

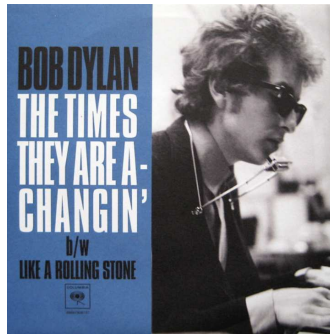
Misurando s'impara

- Un'introduzione a concetti di base di Fisica
e a questioni metrologiche correlate –

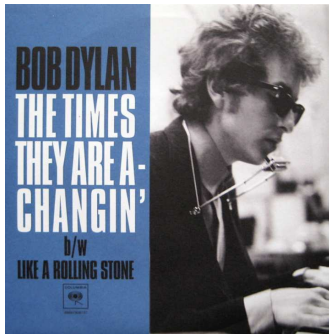
Giulio D'Agostini

Università di Roma La Sapienza e INFN
Roma, Italy

Prefazione

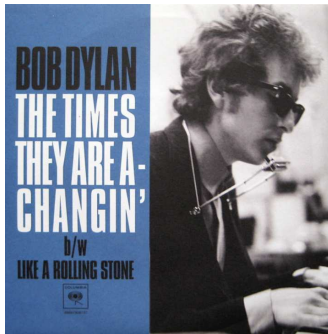


Prefazione



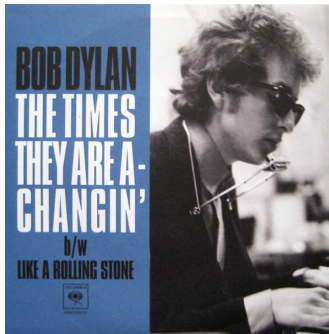
Non vi sto a ricordare le tante cose di cui voi beneficiate. . .

Prefazione



Non vi sto a ricordare le tante cose di cui voi beneficiate. . .
(ho appena celebrato il 50-mo dall'immatricolazione. . .)

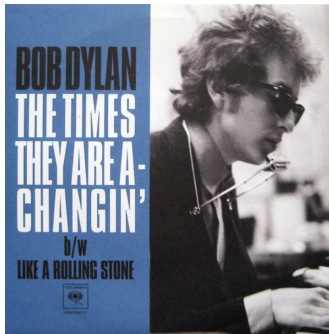
Prefazione



Non vi sto a ricordare le tante cose di cui voi beneficiate. . .
(ho appena celebrato il 50-mo dall'immatricolazione. . .)

Voi avete oggetti **semplicemente 'mostruosi'**

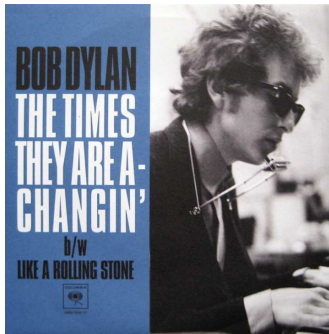
Prefazione



Non vi sto a ricordare le tante cose di cui voi beneficiate...
(ho appena celebrato il 50-mo dall'immatricolazione...)

Voi avete oggetti **semplicemente 'mostruosi'**...
ma noi facevamo i conti con lo **strumento di calcolo** che avevano
gli **astronauti** della missione spaziale **Apollo 13** !!

Prefazione



Non vi sto a ricordare le tante cose di cui voi beneficiate...
(ho appena celebrato il 50-mo dall'immatricolazione...)

Voi avete oggetti **semplicemente 'mostruosi'**...
ma noi facevamo i conti con lo **strumento di calcolo** che avevano
gli **astronauti** della missione spaziale **Apollo 13** !! 😊

???

Apollo 13, 1970

Slide Rule, 5-inch, Pickett N600-ES, Apollo 13

[Home](#) / [Explore](#) / [Collection Objects](#) / Slide Rule, 5-inch, Pickett N600-ES, Apollo 13



 Usage Conditions May Apply



84-16

3 Images

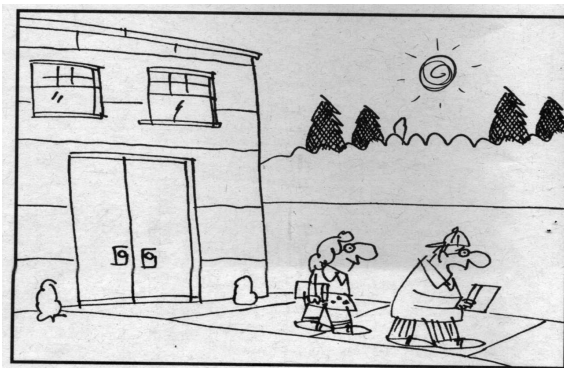
During the Apollo missions, an on-board computer and large computers on Earth performed the critical guidance and navigation calculations necessary for a successful journey. In addition, crews carried a slide rule for more routine calculations. NASA chose a 5-inch, metal rule, model "N600-ES," manufactured by the Pickett Company for their use. It was a model that was popular among engineers, scientists and students at the time. No modifications were needed for use in space.

This rule was used by the crew of Apollo 13, in April 1970.

Display Status

This object is not on display at the Space Museum. It is either on loan or in storage.

"To study or not to study?"



— Ma che senso ha studiare se al giorno d'oggi con le app e gli algoritmi si può fare qualunque cosa?

"To study or not to study?"



La questione non è *se studiare* ma **cosa e come studiare!**

"To study or not to study?"



La questione non è *se studiare* ma **cosa e come studiare!**
⇒ Solida preparazione sui **concetti di base** (anche *filosofici*)

"To study or not to study?"



La questione non è *se studiare* ma **cosa e come studiare!**

⇒ Solida preparazione sui **concetti di base** (anche *filosofici*)

⇒ **Spirito critico:**

"To study or not to study?"



La questione non è *se studiare* ma **cosa e come studiare!**

⇒ Solida preparazione sui **concetti di base** (anche *filosofici*)

⇒ **Spirito critico:**

→ **Presenza di coscienza delle assunzioni**

"To study or not to study?"



La questione non è *se studiare* ma **cosa e come studiare!**

⇒ Solida preparazione sui **concetti di base** (anche *filosofici*)

⇒ **Spirito critico:**

→ **Presa di coscienza delle assunzioni**

→ **Controllo (della ragionevolezza) dei risultati**

Cominciamo a misurare

- ▶ Densità di *piccoli* solidi
 - ▶ regolari
 - ▶ irregolari

Cominciamo a misurare

- ▶ Densità di *piccoli* solidi
 - ▶ regolari
 - ▶ irregolari

Poi passeremo alla **densità della Terra** (e non solo...)

Cominciamo a misurare

- ▶ Densità di *piccoli* solidi
 - ▶ regolari
 - ▶ irregolari

Poi passeremo alla **densità della Terra** (e non solo...)

...con approfondimenti su cosa vuol dire *misurare*

Cominciamo a misurare

- ▶ Densità di *piccoli* solidi
 - ▶ regolari
 - ▶ irregolari

Poi passeremo alla **densità della Terra** (e non solo...)

...con approfondimenti su cosa vuol dire *misurare*

e vedremo alcune complicazioni a cui in genere nemmeno pensiamo per questioni quotidiane (ma come tutti i 'Fisici di frontiera' sono *ossessionato* dai dettagli...)

Cominciamo a misurare

- ▶ Densità di *piccoli* solidi
 - ▶ regolari
 - ▶ irregolari

Poi passeremo alla **densità della Terra** (e non solo...)

...con approfondimenti su cosa vuol dire *misurare*

e vedremo alcune complicazioni a cui in genere nemmeno pensiamo per questioni quotidiane (ma come tutti i 'Fisici di frontiera' sono *ossessionato* dai dettagli...)

