LA MASSA

Pietro Santorelli

Dipartimento di Fisica
Università degli Studi di Napoli Federico II

Città della Scienza, Napoli, 6 Marzo 2013

Sommario

Sommario

1. Le Interazioni Fondamentali ed il Modello Standard

Sommario

1. Le Interazioni Fondamentali ed il Modello Standard
2. La Massa Inerziale

Sommario

Sommario

Sommario

1. Le Interazioni Fondamentali ed il Modello Standard
2. La Massa Inerziale
3. La Massa Gravitazionale
4. La Relatività e la Massa Relativistica
5. Simmetrie e Generazione della Massa

Il Modello Standard

- Nasce nel 1961 la teoria unificata tra l'**interazione debole** e quella **elettromagnetica**:

LA TEORIA ELETTRODEBOLE

Il Modello Standard

- Nasce nel 1961 la teoria unificata tra l'**interazione debole** e quella **elettromagnetica**:

LA TEORIA ELETTRODEBOLE

- All'inizio degli anni 70 viene completata la teoria delle **interazioni forti**:

LA CROMODINAMICA QUANTISTICA

Il Modello Standard

- Nasce nel 1961 la teoria unificata tra l'**interazione debole** e quella **elettromagnetica**:

LA TEORIA ELETTRODEBOLE

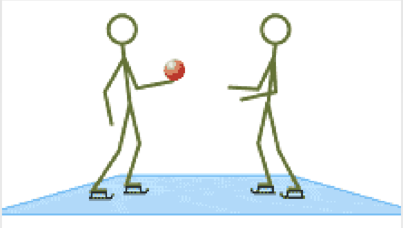
- All'inizio degli anni 70 viene completata la teoria delle **interazioni forti**:

LA CROMODINAMICA QUANTISTICA

- Le due teorie insieme costituiscono quello che chiamiamo

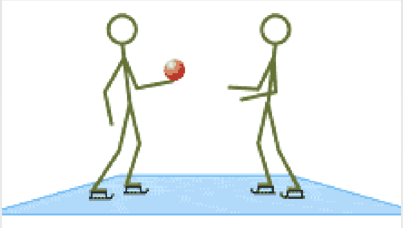
Interazioni Fondamentali

Interazione	Intensità	Raggio d'azione	Mediatore/i
Gravitazionale	10^{-38}	infinito	gravitone (?)
Debole	10^{-13}	$10^{-18}m$	W^+, W^-, W°
Elettromagnetica	10^{-3}	infinito	fotone
Forte	1	$10^{-15}m$	gluoni



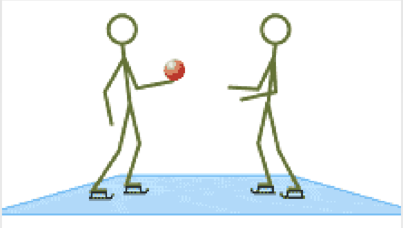
Interazioni Fondamentali

Interazione	Intensità	Raggio d'azione	Mediatore/i
Gravitazionale	10^{-38}	infinito	gravitone (?)
Debole	10^{-13}	$10^{-18} m$	W^+, W^-, W°
Elettromagnetica	10^{-3}	infinito	fotone
Forte	1	$10^{-15} m$	gluoni

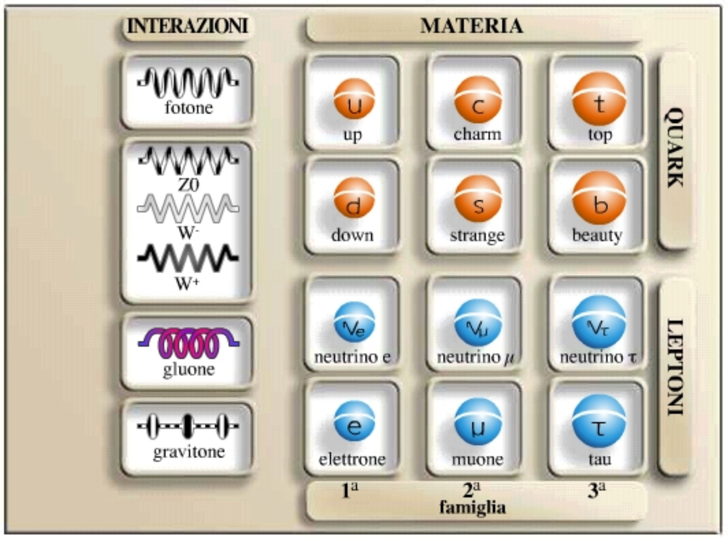


Interazioni Fondamentali

Interazione	Intensità	Raggio d'azione	Mediatore/i
Gravitazionale	10^{-38}	infinito	gravitone (?)
Debole	10^{-13}	$10^{-18}m$	W^+, W^-, W°
Elettromagnetica	10^{-3}	infinito	fotone
Forte	1	$10^{-15}m$	gluoni



Interazioni Fondamentali: Particelle Elementari e Mediatori



Simmetrie e Interazioni Fondamentali

Simmetrie e Interazioni Fondamentali

Date le simmetrie di una interazione

siamo in grado di costruire la TEORIA che descrive quella interazione.

Simmetrie e Interazioni Fondamentali

Date le simmetrie di una interazione

siamo in grado di costruire la TEORIA che descrive quella interazione.

Una simmetria è un cambiamento del nostro punto di vista che non modifica i risultati dei possibili esperimenti. (S. Weinberg)

Simmetrie e Interazioni Fondamentali

Date le simmetrie di una interazione

siamo in grado di costruire la TEORIA che descrive quella interazione.

> Una simmetria è un cambiamento del nostro punto di vista che non modifica i risultati dei possibili esperimenti. (S. Weinberg)

Un esempio

- Le rotazioni e l'intensità della forza elettrostatica agente su due cariche puntiformi

Simmetrie e Interazioni Fondamentali

Date le simmetrie di una interazione → siamo in grado di costruire la TEORIA che descrive quella interazione.

> Una simmetria è un cambiamento del nostro punto di vista che non modifica i risultati dei possibili esperimenti. (S. Weinberg)

Un esempio

- Le rotazioni e l'intensità della forza elettrostatica agente su due cariche puntiformi

MA

Simmetrie e Interazioni Fondamentali

Date le simmetrie di una interazione

siamo in grado di costruire la TEORIA che descrive quella interazione.

> Una simmetria è un cambiamento del nostro punto di vista che non modifica i risultati dei possibili esperimenti. (S. Weinberg)

Un esempio

- Le rotazioni e l'intensità della forza elettrostatica agente su due cariche puntiformi

MA

> Particelle e mediatori delle interazioni devono avere **MASSA NULLA**

Interazione	Raggio d'azione	Mediatore/i
Debole	$10^{-18} m$	W^+, W^-, W°
Elettromagnetica	infinito	fotone

Interazione	Raggio d'azione	Mediatore/i
Debole	$10^{-18} m$	W^{+}, W^{-}, W°
Elettromagnetica	infinito	fotone

Un po' di storia

Il vocabolo

Un po' di storia

Il vocabolo

- *massa*: mucchietto di pasta, insieme o aggregato di corpi;

Un po' di storia

Il vocabolo

- *massa*: mucchietto di pasta, insieme o aggregato di corpi;
- $\mu\alpha\zeta\alpha$: focaccia d'orzo;

Un po' di storia

Il vocabolo

- *massa*: mucchietto di pasta, insieme o aggregato di corpi;
- $\mu\alpha\zeta\alpha$: focaccia d'orzo;
- *mazza*: pane azzimo.

Un po' di storia

Il vocabolo

- *massa*: mucchietto di pasta, insieme o aggregato di corpi;
- $\mu\alpha\zeta\alpha$: focaccia d'orzo;
- *mazza*: pane azzimo.

Il concetto: massa ("corpus") $\leftrightarrow$ *quantitas materiae*

Un po' di storia

Il vocabolo

- *massa*: mucchietto di pasta, insieme o aggregato di corpi;
- $\mu\alpha\zeta\alpha$: focaccia d'orzo;
- *mazza*: pane azzimo.

Il concetto: massa ("corpus") $\leftrightarrow$ *quantitas materiae*

- Metà del 1300 usata in modo "tecnico" (Alberto di Sassonia, 1316-1390);

Un po' di storia

Il vocabolo

- *massa*: mucchietto di pasta, insieme o aggregato di corpi;
- $\mu\alpha\zeta\alpha$: focaccia d'orzo;
- *mazza*: pane azzimo.

