

INTRODUZIONE AI PRINCIPI FONDAMENTALI DELLA FISICA DELLE PARTICELLE

Michelangelo Mangano
Physics Department, CERN
michelangelo.mangano@cern.ch
<http://cern.ch/mlm>

Parte I, 9/9/09, h.9

Visita CERN professori di fisica italiani



Hubble Ultra Deep Field
Hubble Space Telescope • Advanced Camera for Surveys

NASA, ESA, S. Beckwith (STScI) and the HUDF Team

STScI-PRC04-07a

**THE QUESTIONS ADDRESSED BY
PARTICLE PHYSICS ARE THE SAME THAT
GUIDED THE DEVELOPMENT OF NATURAL
PHILOSOPHY IN THE COURSE OF HISTORY**

- **HOW DOES THE UNIVERSE WORK?**
- **WHERE DOES IT COME FROM?**
- **WHERE IS IT GOING?**



- **WHAT ARE THE ULTIMATE COMPONENTS OF MATTER?**
- **HOW DO THEY “MOVE”**
- **WHAT “MOVES THEM”?**

**THE MOST AMBITIOUS AMONG ALL
SCIENCES!**

Even the approach followed by ancient philosophers is similar to the one used by the modern physicist:

to identify few fundamental principles, from which to derive the properties of all natural phenomena, both in the macrocosm (the sky, the Universe) and at the human scale

What has changed in the course of history is the perception of the true complexity of things, the ability to carry out quantitative measurements, and the epistemological criteria establishing the completeness of a given explanation and understanding

In common, the identification of two categories:

(a) The components of matter

(b) The forces that govern their behaviours

Example

Components:

air, water, fire, earth

Forces:

- air and fire pushed upwards
- earth and water pulled downwards

Judgement of correctness:

how come a tree falls in the water, but then gets pushed up and floats?

Reevaluation of the theory (Archimedes)

- **all** matter is pulled downwards, but with intensity proportional to its weight:

A body immersed in water receives a push upwards equal to the weight of the displaced water

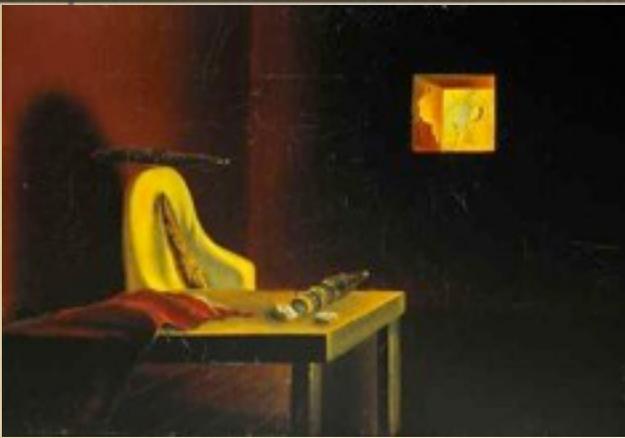
Air is lighter than the rock, therefore it floats on top of it. Warm air is lighter than cold air, and by it it's pushed up.

Si noti che non esiste garanzia a priori che la natura possa essere descritta da un numero limitato di principi, o che questi valgano ovunque e sempre.