Andiamo a cominciare ⇒

[Nota: nella presentazione in aula non siamo riusciti ad entrare nei dettagli della misura della densità della Terra, ma sul sito dedicato (<https://www.roma1.infn.it/~dagos/misurando/>) sono riportate figure e link relativi a *misure storiche* di dimensione e 'peso' della Terra.]

Ma cosa significa *misurare*?

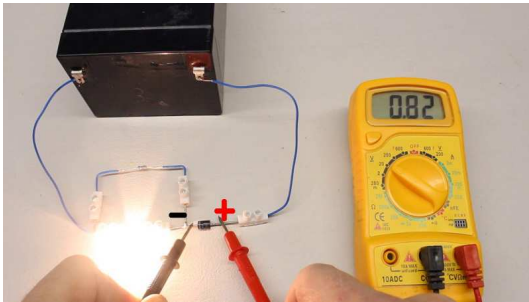
(slides in inglese, sorry...)

What is measurement?



joyce@gohide-intl.com

What is measurement?



What is measurement?

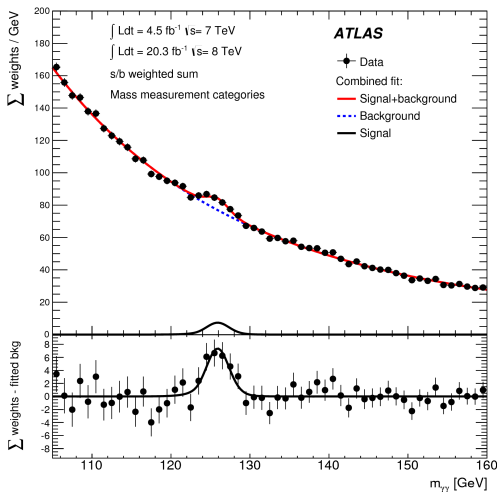


What is measurement?



What is measurement?

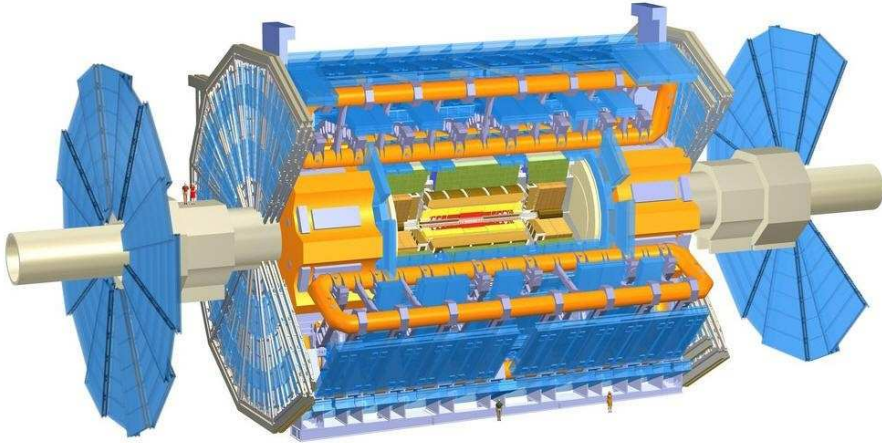
Higgs $\rightarrow \gamma\gamma$ (2012)



Two-photon *invariant mass*

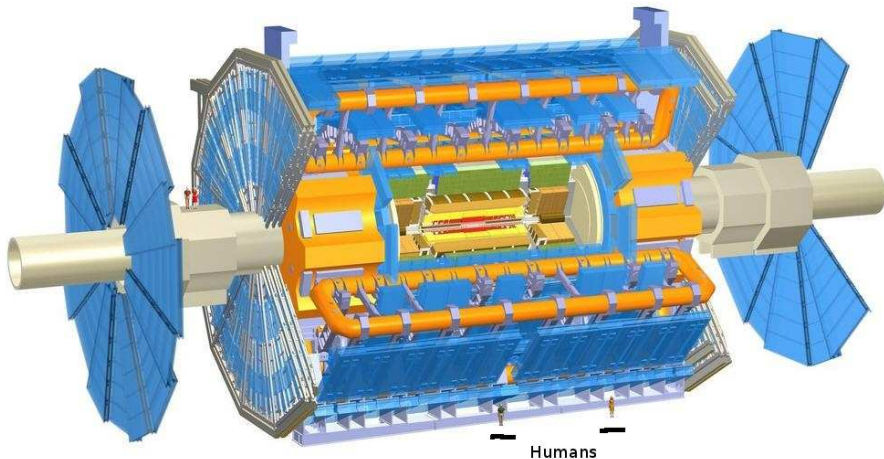
What is measurement?

ATLAS Experiment at LHC (CERN, Geneva)



What is measurement?

ATLAS Experiment at LHC [length: 46 m; $\varnothing$ 25 m]

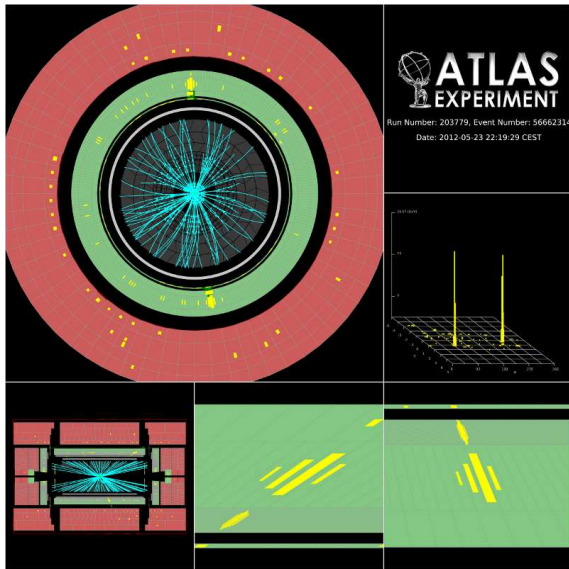


$\approx$ 3000 km cables

$\approx$ 7000 tonnes

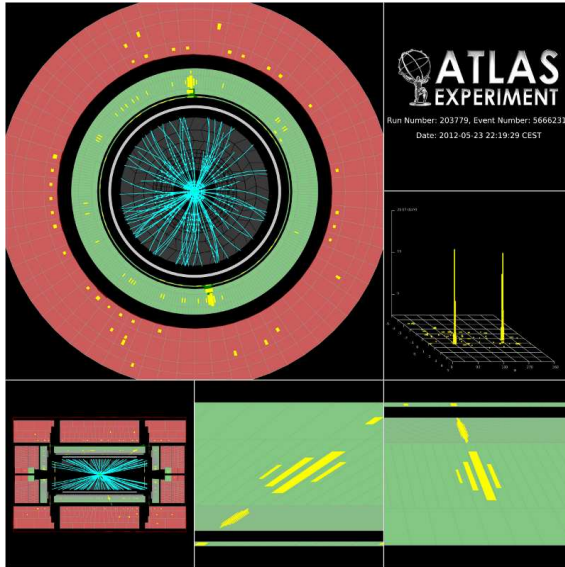
$\approx$ 100 millions electronic channels

What is measurement?



Two flashes of 'light' (2 γ 's) in a 'noisy' environment.