Il concetto: massa ("corpus") $\leftrightarrow$ *quantitas materiae*

- Metà del 1300 usata in modo "tecnico" (Alberto di Sassonia, 1316-1390);
- Fine 1500 e metà del 1600 Keplero (1571-1630), Cartesio (1596-1650), Galilei (1564-1642), Huygens (1629-1695) etc.

Un po' di storia

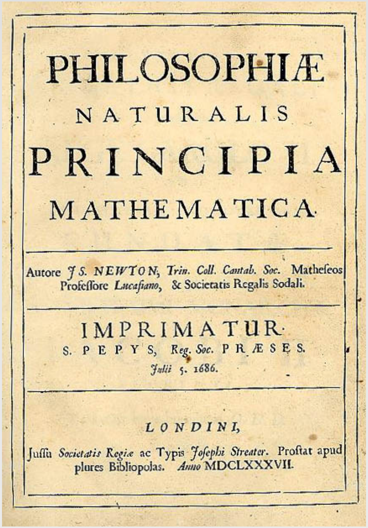
Il vocabolo

- *massa*: mucchietto di pasta, insieme o aggregato di corpi;
- $\mu\alpha\zeta\alpha$: focaccia d'orzo;
- *mazza*: pane azzimo.

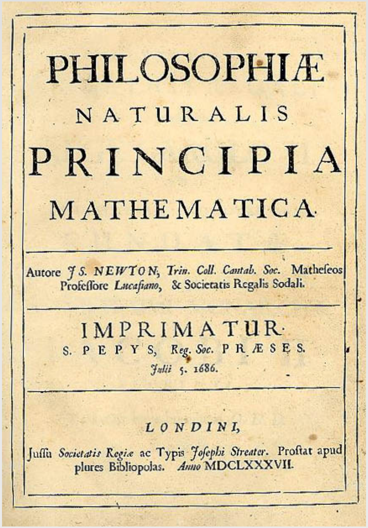
Il concetto: massa ("corpus") $\leftrightarrow$ *quantitas materiae*

- Metà del 1300 usata in modo "tecnico" (Alberto di Sassonia, 1316-1390);
- Fine 1500 e metà del 1600 Keplero (1571-1630), Cartesio (1596-1650), Galilei (1564-1642), Huygens (1629-1695) etc.
- 1687 Newton in "Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica"

Newton


PHILOSOPHIÆ
NATURALIS
PRINCIPIA
MATHEMATICA
Autore J S. NEWTON, Trin. Coll. Cantab. Soc. Matheseos Professore Lucasiano, & Societatis Regalis Sodali.
IMPRIMATUR
S. PEPYS, Reg. Soc. PRÆSES.
Julii 5. 1686.
LONDINI,
Jussu Societatis Regiæ ac Typis Josephi Streater. Prostat apud plures Bibliopolas. Anno MDCLXXXVII.

Newton


PHILOSOPHIÆ
NATURALIS
PRINCIPIA
MATHEMATICA.

Autore J. S. NEWTON, Trin. Coll. Cantab. Soc. Matheſeos Profeſſore Lucaſiano, & Societatis Regalis Sodali.

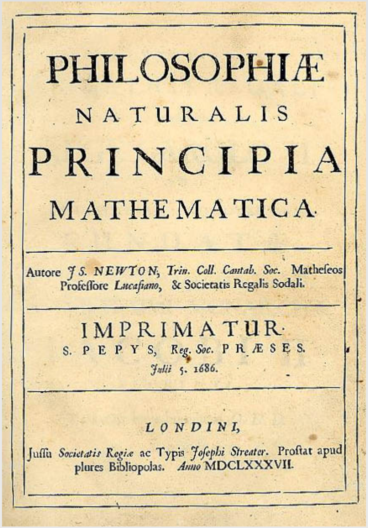
IMPRIMATUR.
S. PEPYS, Reg. Soc. PRÆSES.
Julii 5. 1686.

LONDINI,
Juſſu Societatis Regiæ ac Typis Joſephi Streater. Proſtat apud plures Bibliopolas. Anno MDCLXXXVII.

Def. 1: La quantità di materia m di un corpo è la misura della stessa derivante congiuntamente dalla sua densità ρ e dal suo volume V

$$m = \rho V$$

Newton



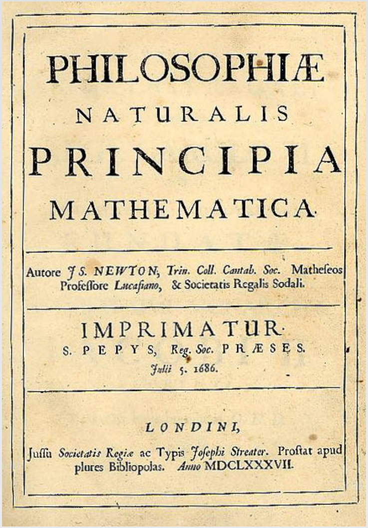
Def. 1: La quantità di materia m di un corpo è la misura della stessa derivante congiuntamente dalla sua densità ρ e dal suo volume V

$$m = \rho V$$

Def. 2: La quantità di moto $\vec{p}$ di un corpo è la misura della stessa derivante congiuntamente dalla sua quantità di materia, m, e dalla sua velocità $\vec{v}$

$$\vec{p} = m\vec{v}$$

Newton


PHILOSOPHIÆ
NATURALIS
PRINCIPIA
MATHEMATICA.

Autore J. S. NEWTON, Trin. Coll. Cantab. Soc. Matheseos Professore Lucasiano, & Societatis Regalis Sodali.

IMPRIMATUR.
S. PEPYS, Reg. Soc. PRÆSES.
Julii 5. 1686.

LONDINI,
Jussu Societatis Regiæ ac Typis Josephi Streater. Prostat apud plures Bibliopolas. Anno MDCLXXXVII.

Def. 1: La quantità di materia m di un corpo è la misura della stessa derivante congiuntamente dalla sua densità ρ e dal suo volume V

$$m = \rho V$$

Def. 2: La quantità di moto $\vec{p}$ di un corpo è la misura della stessa derivante congiuntamente dalla sua quantità di materia, m, e dalla sua velocità $\vec{v}$

$$\vec{p} = m\vec{v}$$

Def. 3: La forza insita ("vis inertiae") o innata nella materia è un potere di resistere per il quale ogni corpo, per quanto in esso ne risiede, tende a perseverare nel suo stato di quiete o di moto rettilineo uniforme.

La Massa Inerziale

- Un punto materiale (un corpo) sufficientemente lontano da tutti gli altri corpi si muove di moto rettilineo uniforme o è in quiete

La Massa Inerziale

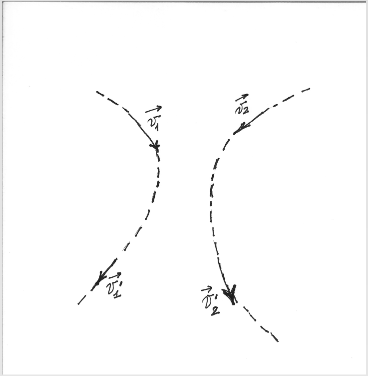
- Un punto materiale (un corpo) sufficientemente lontano da tutti gli altri corpi si muove di moto rettilineo uniforme o è in quiete
- Quel sistema di riferimento nel quale ciò avviene si dice Sistema di Riferimento Inerziale

La Massa Inerziale

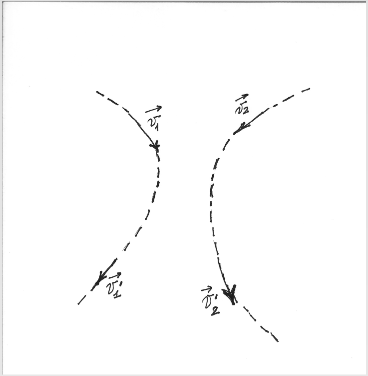
- Un punto materiale (un corpo) sufficientemente lontano da tutti gli altri corpi si muove di moto rettilineo uniforme o è in quiete
- Quel sistema di riferimento nel quale ciò avviene si dice Sistema di Riferimento Inerziale

La Massa Inerziale

La Massa Inerziale

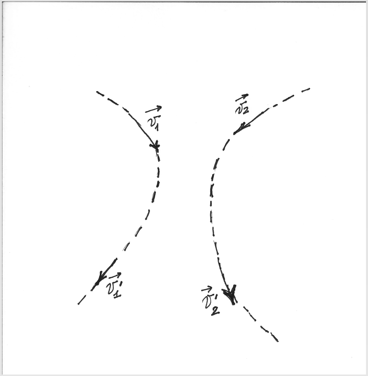


La Massa Inerziale



$$\Delta \vec{v}_1 = -k_{12} \Delta \vec{v}_2 \quad \Rightarrow \quad \frac{|\Delta \vec{v}_1|}{|\Delta \vec{v}_2|} = k_{12}$$