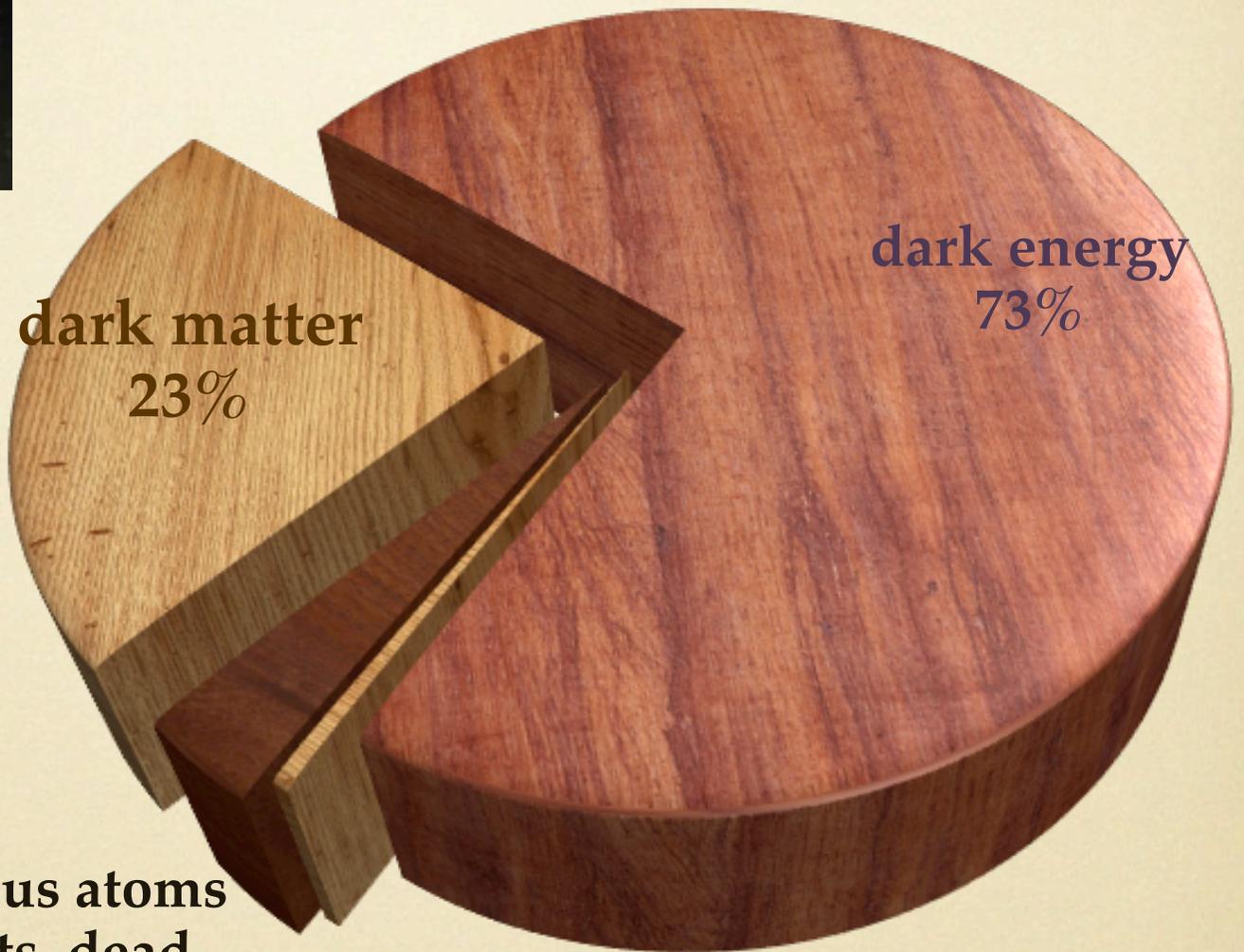
Per es., la conservazione dell'energia su scala microscopica e' stata messa in dubbio dai primi studi quantitativi dei decadimenti beta nucleari, negli anni 20..

Il grande successo della fisica moderna e' nella sua descrizione, incredibilmente accurata, della totale moltitudine dei fenomeni naturali osservati

Per questa ragione, oggi ci aspettiamo che tutti i rami della fisica e delle altre scienze siano infine riducibili alla fisica delle particelle



S. Dalí,
L'homme invisible,
1932



non-luminous atoms
(e.g. planets, dead
stars, dust, etc), ~4%

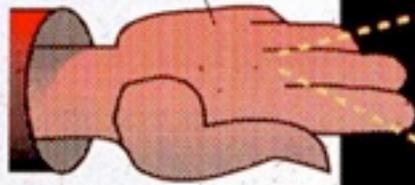
stars, neutrinos,
photons ~0.5%

- Le sorgenti dell' **Inflazione cosmica** e della **materia oscura** ed **energia oscura** che, rispettivamente, hanno plasmato l'origine e determineranno il futuro della struttura su larga scala dell'universo, vanno ricercate entro lo spettro di particelle e forze che formeranno la "*teoria del tutto*" (*theory of everything*) finale.
- La comprensione del **Big Bang** e di ciò che l'ha preceduto, richiede la comprensione del comportamento della natura in presenza di campi gravitazionali così intensi da essere soggetti alle leggi della meccanica quantistica. (Quantum Gravity).

