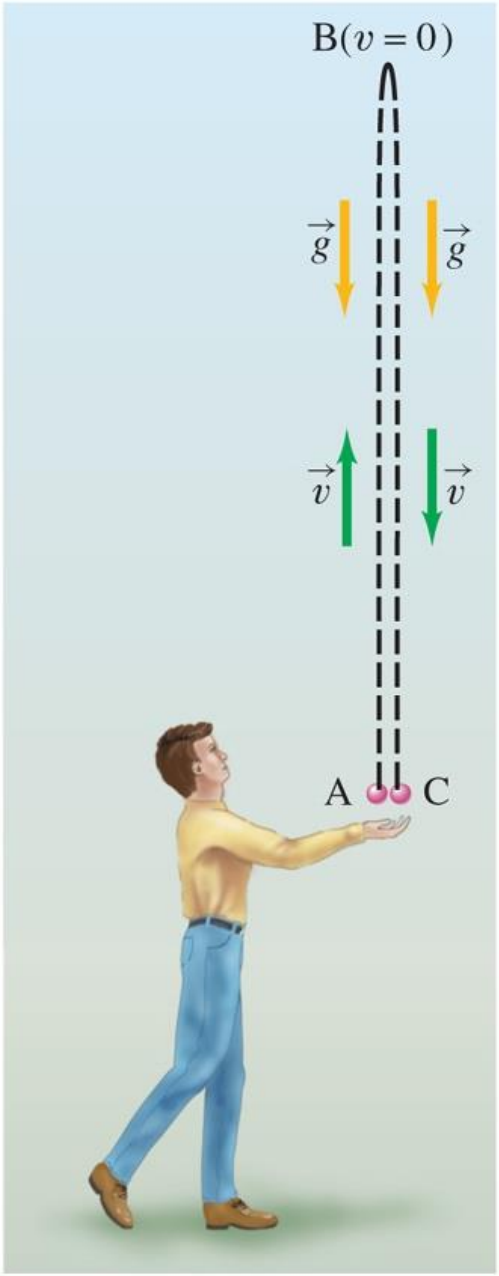
Fisica

Copyright 2006 Casa Editrice Ambrosiana

Esempio 2:
Immaginiamo adesso di **lanciare un oggetto verso l'alto** e di attendere che ci ricada in mano…

Sfatiamo due diffusi preconcetti
(1) **E' vero che l'accelerazione e la velocità hanno sempre lo stesso verso?** (2) E' vero che l'oggetto lanciato verso l'alto ha accelerazione zero nel punto più elevato della sua traiettoria verticale?

(1) **Sappiamo già che non è vero** dagli esempi precedenti sulle auto che decelerano. In questo caso la situazione è quella mostrata in figura. **Ricordiamoci sempre che l'accelerazione non è l'effetto della variazione di velocità bensì la sua causa** (in quanto sempre espressione di una forza, in questo caso quella gravitazionale).



Fisica

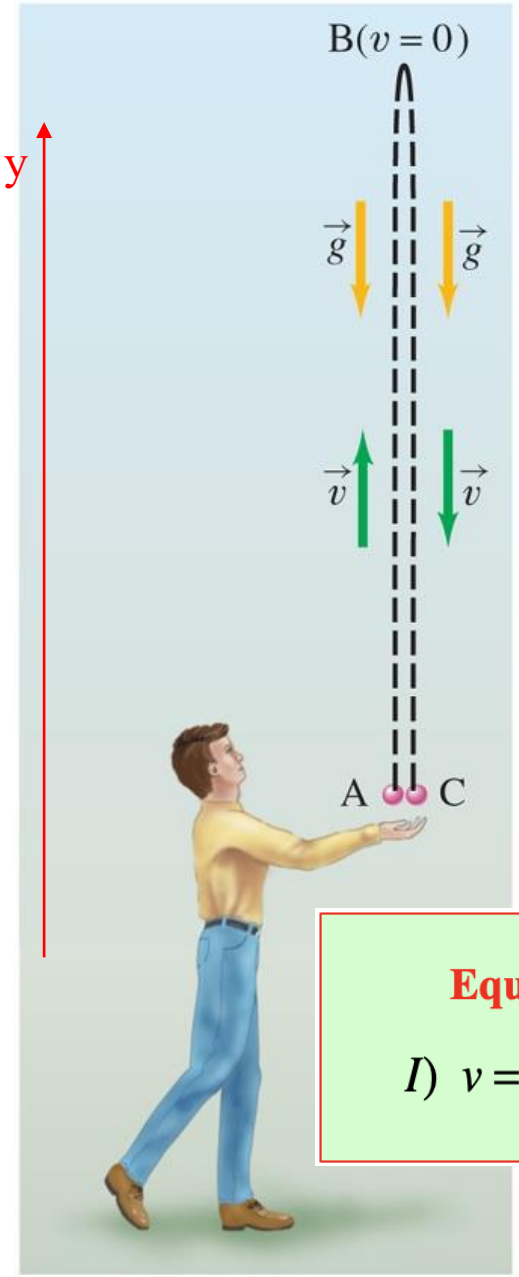
Copyright 2006 Casa Editrice Ambrosiana

Esempio 2:
Immaginiamo adesso di **lanciare un oggetto verso l'alto** e di attendere che ci ricada in mano…

Sfatiamo due diffusi preconcetti
(1) E' vero che l'accelerazione e la velocità hanno sempre lo stesso verso? (2) **E' vero che l'oggetto lanciato verso l'alto ha accelerazione zero nel punto più elevato della sua traiettoria verticale?**

(1) **Sappiamo già che non è vero** dagli esempi precedenti sulle auto che decelerano. In questo caso la situazione è quella mostrata in figura. **Ricordiamoci sempre che l'accelerazione non è l'effetto della variazione di velocità bensì la sua causa** (in quanto sempre espressione di una forza, in questo caso quella gravitazionale).

(2) Per quanto appena detto **non è vero neanche questo**: è la velocità che diventa nulla nel punto più elevato (il punto B in figura). **L'accelerazione invece** (essendo sempre espressione della forza gravitazionale) **mantiene sempre lo stesso modulo** pari a g, oltre che lo stesso verso. Del resto se nel punto B, per assurdo, si avesse $a = 0$, ciò implicherebbe che l'oggetto lanciato **rimarrebbe sospeso in aria** in quel punto, non potendosi più modificare la velocità – che in quel punto, come già detto, è nulla.



Fisica

Copyright 2006 Casa Editrice Ambrosiana

Esempio 3:

Consideriamo adesso una palla lanciata verso l'alto con una velocità iniziale v_0=15.0m/s e calcoliamo: **(1) quanto in alto arriva la palla;** (2) quanto a lungo rimane in aria la palla prima di ricadere in mano al lanciatore (punto C).

Equazioni del moto di oggetti in caduta libera ($a = -g = \text{cost}$)

$$I)\ v = v_0 - gt \qquad II)\ y - y_0 = v_0 t - \frac{1}{2} g t^2 \qquad III)\ v^2 = {v_0}^2 - 2g(y - y_0)$$