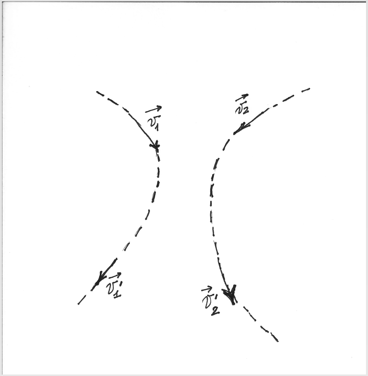
La Massa Inerziale



$$\Delta\vec{v}_1 = -k_{12}\Delta\vec{v}_2 \quad \Rightarrow \quad \frac{|\Delta\vec{v}_1|}{|\Delta\vec{v}_2|} = k_{12}$$

$$\Delta\vec{v}_2 = -k_{21}\Delta\vec{v}_1 \quad \Rightarrow \quad \frac{|\Delta\vec{v}_2|}{|\Delta\vec{v}_1|} = k_{21}$$

La Massa Inerziale

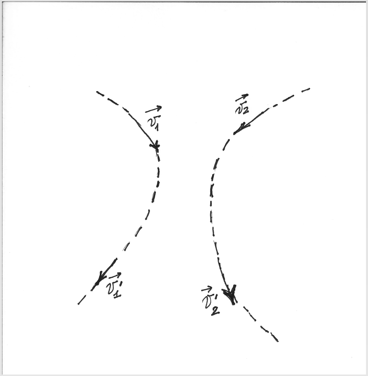


$$\Delta \vec{v}_1 = -k_{12} \Delta \vec{v}_2 \quad \Rightarrow \quad \frac{|\Delta \vec{v}_1|}{|\Delta \vec{v}_2|} = k_{12}$$

$$\Delta \vec{v}_2 = -k_{21} \Delta \vec{v}_1 \quad \Rightarrow \quad \frac{|\Delta \vec{v}_2|}{|\Delta \vec{v}_1|} = k_{21}$$

$$k_{21} k_{12} = 1$$

La Massa Inerziale



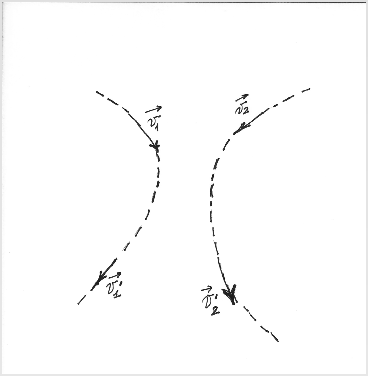
$$\Delta\vec{v}_1 = -k_{12}\Delta\vec{v}_2 \quad \Rightarrow \quad \frac{|\Delta\vec{v}_1|}{|\Delta\vec{v}_2|} = k_{12}$$

$$\Delta\vec{v}_2 = -k_{21}\Delta\vec{v}_1 \quad \Rightarrow \quad \frac{|\Delta\vec{v}_2|}{|\Delta\vec{v}_1|} = k_{21}$$

$$k_{21}k_{12} = 1$$

$$\text{Particelle 1 e 3} \qquad \frac{|\Delta\vec{v}_1|}{|\Delta\vec{v}_3|} = k_{13}$$

La Massa Inerziale



$$\Delta \vec{v}_1 = -k_{12} \Delta \vec{v}_2 \quad \Rightarrow \quad \frac{|\Delta \vec{v}_1|}{|\Delta \vec{v}_2|} = k_{12}$$

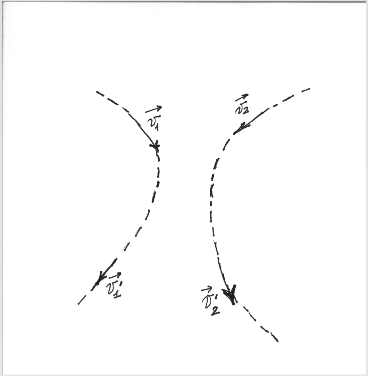
$$\Delta \vec{v}_2 = -k_{21} \Delta \vec{v}_1 \quad \Rightarrow \quad \frac{|\Delta \vec{v}_2|}{|\Delta \vec{v}_1|} = k_{21}$$

$$k_{21} k_{12} = 1$$

$$\text{Particelle 1 e 3} \quad \frac{|\Delta \vec{v}_1|}{|\Delta \vec{v}_3|} = k_{13}$$

$$\text{Particelle 1 e 4} \quad \frac{|\Delta \vec{v}_1|}{|\Delta \vec{v}_4|} = k_{14}$$

La Massa Inerziale



Particelle 2 e 4?

$$\Delta\vec{v}_1 = -k_{12}\Delta\vec{v}_2 \quad \Rightarrow \quad \frac{|\Delta\vec{v}_1|}{|\Delta\vec{v}_2|} = k_{12}$$

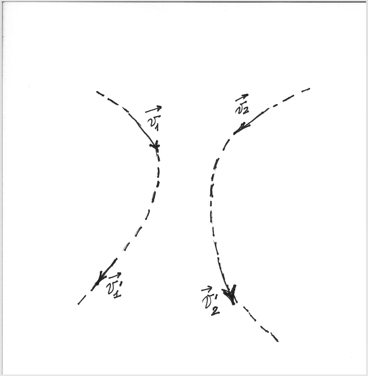
$$\Delta\vec{v}_2 = -k_{21}\Delta\vec{v}_1 \quad \Rightarrow \quad \frac{|\Delta\vec{v}_2|}{|\Delta\vec{v}_1|} = k_{21}$$

$$k_{21}k_{12} = 1$$

Particelle 1 e 3 $\quad \dfrac{|\Delta\vec{v}_1|}{|\Delta\vec{v}_3|} = k_{13}$

Particelle 1 e 4 $\quad \dfrac{|\Delta\vec{v}_1|}{|\Delta\vec{v}_4|} = k_{14}$

La Massa Inerziale



$$\Delta\vec{v}_1 = -k_{12}\Delta\vec{v}_2 \quad \Rightarrow \quad \frac{|\Delta\vec{v}_1|}{|\Delta\vec{v}_2|} = k_{12}$$

$$\Delta\vec{v}_2 = -k_{21}\Delta\vec{v}_1 \quad \Rightarrow \quad \frac{|\Delta\vec{v}_2|}{|\Delta\vec{v}_1|} = k_{21}$$

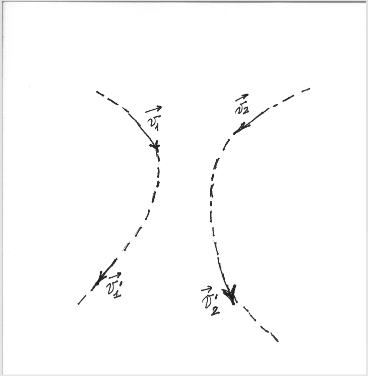
$$k_{21}k_{12} = 1$$

Particelle 1 e 3 $\quad \dfrac{|\Delta\vec{v}_1|}{|\Delta\vec{v}_3|} = k_{13}$

Particelle 1 e 4 $\quad \dfrac{|\Delta\vec{v}_1|}{|\Delta\vec{v}_4|} = k_{14}$

Particelle 2 e 4? $\quad \dfrac{|\Delta\vec{v}_2|}{|\Delta\vec{v}_4|} = k_{24}$

La Massa Inerziale



$$\Delta\vec{v}_1 = -k_{12}\Delta\vec{v}_2 \quad \Rightarrow \quad \frac{|\Delta\vec{v}_1|}{|\Delta\vec{v}_2|} = k_{12}$$

$$\Delta\vec{v}_2 = -k_{21}\Delta\vec{v}_1 \quad \Rightarrow \quad \frac{|\Delta\vec{v}_2|}{|\Delta\vec{v}_1|} = k_{21}$$