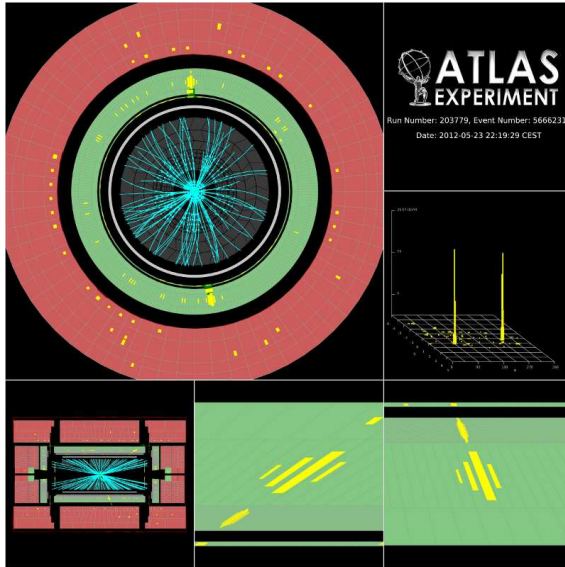
What is measurement?



Two flashes of 'light' (2 γ 's) in a 'noisy' environment.

Higgs $\rightarrow \gamma\gamma$?

What is measurement?

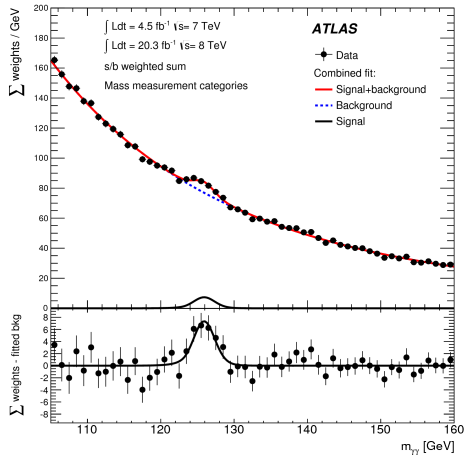


Two flashes of 'light' (2 γ 's) in a 'noisy' environment.

Higgs $\rightarrow \gamma\gamma$? Probably not...

What is measurement?

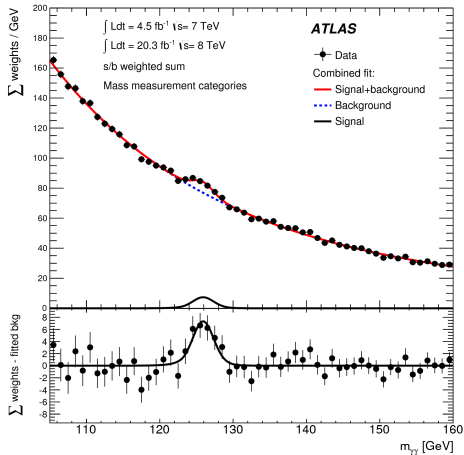
Higgs $\rightarrow \gamma\gamma$



$\Rightarrow$ { Mass value
Production rate

What is measurement?

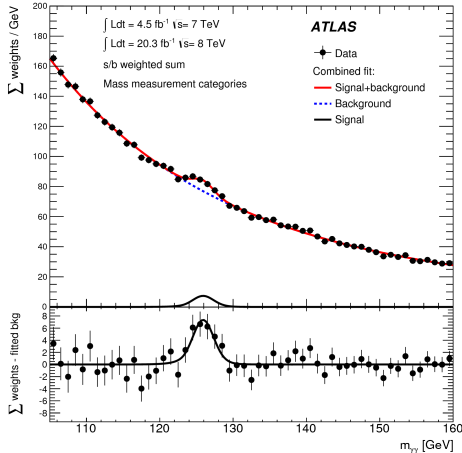
Higgs $\rightarrow \gamma\gamma$



$\Rightarrow$ { Mass value
Production rate
(with uncertainties)

What is measurement?

Higgs $\rightarrow \gamma\gamma$



$\Rightarrow$ { Mass value
Production rate
(with uncertainties)

Quite indirect measurements of something we do not “see”!

Can we “see” physics quantities?

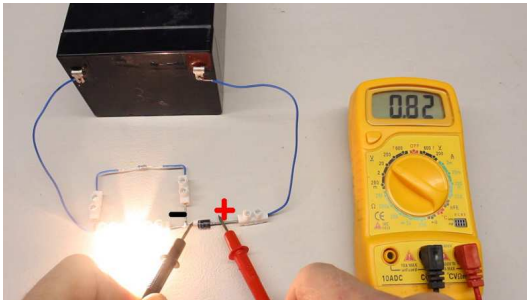
But, can we see our mass?



joyce@gohide-intl.com

Can we “see” physics quantities?

... or a voltage?



Can we “see” physics quantities?

... or our blood pressure?



Can we “see” physics quantities?

Certainly not!

Can we “see” physics quantities?

Certainly not!

... although for some quantities we can have

a ‘vivid impression’ (in the David Hume’s sense)

Measuring a mass on a scale



joyce@gohide-intl.com

Equilibrium ('physical principle of the measurement'):

$$mg - k\Delta x = 0$$

$$\Delta x \rightarrow \theta \rightarrow \text{scale reading}$$

(with 'g' 'gravitational acceleration' (??); 'k' spring constant.)

Measuring a mass on a scale



joyce@gohide-intl.com

Equilibrium ('physical principle of the measurement'):

$$mg - k\Delta x = 0$$

$$\Delta x \rightarrow \theta \rightarrow \text{scale reading}$$

(with 'g' 'gravitational acceleration' (??); 'k' spring constant.)

From the reading to the value of the mass:

$$\text{scale reading} \xrightarrow{\text{given } g, k, \text{ "etc." ...}} m$$

Measuring a mass on a balance

scale reading $\xrightarrow{\text{given } g, k, \text{ "etc."} \dots}$ m

Measuring a mass on a balance

scale reading $\xrightarrow{\text{given } g, k, \text{ "etc."} \dots}$ m

Dependence on ' g ': $g \stackrel{?}{=} \frac{GM_{\oplus}}{R_{\oplus}^2}$

Measuring a mass on a balance

scale reading $\xrightarrow{\text{given } g, k, \text{ "etc."} \dots} m$

Dependence on 'g': $g \stackrel{?}{=} \frac{GM_{\oplus}}{R_{\oplus}^2}$

- Position is usually not at " $R_{\oplus}$ " from the Earth center;

Measuring a mass on a balance

scale reading $\xrightarrow{\text{given } g, k, \text{ "etc."} \dots} m$

Dependence on 'g': $g \stackrel{?}{=} \frac{GM_{\oplus}}{R_{\oplus}^2}$

- ▶ Position is usually not at " $R_{\oplus}$ " from the Earth center;
- ▶ Earth not spherical...

Measuring a mass on a balance

scale reading $\xrightarrow{\text{given } g, k, \text{ "etc."} \dots} m$

Dependence on 'g': $g \stackrel{?}{=} \frac{GM_{\oplus}}{R_{\oplus}^2}$

- ▶ Position is usually not at " $R_{\oplus}$ " from the Earth center;
- ▶ Earth not spherical...
- ▶ ...not even ellipsoidal...

Measuring a mass on a balance

scale reading $\xrightarrow{\text{given } g, k, \text{ "etc."} \dots}$ m

Dependence on 'g': $g \stackrel{?}{=} \frac{GM_{\oplus}}{R_{\oplus}^2}$

- ▶ Position is usually not at " $R_{\oplus}$ " from the Earth center;
- ▶ Earth not spherical...
- ▶ ...not even ellipsoidal...
- ▶ ...and not even homogeneous.