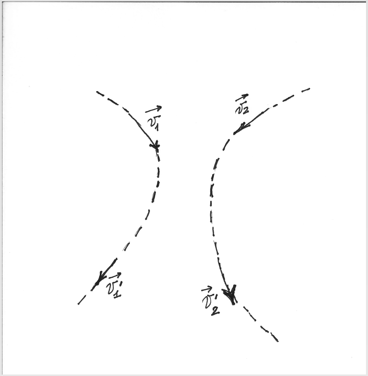
$$k_{21}k_{12} = 1$$

Particelle 1 e 3 $\quad \dfrac{|\Delta\vec{v}_1|}{|\Delta\vec{v}_3|} = k_{13}$

Particelle 1 e 4 $\quad \dfrac{|\Delta\vec{v}_1|}{|\Delta\vec{v}_4|} = k_{14}$

Particelle 2 e 4? $\quad \dfrac{|\Delta\vec{v}_2|}{|\Delta\vec{v}_4|} = k_{24} = \dfrac{|\Delta\vec{v}_2|}{|\Delta\vec{v}_1|}\dfrac{|\Delta\vec{v}_1|}{|\Delta\vec{v}_4|}$

La Massa Inerziale



$$\Delta\vec{v}_1 = -k_{12}\Delta\vec{v}_2 \quad \Rightarrow \quad \frac{|\Delta\vec{v}_1|}{|\Delta\vec{v}_2|} = k_{12}$$

$$\Delta\vec{v}_2 = -k_{21}\Delta\vec{v}_1 \quad \Rightarrow \quad \frac{|\Delta\vec{v}_2|}{|\Delta\vec{v}_1|} = k_{21}$$

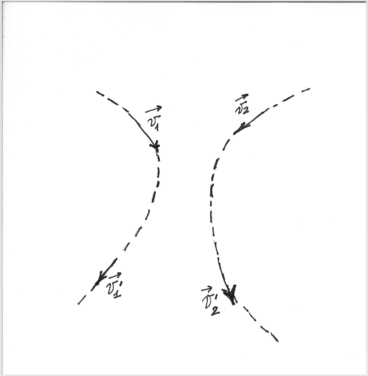
$$k_{21}k_{12} = 1$$

Particelle 1 e 3 $\quad \dfrac{|\Delta\vec{v}_1|}{|\Delta\vec{v}_3|} = k_{13}$

Particelle 1 e 4 $\quad \dfrac{|\Delta\vec{v}_1|}{|\Delta\vec{v}_4|} = k_{14}$

Particelle 2 e 4? $\quad \dfrac{|\Delta\vec{v}_2|}{|\Delta\vec{v}_4|} = k_{24} = \dfrac{|\Delta\vec{v}_2|}{|\Delta\vec{v}_1|}\dfrac{|\Delta\vec{v}_1|}{|\Delta\vec{v}_4|} = k_{21}k_{14}$

La Massa Inerziale



$$\Delta\vec{v}_1 = -k_{12}\Delta\vec{v}_2 \quad \Rightarrow \quad \frac{|\Delta\vec{v}_1|}{|\Delta\vec{v}_2|} = k_{12}$$

$$\Delta\vec{v}_2 = -k_{21}\Delta\vec{v}_1 \quad \Rightarrow \quad \frac{|\Delta\vec{v}_2|}{|\Delta\vec{v}_1|} = k_{21}$$

$$k_{21}k_{12} = 1$$

Particelle 1 e 3 $\quad \dfrac{|\Delta\vec{v}_1|}{|\Delta\vec{v}_3|} = k_{13}$

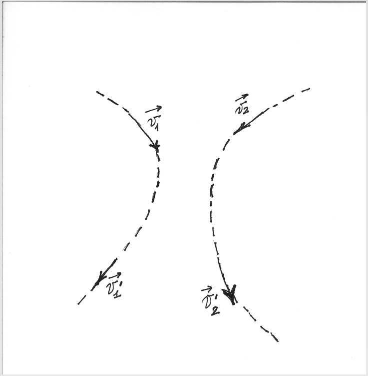
Particelle 1 e 4 $\quad \dfrac{|\Delta\vec{v}_1|}{|\Delta\vec{v}_4|} = k_{14}$

Particelle 2 e 4? $\quad \dfrac{|\Delta\vec{v}_2|}{|\Delta\vec{v}_4|} = k_{24} = \dfrac{|\Delta\vec{v}_2|}{|\Delta\vec{v}_1|}\dfrac{|\Delta\vec{v}_1|}{|\Delta\vec{v}_4|} = k_{21}k_{14} = \dfrac{m_1}{m_2}\dfrac{m_4}{m_1}$

La Massa Inerziale della particella “i”

$$m_i = \frac{m_1}{k_{i1}}$$

La Massa Inerziale



$$\Delta\vec{v}_1 = -k_{12}\Delta\vec{v}_2 \quad \Rightarrow \quad \frac{|\Delta\vec{v}_1|}{|\Delta\vec{v}_2|} = k_{12}$$

$$\Delta\vec{v}_2 = -k_{21}\Delta\vec{v}_1 \quad \Rightarrow \quad \frac{|\Delta\vec{v}_2|}{|\Delta\vec{v}_1|} = k_{21}$$

$$k_{21}k_{12} = 1$$

Particelle 1 e 3 $\quad \dfrac{|\Delta\vec{v}_1|}{|\Delta\vec{v}_3|} = k_{13}$

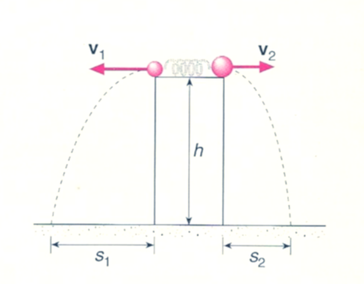
Particelle 1 e 4 $\quad \dfrac{|\Delta\vec{v}_1|}{|\Delta\vec{v}_4|} = k_{14}$

Particelle 2 e 4? $\quad \dfrac{|\Delta\vec{v}_2|}{|\Delta\vec{v}_4|} = k_{24} = \dfrac{|\Delta\vec{v}_2|}{|\Delta\vec{v}_1|}\dfrac{|\Delta\vec{v}_1|}{|\Delta\vec{v}_4|} = k_{21}k_{14} = \dfrac{m_1}{m_2}\dfrac{m_4}{m_1}$

La Massa Inerziale della particella “i”

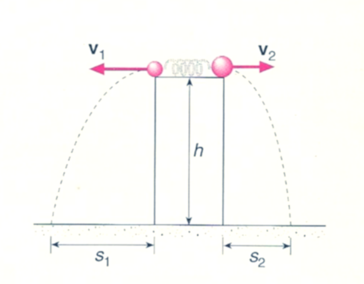
$$m_i = \frac{m_1}{k_{i1}} \qquad\qquad m_2 = \frac{m_1}{k_{21}} = m_1\frac{|\Delta\vec{v}_1|}{|\Delta\vec{v}_2|}$$

La Massa Inerziale



da S. Rosati, Fisica Generale, Casa Editrice Ambrosiana.

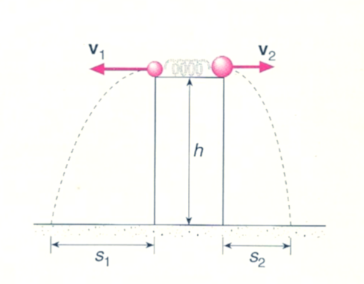
La Massa Inerziale



da S. Rosati, Fisica Generale, Casa Editrice Ambrosiana.

$$\begin{cases} s_i = v_i\, t \\ h = \dfrac{1}{2} g\, t^2 \end{cases}$$

La Massa Inerziale

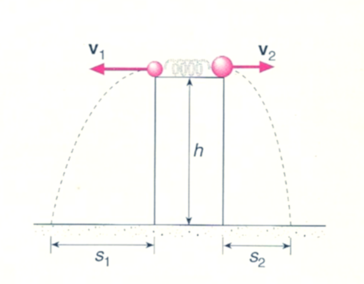


da S. Rosati, Fisica Generale, Casa Editrice Ambrosiana.

$$\begin{cases} s_i = v_i\, t \\ h = \frac{1}{2} g\, t^2 \end{cases}$$

$$\begin{cases} v_1 = s_1 \sqrt{\frac{g}{2h}} \\ v_2 = s_2 \sqrt{\frac{g}{2h}} \end{cases}$$

La Massa Inerziale



da S. Rosati, Fisica Generale, Casa Editrice Ambrosiana.

$$\begin{cases} s_i = v_i\, t \\ h = \dfrac{1}{2} g\, t^2 \end{cases}$$

$$\begin{cases} v_1 = s_1 \sqrt{\dfrac{g}{2h}} \\ v_2 = s_2 \sqrt{\dfrac{g}{2h}} \end{cases}$$

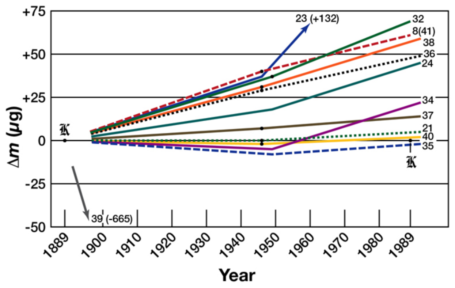
$$\frac{\Delta v_1}{\Delta v_2} = \frac{s_1}{s_2} = \color{red}{k_{12}} = \frac{m_2}{m_1}$$

L'unità di Massa

- Il kilogrammo è la massa di un cilindro di Platino-Iridio di 39 mm di altezza e 39 mm di diametro costruito nel 1889 e depositato presso Ufficio Internazionale dei Pesi e delle Misure di Sèvres (BIPM).

L'unità di Massa

- Il kilogrammo è la massa di un cilindro di Platino-Iridio di 39 mm di altezza e 39 mm di diametro costruito nel 1889 e depositato presso Ufficio Internazionale dei Pesi e delle Misure di Sèvres (BIPM).

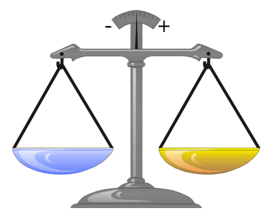


- E' l'unica unità di misura rappresentata da un campione materiale
- Nel 2014 sarà ridefinito in termini di costanti fondamentali

La Massa Gravitazionale

La massa gravitazionale di un corpo si misura,
per confronto, con la bilancia a bracci uguali

La Massa Gravitazionale



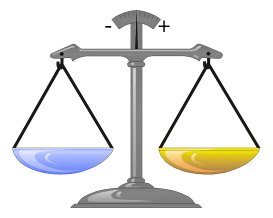
La massa gravitazionale di un corpo si misura, per confronto, con la bilancia a bracci uguali

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{m_{1g}}{m_{2g}}$$

$$P_i = |\vec{F}_{iT}| = G\frac{m_{ig} M_T}{R_T^2}$$

La Massa Gravitazionale

La massa gravitazionale di un corpo si misura, per confronto, con la bilancia a bracci uguali

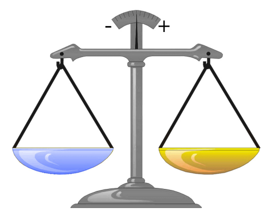


$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{m_{1g}}{m_{2g}}$$

$$P_i = |\vec{F}_{iT}| = G\frac{m_{ig}M_T}{R_T^2} = m_{ig}\mathbf{g}$$

La Massa Gravitazionale

La massa gravitazionale di un corpo si misura, per confronto, con la bilancia a bracci uguali



$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{m_{1g}}{m_{2g}}$$

$$P_i = |\vec{F}_{iT}| = G\frac{m_{ig}M_T}{R_T^2} = m_{ig}\mathbf{g}$$

$$m_{ig} \neq m_i$$

$$m_{ig} \equiv m_i$$

$$m_{ig} \equiv m_i$$

Caduta dei gravi in prossimità della superficie terrestre

$$F_i = m_i a_i \qquad F_i = G\frac{m_{ig} M_T}{R_T^2}$$

$$m_{ig} \equiv m_i$$

Caduta dei gravi in prossimità della superficie terrestre

$$F_i = m_i a_i \qquad F_i = G\frac{m_{ig} M_T}{R_T^2}$$

$$\Longrightarrow$$

$$G\frac{m_{ig} M_T}{R_T^2} = m_i a_i$$

$$m_{ig} \equiv m_i$$

Caduta dei gravi in prossimità della superficie terrestre

$$F_i = m_i a_i \qquad F_i = G\frac{m_{ig} M_T}{R_T^2}$$

$$\Longrightarrow$$

$$G\frac{m_{ig} M_T}{R_T^2} = m_i a_i$$

$$\begin{aligned} G\frac{m_{1g} M_T}{R_T^2} &= m_1 a_1 \\ G\frac{m_{2g} M_T}{R_T^2} &= m_2 a_2 \end{aligned}$$

$$\Downarrow$$

$$\frac{m_1}{m_{1g}} = \frac{m_2}{m_{2g}} \frac{a_2}{a_1}$$

$$m_{ig} \equiv m_i$$

Caduta dei gravi in prossimità della superficie terrestre

$$F_i = m_i a_i \qquad F_i = G\frac{m_{ig} M_T}{R_T^2}$$

$$\Longrightarrow$$

$$G\frac{m_{ig} M_T}{R_T^2} = m_i a_i$$

$$\begin{aligned} G\frac{m_{1g} M_T}{R_T^2} &= m_1 a_1 \\ G\frac{m_{2g} M_T}{R_T^2} &= m_2 a_2 \end{aligned}$$

$$\Downarrow$$

$$\frac{m_1}{m_{1g}} = \frac{m_2}{m_{2g}} \frac{a_2}{a_1} = \frac{m_2}{m_{2g}}$$

$$m_{ig} \equiv m_i$$

Caduta dei gravi in prossimità della superficie terrestre

$$F_i = m_i a_i \qquad F_i = G\frac{m_{ig} M_T}{R_T^2}$$

$$\Longrightarrow$$

$$G\frac{m_{ig} M_T}{R_T^2} = m_i a_i$$

$$\begin{aligned} G\frac{m_{1g} M_T}{R_T^2} &= m_1 a_1 \\ G\frac{m_{2g} M_T}{R_T^2} &= m_2 a_2 \end{aligned}$$

$$\Downarrow$$

$$\frac{m_1}{m_{1g}} = \frac{m_2}{m_{2g}}\frac{a_2}{a_1} = \frac{m_2}{m_{2g}}$$

La Relatività (Speciale) e la Massa delle Particelle

La Relatività (Speciale) e la Massa delle Particelle

Einstein (1905)

1. Le leggi fisiche hanno la stessa forma in tutti i sistemi di riferimento inerziali

La Relatività (Speciale) e la Massa delle Particelle

Einstein (1905)

1. Le leggi fisiche hanno la stessa forma in tutti i sistemi di riferimento inerziali
2. La velocità della luce nel vuoto ha lo stesso valore in tutti i sistemi di riferimento inerziali

La Relatività (Speciale) e la Massa delle Particelle

Einstein (1905)

1. Le leggi fisiche hanno la stessa forma in tutti i sistemi di riferimento inerziali
2. La velocità della luce nel vuoto ha lo stesso valore in tutti i sistemi di riferimento inerziali

Newton (1687)

$$\vec{F} = m\vec{a}$$

Se $\vec{F}$ è costante allora $\vec{a}$ è costante e quindi $|\vec{v}|$ può crescere indefinitamente.

La Relatività (Speciale) e la Massa delle Particelle

Einstein (1905)

1. Le leggi fisiche hanno la stessa forma in tutti i sistemi di riferimento inerziali
2. La velocità della luce nel vuoto ha lo stesso valore in tutti i sistemi di riferimento inerziali

Newton (1687)

$$\vec{F} = m\vec{a}$$

Se $\vec{F}$ è costante allora $\vec{a}$ è costante e quindi $|\vec{v}|$ può crescere indefinitamente.

$$\vec{F} = \frac{d}{dt} m\vec{v}$$

$\mapsto$ Principio zero della dinamica

La Relatività (Speciale) e la Massa delle Particelle

Einstein (1905)

1. Le leggi fisiche hanno la stessa forma in tutti i sistemi di riferimento inerziali
2. La velocità della luce nel vuoto ha lo stesso valore in tutti i sistemi di riferimento inerziali

Newton (1687)

$$\vec{F} = m\vec{a}$$

Se $\vec{F}$ è costante allora $\vec{a}$ è costante e quindi $|\vec{v}|$ può crescere indefinitamente.

$$\vec{F} = \frac{d}{dt} m\vec{v}$$

$\mapsto$ Principio zero della dinamica

Einstein (1905), Planck (1906)

$$\vec{F} = \frac{d}{dt} \underbrace{\gamma m}_{\text{Massa relativistica}} \vec{v}$$

La Relatività (Speciale) e la Massa delle Particelle

Einstein (1905)

1. Le leggi fisiche hanno la stessa forma in tutti i sistemi di riferimento inerziali
2. La velocità della luce nel vuoto ha lo stesso valore in tutti i sistemi di riferimento inerziali

Newton (1687)

$$\vec{F} = m\vec{a}$$

Se $\vec{F}$ è costante allora $\vec{a}$ è costante e quindi $|\vec{v}|$ può crescere indefinitamente.