Measuring a mass on a balance

scale reading $\xrightarrow{\text{given } g, k, \text{ "etc."} \dots} m$

Dependence on 'g': $g \stackrel{?}{=} \frac{GM_{\oplus}}{R_{\oplus}^2}$

- ▶ Position is usually not at " $R_{\oplus}$ " from the Earth center;
- ▶ Earth not spherical...
- ▶ ...not even ellipsoidal...
- ▶ ...and not even homogeneous.
- ▶ Moreover we have to consider centrifugal effects

Measuring a mass on a balance

scale reading $\xrightarrow{\text{given } g, k, \text{ "etc."} \dots} m$

Dependence on 'g': $g \stackrel{?}{=} \frac{GM_{\oplus}}{R_{\oplus}^2}$

- ▶ Position is usually not at " $R_{\oplus}$ " from the Earth center;
- ▶ Earth not spherical...
- ▶ ...not even ellipsoidal...
- ▶ ...and not even homogeneous.
- ▶ Moreover we have to consider centrifugal effects
- ▶ ...and even the effect from the Moon

Measuring a mass on a balance

scale reading $\xrightarrow{\text{given } g, k, \text{ "etc."} \dots}$ m

Dependence on 'g': $g \stackrel{?}{=} \frac{GM_{\oplus}}{R_{\oplus}^2}$

- ▶ Position is usually not at " $R_{\oplus}$ " from the Earth center;
- ▶ Earth not spherical...
- ▶ ...not even ellipsoidal...
- ▶ ...and not even homogeneous.
- ▶ Moreover we have to consider centrifugal effects
- ▶ ...and even the effect from the Moon

Certainly not to watch our weight 😊

But think about it!

Measuring a mass on a balance

scale reading $\xrightarrow{\text{given } g, k, \text{ "etc."} \dots}$ m

Dependence on 'k':

- ▶ temperature
- ▶ non linearity
- ▶ ...

Measuring a mass on a balance

scale reading $\xrightarrow{\text{given } g, k, \text{ "etc."} \dots}$ m

Dependence on 'k':

- ▶ temperature
- ▶ non linearity
- ▶ ...

$\Delta x \rightarrow \theta \rightarrow$ scale reading:

- ▶ left to your imagination...

Measuring a mass on a balance

scale reading $\xrightarrow{\text{given } g, k, \text{ "etc."} \dots}$ m

Dependence on 'k':

- ▶ temperature
- ▶ non linearity
- ▶ ...

$\Delta x \rightarrow \theta \rightarrow$ scale reading:

- ▶ left to your imagination...

+ randomic effects:

- ▶ stopping position of damped oscillation;
- ▶ variability of all quantities of influence;
- ▶ reading of analog scale.

Measuring a mass on a balance

scale reading $\xrightarrow{\text{given } g, k, \text{ "etc."} \dots}$ m

Dependence on 'k':

- ▶ temperature
- ▶ non linearity
- ▶ ...

$\Delta x \rightarrow \theta \rightarrow$ scale reading:

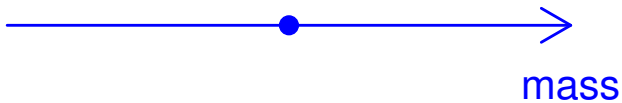
- ▶ left to your imagination...

+ random effects:

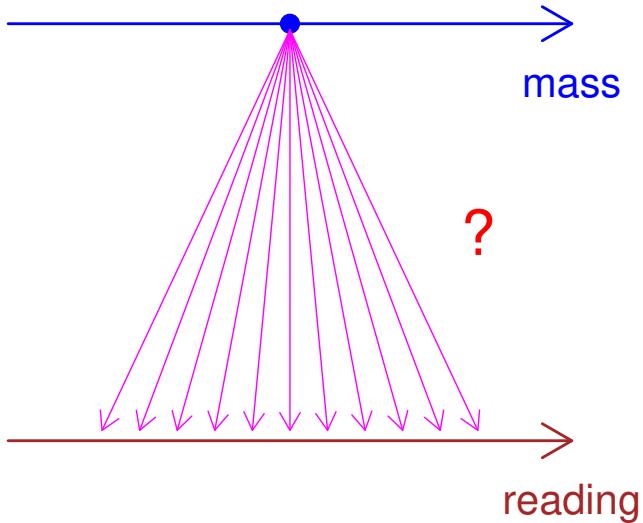
- ▶ stopping position of damped oscillation;
- ▶ variability of all quantities of influence;
- ▶ reading of analog scale.