$$\vec{F} = \frac{d}{dt} m\vec{v}$$

$\mapsto$ Principio zero della dinamica

Einstein (1905), Planck (1906)

$$\vec{F} = \frac{d}{dt} \underbrace{\gamma m}_{\text{Massa relativistica}} \vec{v}$$

$$M = \gamma m$$

La Relatività (Speciale) e la Massa delle Particelle

Einstein (1905)

1. Le leggi fisiche hanno la stessa forma in tutti i sistemi di riferimento inerziali
2. La velocità della luce nel vuoto ha lo stesso valore in tutti i sistemi di riferimento inerziali

Newton (1687)

$$\vec{F} = m\vec{a}$$

Se $\vec{F}$ è costante allora $\vec{a}$ è costante e quindi $|\vec{v}|$ può crescere indefinitamente.

$$\vec{F} = \frac{d}{dt} m\vec{v}$$

$\mapsto$ Principio zero della dinamica

Einstein (1905), Planck (1906)

$$\vec{F} = \frac{d}{dt} \underbrace{\gamma m}_{\text{Massa relativistica}} \vec{v}$$

$$M = \gamma m = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} m$$

La Relatività (Speciale) e la Massa delle Particelle

Einstein (1905)

1. Le leggi fisiche hanno la stessa forma in tutti i sistemi di riferimento inerziali
2. La velocità della luce nel vuoto ha lo stesso valore in tutti i sistemi di riferimento inerziali

Newton (1687)

$$\vec{F} = m\vec{a}$$

Se $\vec{F}$ è costante allora $\vec{a}$ è costante e quindi $|\vec{v}|$ può crescere indefinitamente.

$$\vec{F} = \frac{d}{dt} m\vec{v}$$

$\mapsto$ Principio zero della dinamica

Einstein (1905), Planck (1906)

$$\vec{F} = \frac{d}{dt} \underbrace{\gamma m}_{\text{Massa relativistica}} \vec{v}$$

$$M = \gamma m = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} m$$

$$\vec{p} = \gamma m \vec{v}$$

La Massa Relativistica

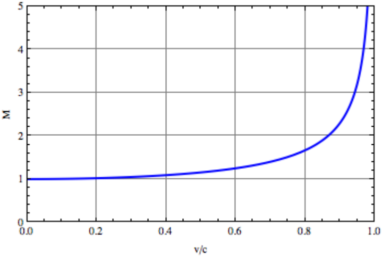
$M = \gamma m$

La Massa Relativistica

$$M = \gamma m = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} m$$

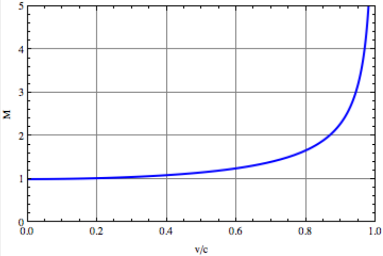
La Massa Relativistica

$$M = \gamma m = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} m$$



La Massa Relativistica

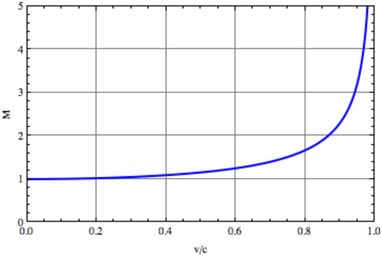
$$M = \gamma m = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} m$$



$$\gamma m c^2 = m c^2 \left[1 + \frac{1}{2} \frac{v^2}{c^2} + \frac{3}{8} \left(\frac{v^2}{c^2} \right)^2 + \ldots \right]$$

La Massa Relativistica

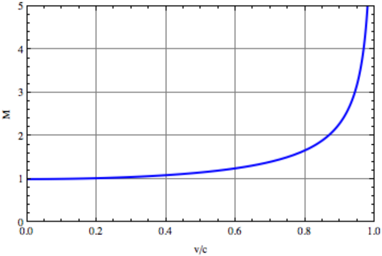
$$M = \gamma m = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} m$$



$$\gamma m c^2 = m c^2 \left[1 + \frac{1}{2} \frac{v^2}{c^2} + \frac{3}{8} \left(\frac{v^2}{c^2} \right)^2 + \ldots \right] = \underbrace{m c^2}_{E_0} +$$

La Massa Relativistica

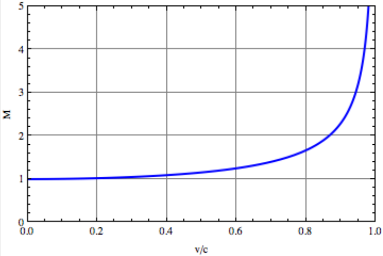
$$M = \gamma m = \frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}\,m$$



$$\gamma m c^2 = m c^2\left[1+\frac{1}{2}\frac{v^2}{c^2}+\frac{3}{8}\left(\frac{v^2}{c^2}\right)^2+\ldots\right] = \underbrace{m c^2}_{E_0} + \overbrace{\underbrace{\frac{1}{2}mv^2}_{E_c^{NR}}\qquad\qquad\qquad\qquad}^{E_c}$$

La Massa Relativistica

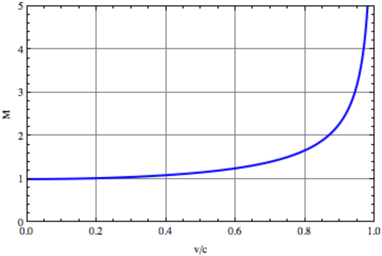
$$M = \gamma m = \frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}\, m$$



$$\gamma m c^2 = m c^2 \left[1 + \frac{1}{2}\frac{v^2}{c^2} + \frac{3}{8}\left(\frac{v^2}{c^2}\right)^2 + \dots\right] = \underbrace{m c^2}_{E_0} + \overbrace{\underbrace{\frac{1}{2} m v^2}_{E_c^{NR}} + \frac{3}{8} m \left(\frac{v^4}{c^2}\right)^2 + \dots}^{E_c}$$

La Massa Relativistica

$$M = \gamma m = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} m$$

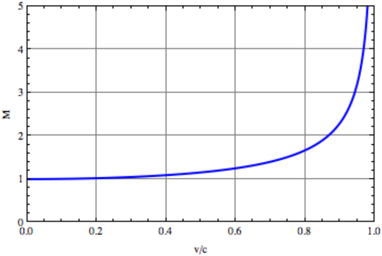


$$\gamma m c^2 = m c^2 \left[1 + \frac{1}{2}\frac{v^2}{c^2} + \frac{3}{8}\left(\frac{v^2}{c^2}\right)^2 + \ldots \right] = \underbrace{m c^2}_{E_0} + \overbrace{\underbrace{\frac{1}{2} m v^2}_{E_c^{NR}} + \frac{3}{8} m \left(\frac{v^4}{c^2}\right)^2 + \ldots}^{E_c}$$

$$E = \gamma m c^2 = E_0 + E_c$$

La Massa Relativistica

$$M = \gamma m = \frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} m$$



$$\gamma m c^2 = m c^2 \left[1 + \frac{1}{2}\frac{v^2}{c^2} + \frac{3}{8}\left(\frac{v^2}{c^2}\right)^2 + \ldots \right] = \underbrace{m c^2}_{E_0} + \overbrace{\underbrace{\frac{1}{2} m v^2}_{E_c^{NR}} + \frac{3}{8} m \left(\frac{v^4}{c^2}\right)^2 + \ldots}^{E_c}$$

$$E = \gamma m c^2 = E_0 + E_c$$

$$E_0 = m c^2$$

La Massa delle Particelle Elementari

Particella	massa (kg)	massa (u)	MeV/c^2
e (elettrone)	9.1×10^{-31}	0.00055	0.511
μ (muone)	1.9×10^{-28}	0.113	105
τ (tau)	3.2×10^{-27}	1.9	1777
ν_e, ν_μ, ν_τ	$\neq 0$	$\neq 0$	$\neq 0$
u (up)	4.1×10^{-30}	0.0025	2.3
d (down)	8.6×10^{-30}	0.0052	4.8
s (strange)	1.7×10^{-28}	0.102	95
b (beauty)	7.9×10^{-27}	4.75	4420
t (top)	3.1×10^{-25}	186.3	173500
$W^{\pm}$	1.4×10^{-25}	86.3	80385
Z°	1.6×10^{-25}	97.8	91188
γ (fotone)	0	0	0
g (gluoni)	0	0	0
H (Higgs)	2.25×10^{-25}	135	125000
p (protone)	1.7×10^{-27}	~ 1	938.3