$\Rightarrow m??$

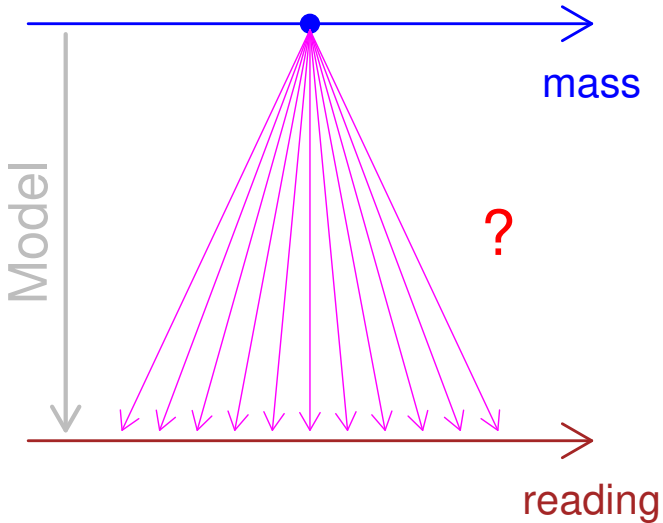
Mass $\longrightarrow$ Reading



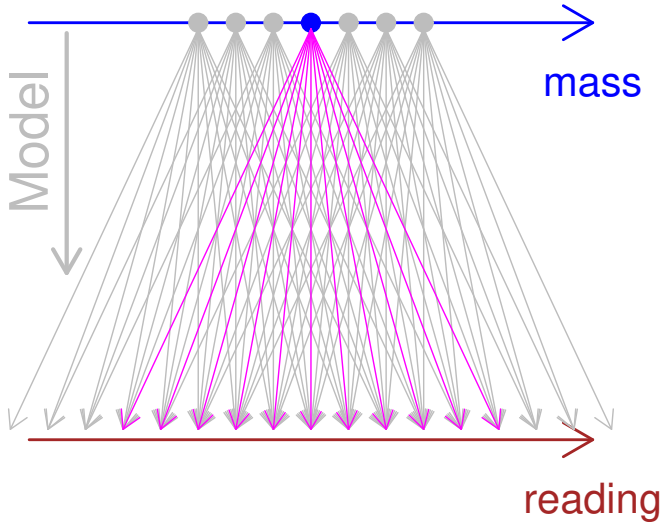
Mass $\longrightarrow$ Reading



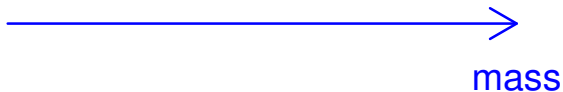
Mass $\longrightarrow$ Reading



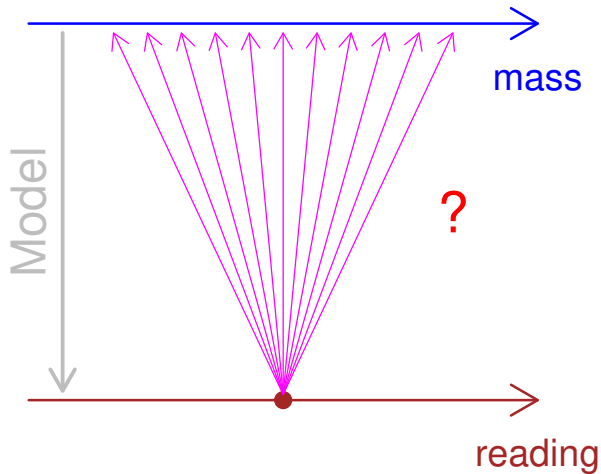
Mass $\longrightarrow$ Reading



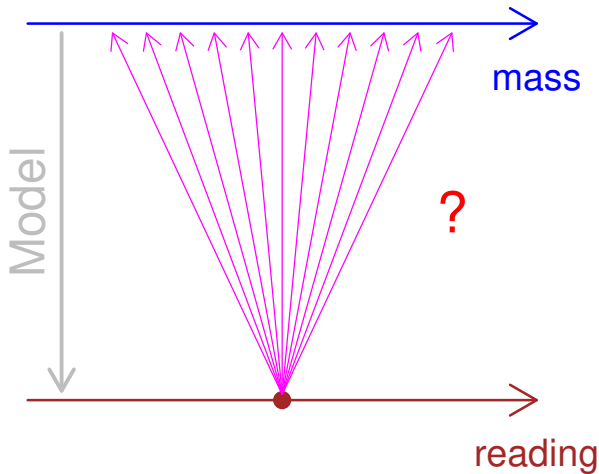
Reading $\longrightarrow$ 'true' mass



Reading $\longrightarrow$ 'true' mass



Reading $\longrightarrow$ 'true' mass



Measurement is nothing but
inferring a model parameter

Physical world $\leftrightarrow$ Science (from Latin 'scio' – to know)

An Einstein's quote (from his *Autobiography*) might help:

*“Physical concepts are free creations of the human mind,
and are not, however it may seem,
uniquely determined by the external world”*

Physical world $\leftrightarrow$ Science (from Latin 'scio' – to know)

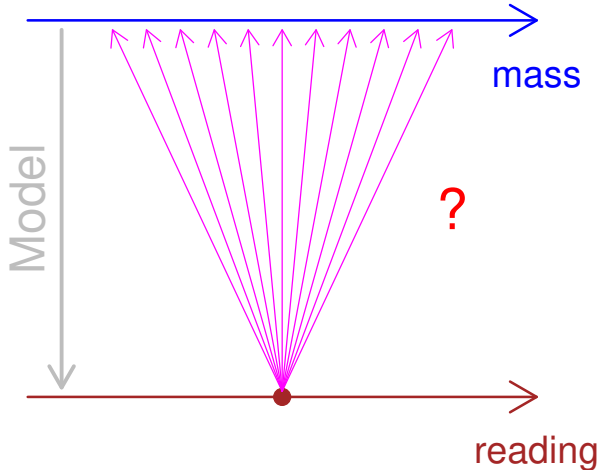
An Einstein's quote (from his *Autobiography*) might help:

"Physical concepts are free creations of the human mind, and are not, however it may seem, uniquely determined by the external world"

And, again there, referring to his revolutionary ideas:

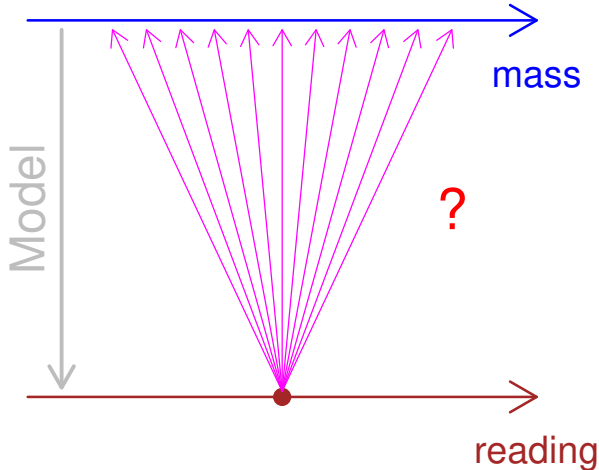
"The type of critical reasoning which was required for the discovery of this central point was decisively furthered, in my case, especially by the reading of David Hume's and Ernst Mach's philosophical writings"

Data $\longrightarrow$ value of a physical quantity ('true value')



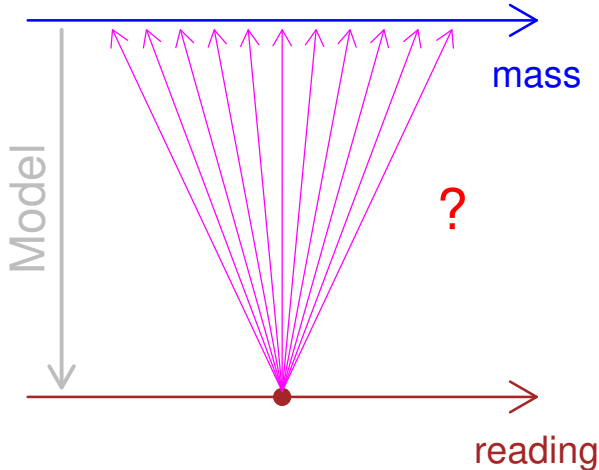
The observed 'data' is certain:

Data $\longrightarrow$ value of a physical quantity ('true value')



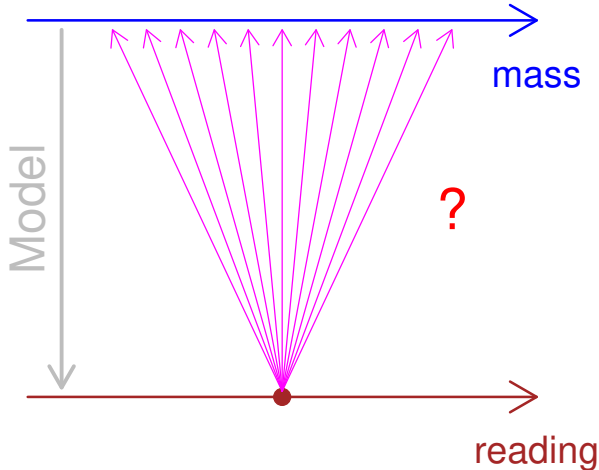
The observed 'data' is certain: $\longrightarrow$ 'true value' uncertain

Data $\rightarrow$ value of a physical quantity ('true value')



The observed 'data' is certain: $\rightarrow$ 'true value' uncertain
"Data uncertainty"?

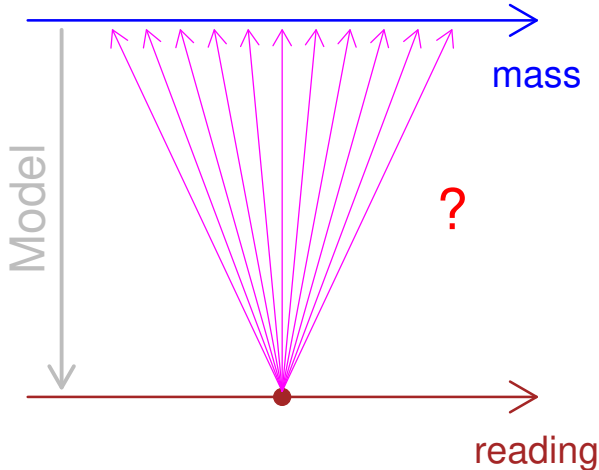
Data $\longrightarrow$ value of a physical quantity ('true value')



The observed 'data' is certain: $\rightarrow$ 'true value' uncertain

"Data uncertainty"? ???

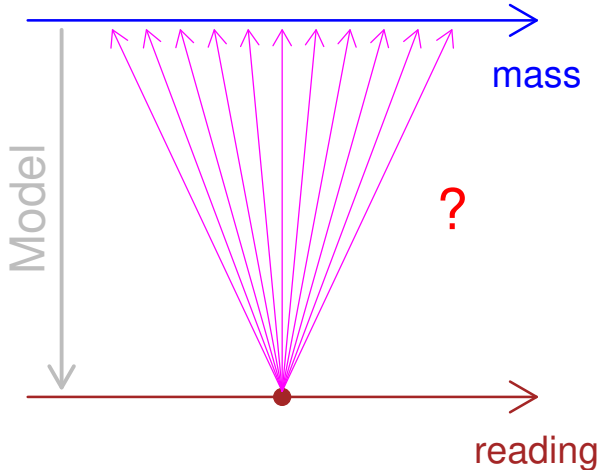
Data $\rightarrow$ value of a physical quantity ('true value')



The observed 'data' is certain: $\rightarrow$ 'true value' uncertain

"Data uncertainty"? ??? Data corrupted?

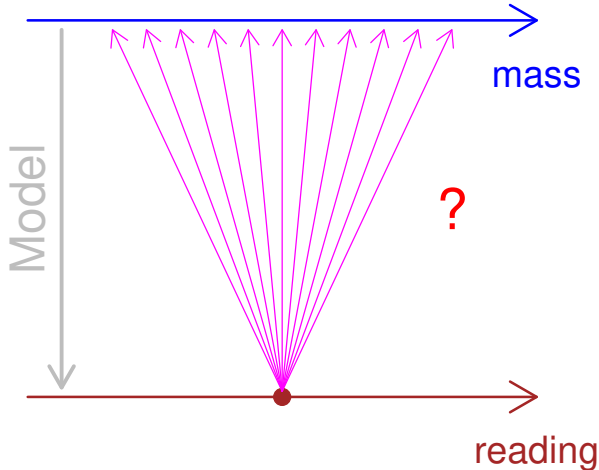
Data $\rightarrow$ value of a physical quantity ('true value')



The observed 'data' is certain: $\rightarrow$ 'true value' uncertain

"Data uncertainty"? ??? Data corrupted? Even if the data were corrupted, the data were the corrupted data!!...

Data $\longrightarrow$ value of a physical quantity ('true value')



The observed 'data' is certain: $\rightarrow$ 'true value' uncertain

"Data uncertainty"? ??? Data corrupted? Even if the data were corrupted, the data were the corrupted data!!...

[Unless we are talking of 'future data' or of 'somebody else data' ...]

Sources of uncertainties (from ISO GUM)

1 incomplete definition of the measurand

Sources of uncertainties (from ISO GUM)

1 incomplete *definition* of the *measurand*

→ g

→ where?

→ inertial effects subtracted?

Sources of uncertainties (from ISO GUM)

1 *incomplete definition of the measurand*

→ g

→ where?

→ inertial effects subtracted?

2 *imperfect realization of the definition of the measurand*

Sources of uncertainties (from ISO GUM)

1 *incomplete definition of the measurand*

→ g

→ where?

→ inertial effects subtracted?

2 *imperfect realization of the definition of the measurand*

→ scattering on neutron

→ how to realize a neutron target?

Sources of uncertainties (from ISO GUM)

1 *incomplete definition of the measurand*

- g
- where?
- inertial effects subtracted?

2 *imperfect realization of the definition of the measurand*

- scattering on neutron
- how to realize a neutron target?

3 *non-representative sampling* — the sample measured may not represent the measurand;

Sources of uncertainties (from ISO GUM)

1 *incomplete definition of the measurand*

→ g

→ where?

→ inertial effects subtracted?

2 *imperfect realization of the definition of the measurand*

→ scattering on neutron

→ how to realize a neutron target?

3 *non-representative sampling* — the sample measured may not represent the measurand;

4 *inadequate knowledge of the effects of environmental conditions on the measurement, or imperfect measurement of environmental conditions;*

Sources of uncertainties (from ISO GUM)

1 *incomplete definition of the measurand*

→ g

→ where?

→ inertial effects subtracted?

2 *imperfect realization of the definition of the measurand*

→ scattering on neutron

→ how to realize a neutron target?

3 *non-representative sampling* — the sample measured may not represent the measurand;

4 *inadequate knowledge of the effects of environmental conditions on the measurement, or imperfect measurement of environmental conditions;*

5 *personal bias in reading analogue instruments;*

Sources of uncertainties (from ISO GUM)

6 *finite instrument resolution or discrimination threshold;*

Sources of uncertainties (from ISO GUM)

- 6 *finite instrument **resolution** or discrimination threshold;*
- 7 *inexact values of measurement **standards** and **reference materials**;*

Sources of uncertainties (from ISO GUM)

- 6 *finite instrument **resolution** or discrimination threshold;*
- 7 *inexact values of measurement **standards** and **reference materials**;*
- 8 *inexact values of **constants** and other **parameters** obtained from external sources and used in the data-reduction algorithm;*

Sources of uncertainties (from ISO GUM)

- 6 *finite instrument **resolution** or discrimination threshold;*
- 7 *inexact values of measurement **standards** and **reference materials**;*
- 8 *inexact values of **constants** and other **parameters** obtained from external sources and used in the data-reduction algorithm;*
- 9 ***approximations and assumptions** incorporated in the **measurement method** and procedure;*

Sources of uncertainties (from ISO GUM)

- 6 *finite instrument **resolution** or discrimination threshold;*
- 7 *inexact values of measurement **standards** and **reference materials**;*
- 8 *inexact values of **constants** and other **parameters** obtained from external sources and used in the data-reduction algorithm;*
- 9 ***approximations and assumptions** incorporated in the **measurement method** and procedure;*
- 10 ***variations in repeated observations** of the measurand under apparently identical conditions.*

Sources of uncertainties (from ISO GUM)

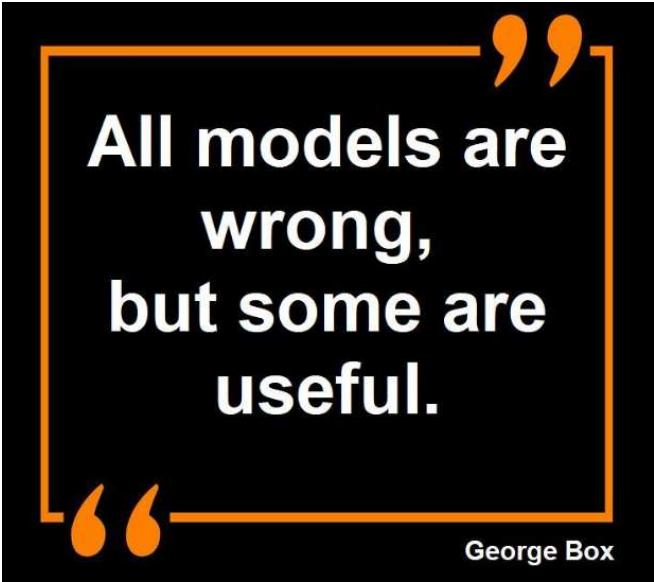
- 6 *finite instrument **resolution** or discrimination threshold;*
- 7 *inexact values of measurement **standards** and **reference materials**;*
- 8 *inexact values of **constants** and other **parameters** obtained from external sources and used in the data-reduction algorithm;*
- 9 ***approximations and assumptions** incorporated in the **measurement method** and procedure;*
- 10 ***variations in repeated observations** of the measurand under apparently identical conditions.*

Note

- ▶ Sources not necessarily independent
- ▶ In particular, sources 1-9 may contribute to 10 (e.g. not-monitored electric fluctuations)

We strongly rely on models, but. . .

We strongly rely on models, but...