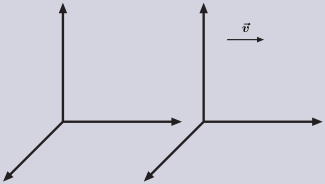
Le Simmetrie

Una simmetria è una trasformazione che lascia invariate le leggi della fisica

Le Simmetrie

Una simmetria è una trasformazione che lascia invariate le leggi della fisica

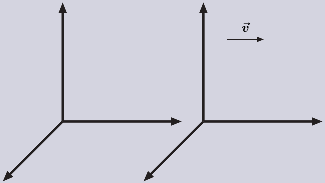
Spazio-Temporali



Le Simmetrie

Una simmetria è una trasformazione che lascia invariate le leggi della fisica

Spazio-Temporali



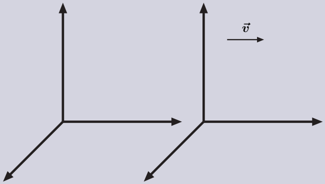
Interne

$$Energia \propto \left(\vec{E}^2 + \vec{B}^2\right)$$

Le Simmetrie

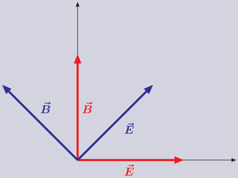
Una simmetria è una trasformazione che lascia invariate le leggi della fisica

Spazio-Temporali



Interne

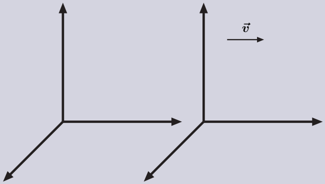
$$Energia \propto \left(\vec{E}^2 + \vec{B}^2\right)$$



Le Simmetrie

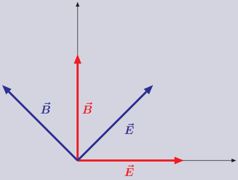
Una simmetria è una trasformazione che lascia invariate le leggi della fisica

Spazio-Temporali



Interne

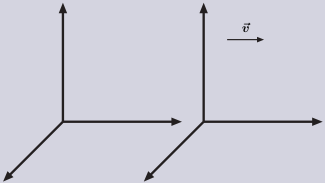
$$Energia \propto \left(\vec{E}^2 + \vec{B}^2\right)$$

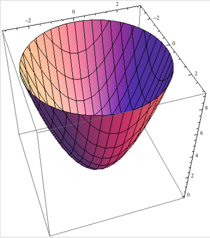


Le Simmetrie

Una simmetria è una trasformazione che lascia invariate le leggi della fisica

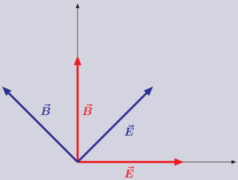
Spazio-Temporali





Interne

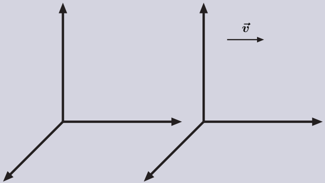
$$Energia \propto \left(\vec{E}^2 + \vec{B}^2\right)$$



Le Simmetrie

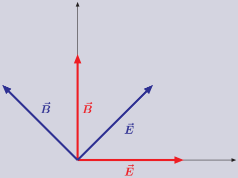
Una simmetria è una trasformazione che lascia invariate le leggi della fisica

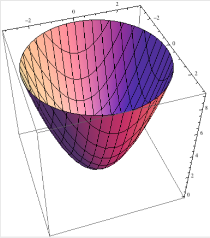
Spazio-Temporali

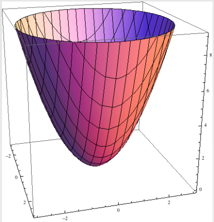


Interne

$$Energia \propto \left(\vec{E}^2 + \vec{B}^2\right)$$



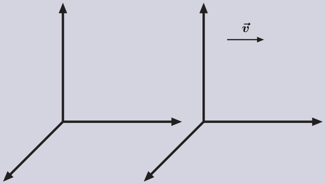




Le Simmetrie

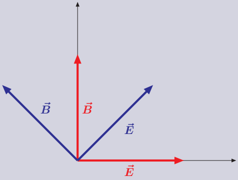
Una simmetria è una trasformazione che lascia invariate le leggi della fisica