**All models are
wrong,
but some are
useful.**

George Box

Chiarimenti

- ▶ ' g ': che senso ha parlare di **accelerazione di un oggetto fermo?**

Chiarimenti

- ▶ ' g ': che senso ha parlare di **accelerazione di un oggetto fermo?**
- ▶ Forza di gravità e '**secondo principio**' (di Newton)

Chiarimenti

- ▶ ' g ': che senso ha parlare di **accelerazione di un oggetto fermo?**
- ▶ Forza di gravità e '**secondo principio**' (di Newton)
 - ▶ **Massa** **inerziale** e **massa** **gravitazionale**

Chiarimenti

- ▶ ' g ': che senso ha parlare di **accelerazione di un oggetto fermo?**
- ▶ Forza di gravità e '**secondo principio**' (di Newton)
 - ▶ **Massa inerziale** e **massa gravitazionale**
 - ▶ Che significato ha g di ' mg '?

Chiarimenti

- ▶ ' g ': che senso ha parlare di **accelerazione di un oggetto fermo?**
- ▶ Forza di gravità e '**secondo principio**' (di Newton)
 - ▶ **Massa** **inerziale** e **massa** **gravitazionale**
 - ▶ Che significato ha g di ' mg '?
⇒ **Forza per unità di massa**

Chiarimenti

- ▶ ' g ': che senso ha parlare di **accelerazione di un oggetto fermo?**
- ▶ Forza di gravità e '**secondo principio**' (di Newton)
 - ▶ **Massa inerziale** e **massa gravitazionale**
 - ▶ Che significato ha g di ' mg '?
 - ⇒ **Forza per unità di massa** ⇒ **campo** (gravitazionale),
 $g = 9.8 \text{ N/kg}$

Chiarimenti

- ▶ ' g ': che senso ha parlare di **accelerazione di un oggetto fermo?**
- ▶ Forza di gravità e 'secondo principio' (di Newton)
 - ▶ **Massa inerziale** e **massa gravitazionale**
 - ▶ Che significato ha g di ' mg '?
⇒ Forza per unità di massa ⇒ **campo** (gravitazionale),
 $g = 9.8 \text{ N/kg}$
- ▶ Principio di misura
 - ▶ particolarmente interessante il caso dei termometri: → sito

Chiarimenti

- ▶ ' g ': che senso ha parlare di **accelerazione di un oggetto fermo?**
- ▶ Forza di gravità e '**secondo principio**' (di Newton)
 - ▶ **Massa inerziale** e **massa gravitazionale**
 - ▶ Che significato ha g di ' mg '?
⇒ **Forza per unità di massa** ⇒ **campo** (gravitazionale),
 $g = 9.8 \text{ N/kg}$
- ▶ **Principio di misura**
 - ▶ particolarmente interessante il caso dei termometri: → sito
- ▶ Applicazione a misure di lunghezza:
 - ▶ confronto diretto: → dimensione della Luna
 - ▶ opportune proporzioni (→ trigonometria):
 - ▶ Distanza della Minerva, etc. → **il pollice di Fermi**

Chiarimenti

- ▶ **'g'**: che senso ha parlare di **accelerazione di un oggetto fermo?**
- ▶ **Forza di gravità** e **'secondo principio'** (di Newton)
 - ▶ **Massa inerziale** e **massa gravitazionale**
 - ▶ Che significato ha g di **'mg'**?
⇒ **Forza per unità di massa** ⇒ **campo** (gravitazionale),
 $g = 9.8 \text{ N/kg}$
- ▶ **Principio di misura**
 - ▶ particolarmente interessante il caso dei termometri: → sito
- ▶ **Applicazione a misure di lunghezza:**
 - ▶ confronto diretto: → dimensione della Luna
 - ▶ opportune proporzioni (→ trigonometria):
 - ▶ Distanza della Minerva, etc. → **il pollice di Fermi**
 - ▶ uso curioso dell'asticella per selfie: → **distanza Terra-Luna**
 - ▶ tempo impiegato, nota la velocità

Chiarimenti

- ▶ **'g'**: che senso ha parlare di **accelerazione di un oggetto fermo?**
- ▶ **Forza di gravità** e **'secondo principio'** (di Newton)
 - ▶ **Massa inerziale** e **massa gravitazionale**
 - ▶ Che significato ha g di **'mg'**?
⇒ **Forza per unità di massa** ⇒ **campo** (gravitazionale),
 $g = 9.8 \text{ N/kg}$
- ▶ **Principio di misura**
 - ▶ particolarmente interessante il caso dei termometri: → sito
- ▶ **Applicazione a misure di lunghezza:**
 - ▶ confronto diretto: → dimensione della Luna
 - ▶ opportune proporzioni (→ trigonometria):
 - ▶ Distanza della Minerva, etc. → **il pollice di Fermi**
 - ▶ uso curioso dell'asticella per selfie: → **distanza Terra-Luna**
 - ▶ tempo impiegato, nota la velocità
 - ▶ metro laser

Chiarimenti

- ▶ 'g': che senso ha parlare di **accelerazione di un oggetto fermo?**
- ▶ Forza di gravità e 'secondo principio' (di Newton)
 - ▶ **Massa inerziale** e **massa gravitazionale**
 - ▶ Che significato ha g di ' mg '?
⇒ **Forza per unità di massa** ⇒ **campo** (gravitazionale),
 $g = 9.8 \text{ N/kg}$
- ▶ **Principio di misura**
 - ▶ particolarmente interessante il caso dei termometri: → sito
- ▶ Applicazione a misure di lunghezza:
 - ▶ confronto diretto: → dimensione della Luna
 - ▶ opportune proporzioni (→ trigonometria):
 - ▶ Distanza della Minerva, etc. → **il pollice di Fermi**
 - ▶ uso curioso dell'asticella per selfie: → **distanza Terra-Luna**
 - ▶ tempo impiegato, nota la velocità
 - ▶ metro laser
- ▶ Misure dirette e misure indirette
(con commento fra '*misura*' ↔ '*misurazione*')
- ▶ Differenza fra laser del metro e laser del termometro

Chiarimenti

- ▶ 'g': che senso ha parlare di **accelerazione di un oggetto fermo?**
- ▶ Forza di gravità e 'secondo principio' (di Newton)
 - ▶ **Massa inerziale** e **massa gravitazionale**
 - ▶ Che significato ha g di ' mg '?
⇒ **Forza per unità di massa** ⇒ **campo** (gravitazionale),
 $g = 9.8 \text{ N/kg}$
- ▶ **Principio di misura**
 - ▶ particolarmente interessante il caso dei termometri: → sito
- ▶ Applicazione a misure di lunghezza:
 - ▶ confronto diretto: → dimensione della Luna
 - ▶ opportune proporzioni (→ trigonometria):
 - ▶ Distanza della Minerva, etc. → **il pollice di Fermi**
 - ▶ uso curioso dell'asticella per selfie: → **distanza Terra-Luna**
 - ▶ tempo impiegato, nota la velocità
 - ▶ metro laser
- ▶ Misure dirette e misure indirette
(con commento fra '*misura*' ↔ '*misurazione*')
- ▶ Differenza fra laser del metro e laser del termometro
→ altezza **provetta vuota/piena** (di acqua)

Incertezze di misura?

- ▶ “La Fisica è una scienza esatta”

Incertezze di misura?

- ▶ “La Fisica è una scienza esatta” ... **uhm**

Incertezze di misura?

- ▶ “La Fisica è una scienza esatta” ... uhm

*“As far as the laws of mathematics refer to reality,
they are not certain,*

Incertezze di misura?

- ▶ “La Fisica è una scienza esatta” ... uhm

*“As far as the laws of mathematics refer to reality,
they are not certain,
and as far as they are certain,
they do not refer to reality.”*

Incertezze di misura?

- ▶ “La Fisica è una scienza esatta” ... uhm

*“As far as the laws of mathematics refer to reality,
they are not certain,
and as far as they are certain,
they do not refer to reality.”
(A. Einstein)*

Incertezze di misura?

- ▶ “La Fisica è una scienza esatta” ... **uhm**

*“As far as the laws of mathematics refer to reality,
they are not certain,
and as far as they are certain,
they do not refer to reality.”
(A. Einstein)*

- ▶ $m_H = 125.20 \pm 0.11 \text{ GeV}$
- ▶ $m_{Z^0} = 91.1880 \pm 0.0020 \text{ GeV}$
- ▶ $m_W = 80.3992 \pm 0.0133 \text{ GeV}$
- ▶ $m_p = 938.27208816 \pm 0.00000029 \text{ MeV}$
- ▶ $m_e = 0.51099895000 \pm 0.00000000019 \text{ MeV}$
- ▶ etc. etc.

Incertezze di misura?

- ▶ “La Fisica è una scienza esatta” ... uhm

*“As far as the laws of mathematics refer to reality,
they are not certain,
and as far as they are certain,
they do not refer to reality.”
(A. Einstein)*

- ▶ $m_H = 125.20 \pm 0.11 \text{ GeV}$
- ▶ $m_{Z^0} = 91.1880 \pm 0.0020 \text{ GeV}$
- ▶ $m_W = 80.3992 \pm 0.0133 \text{ GeV}$
- ▶ $m_p = 938.27208816 \pm 0.00000029 \text{ MeV}$
- ▶ $m_e = 0.51099895000 \pm 0.00000000019 \text{ MeV}$
- ▶ etc. etc.

Ma $c = 299,792,458 \text{ m/s}$ (!)

Incertezze di misura?

Per ovvi motivi impossibile affrontare l'argomento oggi.

Incertezze di misura?

Per ovvi motivi impossibile affrontare l'argomento oggi.

Suggerimenti:

- ▶ nelle **misure dirette**, cercare di leggere al meglio i valori e cominciarci a farsi un'idea semiquantitativa dell'incertezza da associare al risultato;

Incertezze di misura?

Per ovvi motivi impossibile affrontare l'argomento oggi.

Suggerimenti:

- ▶ nelle **misure dirette**, cercare di leggere al meglio i valori e cominciarci a farsi un'idea semiquantitativa dell'incertezza da associare al risultato;
- ▶ nelle **misure dirette** (“risultato di calcoli a partire da misure dirette” – ma sempre misure sono!) provare a variare i valori di input e vedere ‘cosa succede’ al risultato.

Misura della densità del blocco di polistirolo

... con quel che segue ...

- ▶ critica del modello per la valutazione del volume

Misura della densità del blocco di polistirolo

... con quel che segue ...

- ▶ critica del modello per la valutazione del volume (... e di quale 'densità' stiamo parlando?).
- ▶ Nella valutazione della massa abbiamo dimenticato qualcosa...

Misura della densità del blocco di polistirolo

... con quel che segue ...

- ▶ critica del modello per la valutazione del volume (... e di quale 'densità' stiamo parlando?).
- ▶ Nella valutazione della massa abbiamo dimenticato qualcosa...
- ▶ 'Archimede' e 'terzo principio' *al lavoro*:
 - ▶ esperimento del dito nell'acqua

Misura della densità del blocco di polistirolo

... con quel che segue ...

- ▶ critica del modello per la valutazione del volume (... e di quale 'densità' stiamo parlando?).
- ▶ Nella valutazione della massa abbiamo dimenticato qualcosa...
- ▶ 'Archimede' e 'terzo principio' *al lavoro*:
 - ▶ esperimento del dito nell'acqua
 - ▶ un altro modo (molto più preciso!) per valutare il volume di piccoli solidi irregolari

Misura della densità del blocco di polistirolo

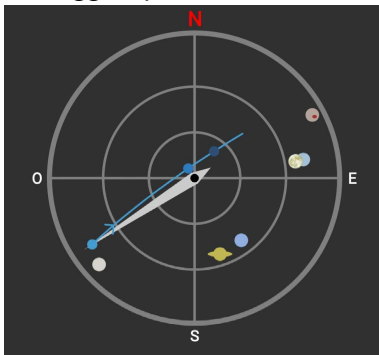
... con quel che segue ...

- ▶ critica del modello per la valutazione del volume (... e di quale 'densità' stiamo parlando?).
- ▶ Nella valutazione della massa abbiamo dimenticato qualcosa...
- ▶ 'Archimede' e 'terzo principio' *al lavoro*:
 - ▶ esperimento del dito nell'acqua
 - ▶ un altro modo (molto più preciso!) per valutare il volume di piccoli solidi irregolari
 - ▶ esperimenti di immersione progressiva: → vedi figura sul sito.

Passaggio stazione orbitale ISS

Fuori programma:

- Passaggio spettacolare della ISS domani sera!



→ <https://www.roma1.infn.it/~dagosa/misurando/>

- Che misura si sarebbe inventato Enrico Fermi con il suo pollice? (O noi usando il 'selfometro' modificato mostrato a lezione...) → Pensarci e possibilmente provare!

Conclusioni?

Conclusioni?

- ▶ “The times they are changing”

Conclusioni?

- ▶ “The times they are changing”
- ▶ Usate al meglio gli strumenti che avete, con spirito critico (inutile imparare *infinite cose* a mo' di pappagalli)

Conclusioni?

- ▶ “The times they are changing”
- ▶ Usate al meglio gli strumenti che avete, con spirito critico (inutile imparare *infinite cose* a mo' di pappagalli)
- ▶ Ricordate che
 - ▶ “Physical concepts are free creations of the human mind, and are not, however it may seem, uniquely determined by the external world.”

Conclusioni?

- ▶ “The times they are changing”
- ▶ Usate al meglio gli strumenti che avete, con spirito critico (inutile imparare *infinite cose* a mo' di pappagalli)
- ▶ Ricordate che
 - ▶ “Physical concepts are free creations of the human mind, and are not, however it may seem, uniquely determined by the external world.”
 - ▶ “As far as the laws of mathematics refer to reality, they are not certain,

Conclusioni?

- ▶ “The times they are changing”
- ▶ Usate al meglio gli strumenti che avete, con spirito critico (inutile imparare *infinite cose* a mo' di pappagalli)
- ▶ Ricordate che
 - ▶ “Physical concepts are free creations of the human mind, and are not, however it may seem, uniquely determined by the external world.”
 - ▶ “As far as the laws of mathematics refer to reality, they are not certain, and as far as they are certain, they do not refer to reality.”

Conclusioni?

- ▶ “The times they are changing”
- ▶ Usate al meglio gli strumenti che avete, con spirito critico (inutile imparare *infinite cose* a mo' di pappagalli)
- ▶ Ricordate che
 - ▶ “Physical concepts are free creations of the human mind, and are not, however it may seem, uniquely determined by the external world.”
 - ▶ “As far as the laws of mathematics refer to reality, they are not certain, and as far as they are certain, they do not refer to reality.”
 - ▶ “All models are wrong, but some are useful”

Conclusioni?

- ▶ “The times they are changing”
- ▶ Usate al meglio gli strumenti che avete, con spirito critico (inutile imparare *infinite cose* a mo' di pappagalli)
- ▶ Ricordate che
 - ▶ “Physical concepts are free creations of the human mind, and are not, however it may seem, uniquely determined by the external world.”
 - ▶ “As far as the laws of mathematics refer to reality, they are not certain, and as far as they are certain, they do not refer to reality.”
 - ▶ “All models are wrong, but some are useful”

E, infine, un suggerimento di lettura, con l'augurio che questo testo profondo ma senza una formula vi faccia venire qualche *buona idea*:

A. Einstein and L. Infeld, “The Evolution of Physics”

(Anche in italiano → cercare sul web)