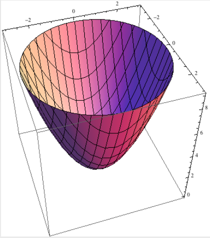
Spazio-Temporali

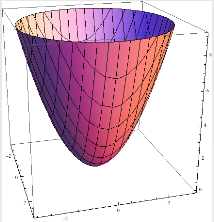


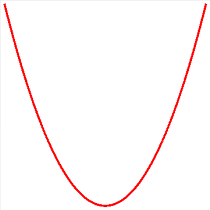
Interne

$$Energia \propto \left(\vec{E}^2 + \vec{B}^2\right)$$





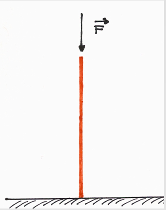




Rottura Spontanea di una Simmetria

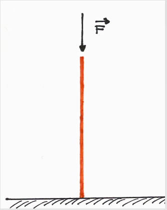
Rottura Spontanea di una Simmetria

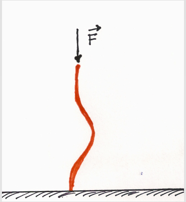
L'asta



Rottura Spontanea di una Simmetria

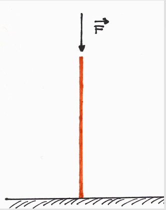
L'asta

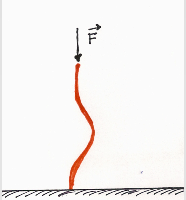




Rottura Spontanea di una Simmetria

L'asta

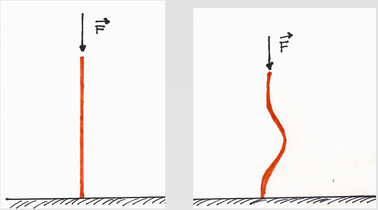




a tavola

Rottura Spontanea di una Simmetria

L'asta

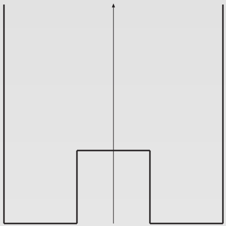


a tavola

Le Simmetrie Rotte Spontaneamente

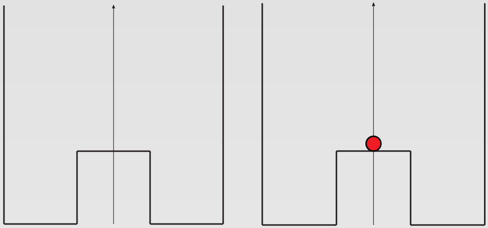
Le Simmetrie Rotte Spontaneamente

Una esemplificazione



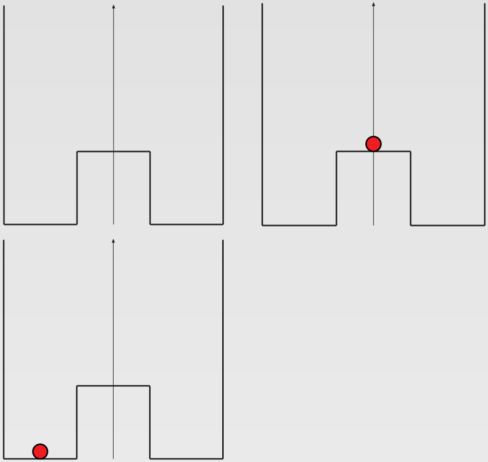
Le Simmetrie Rotte Spontaneamente

Una esemplificazione



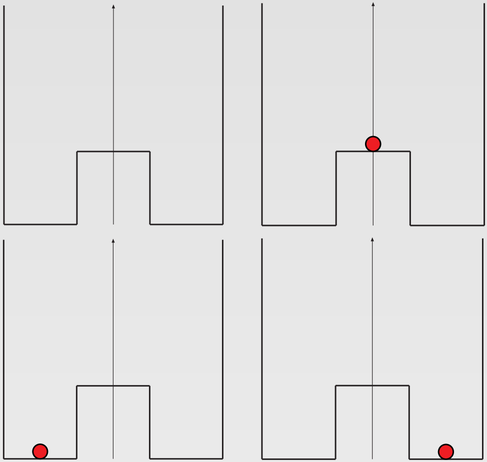
Le Simmetrie Rotte Spontaneamente

Una esemplificazione



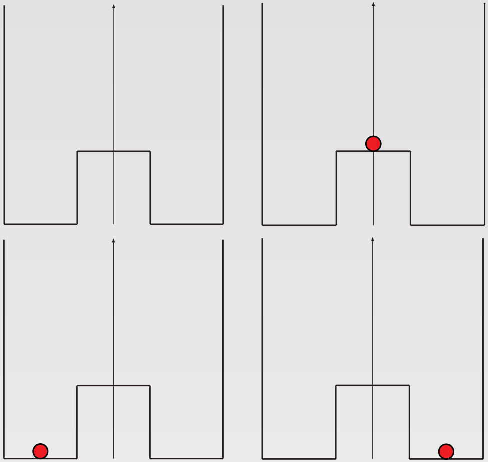
Le Simmetrie Rotte Spontaneamente

Una esemplificazione



Le Simmetrie Rotte Spontaneamente

Una esemplificazione



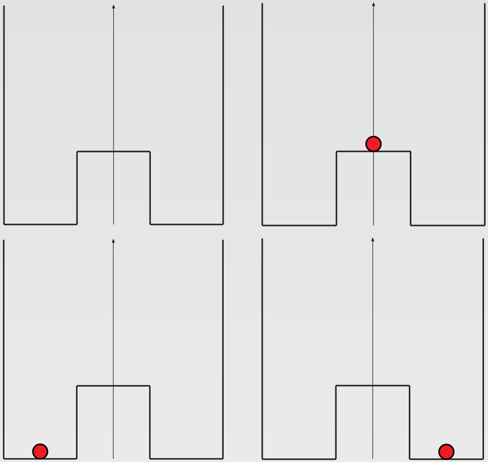
Un altro esempio

Risolviamo la

$$\frac{d^2}{dx^2} f(x) = x^2$$

Le Simmetrie Rotte Spontaneamente

Una esemplificazione



Un altro esempio

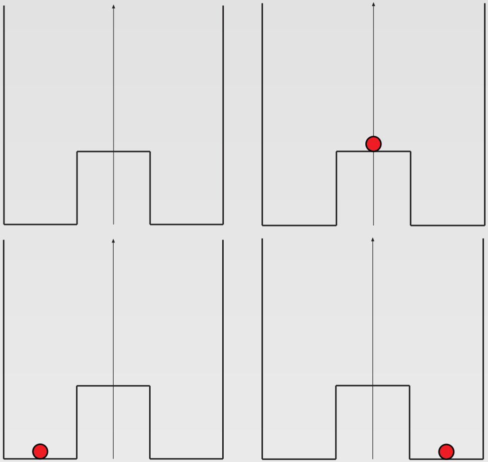
Risolviamo la

$$\frac{d^2}{dx^2} f(x) = x^2$$

simmetrica per $x \to -x$

Le Simmetrie Rotte Spontaneamente

Una esemplificazione



Un altro esempio

Risolviamo la

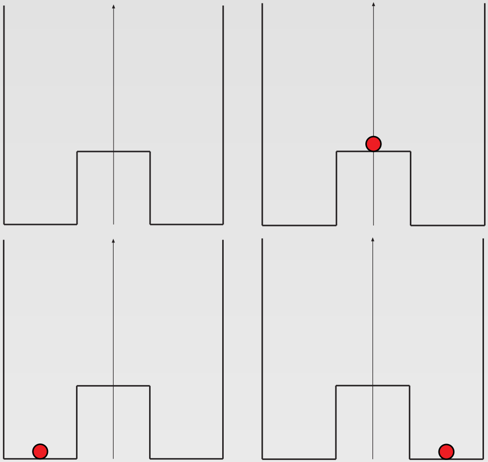
$$\frac{d^2}{dx^2} f(x) = x^2$$

simmetrica per $x \to -x$

$$f(x) = \frac{1}{12} x^4 + B x + C$$

Le Simmetrie Rotte Spontaneamente

Una esemplificazione



Un altro esempio

Risolviamo la

$$\frac{d^2}{dx^2} f(x) = x^2$$

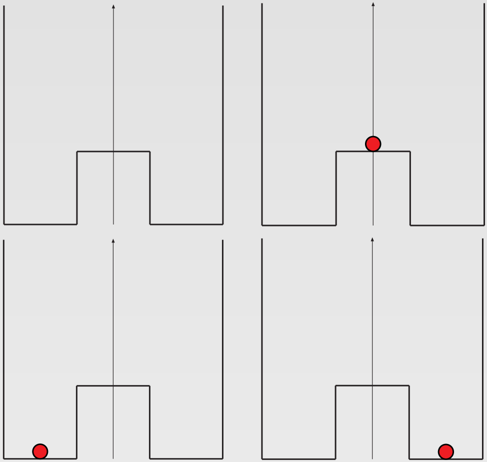
simmetrica per $x \to -x$

$$f(x) = \frac{1}{12} x^4 + B\,x + C$$

Ma

Le Simmetrie Rotte Spontaneamente

Una esemplificazione



Un altro esempio

Risolviamo la

$$\frac{d^2}{dx^2} f(x) = x^2$$

simmetrica per $x \to -x$

$$f(x) = \frac{1}{12} x^4 + B\,x + C$$

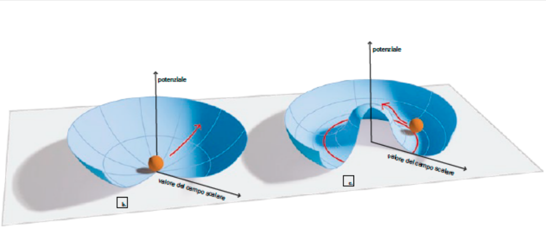
Ma

$$f(x) \neq f(-x)$$

Condizioni Iniziali

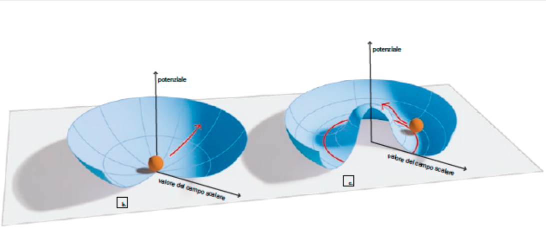
Il Meccanismo di Higgs

L'introduzione di campi scalari permette di modificare la struttura dei minimi dell'energia



Il Meccanismo di Higgs

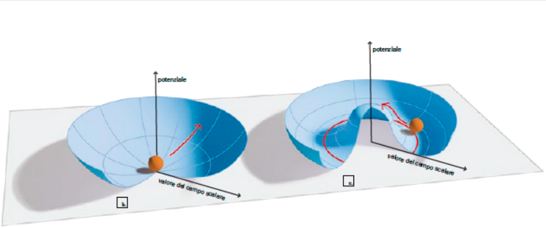
L'introduzione di campi scalari permette di modificare la struttura dei minimi dell'energia



1. La rottura spontanea della simmetria rende massivi i mediatori dell'interazione debole

Il Meccanismo di Higgs

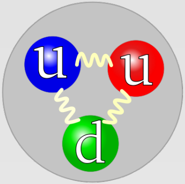
L'introduzione di campi scalari permette di modificare la struttura dei minimi dell'energia



1. La rottura spontanea della simmetria rende massivi i mediatori dell'interazione debole
2. Il minimo dell'energia corrisponde ad un valore del campo di Higgs diverso da zero $\rightarrow$ fermioni diventano massivi

E, per concludere, una domanda

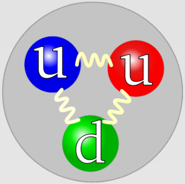
La massa del protone



$$\begin{aligned} m_u &= 2.3\,\mathrm{MeV}/\mathrm{c}^2 \\ m_d &= 4.8\,\mathrm{MeV}/\mathrm{c}^2 \\ 2\,m_u + m_d &= \mathbf{9.4}\,\mathrm{MeV}/\mathrm{c}^2 \end{aligned}$$

E, per concludere, una domanda

La massa del protone



$$\begin{aligned} m_u &= 2.3\,\mathrm{MeV}/\mathrm{c}^2 \\ m_d &= 4.8\,\mathrm{MeV}/\mathrm{c}^2 \\ 2\,m_u + m_d &= 9.4\,\mathrm{MeV}/\mathrm{c}^2 \end{aligned}$$

$$m_p = 938.3\,\mathrm{MeV}/\mathrm{c}^2$$