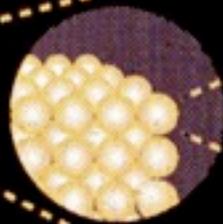
Livello 0: cosa? come?

- Esistono componenti elementari e fondamentali?
- Se si', cosa sono?
- Come interagiscono fra loro?
- Come determinano le proprieta' dell'universo?

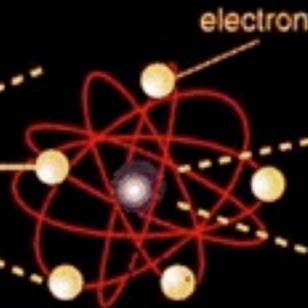
MATTER



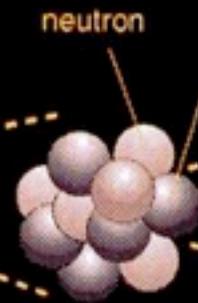
ATOM



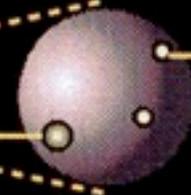
NUCLEUS



PROTON



QUARK



ALL ORDINARY MATTER BELONGS TO THIS GROUP.



LEPTONS

electron

Electric charge -1 .

Responsible for electricity and chemical reactions

electron neutrino

Electric charge 0 .

Rarely interacts with other matter.

QUARKS

up

Electric charge $+2/3$.

Protons have 2 up quarks
Neutrons have 1 up quark

down

Electric charge $-1/3$.

... and one down quark.
... and two down quarks.

THESE PARTICLES EXISTED JUST AFTER THE BIG BANG.



NOW THEY ARE FOUND ONLY IN COSMIC RAYS AND ACCELERATORS.

muon

A heavier relative of the electron.



muon neutrino

Created with muons when some particles decay.



charm

A heavier relative of the up.



strange

A heavier relative of the down.



tau

Heavier still.



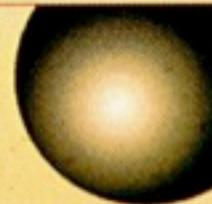
tau neutrino

Not yet observed directly.



top

Heavier still, recently observed.



bottom

Heavier still.



ANTIMATTER

Each particle also has an antimatter counterpart ... sort of a mirror image.



Interazioni (o “forze”)

- Responsabili di:
 - Formazione di **stati legati** ($E < 0$):
 - Terra-sole
 - Elettrone-nucleo
 - Processi di **collisione/diffusione** ($E > 0$):
 - Moto di elettroni in un metallo
 - Propagazione della luce
 - Deflessione di particelle cariche in moto in un campo elettromagnetico per es. i protoni nell' LHC
 - **Transmutazioni:**
 - transizioni atomiche (emissione di radiazione quanto un elettrone cambia orbita)
 - Decadimenti ($n \rightarrow p$ e neutrino, radioattività)

The fundamental interactions:

vector bosons, $\text{spin} = \hbar/2\pi$

FORCE	COUPLES TO:	FORCE CARRIER:
Electromagnetism	electric charge	photon ($m=0$)
“weak” force	“weak” charge	W^\pm ($m=80$) Z^0 ($m=91$)
“strong” force	“colour”	8 gluons ($m=0$)

tensor boson, $\text{spin} = 2 \hbar/2\pi$

gravity	energy	graviton ($m=0$)
---------	--------	--------------------

scalar boson, $\text{spin} = 0$

	mass	Higgs ($m=??$)
--	------	----------------------------------

Principali risultati concettuali

- *Semplicita'* (dei componenti fondamentali, e delle loro interazioni): la complessita' emerge dalla gran varieta' di combinazioni di aggregati di oggetti elementari (come il gioco dei LEGO!)
- *Unita'* (delle leggi di interazione)
- *Unita'* (degli elementi):

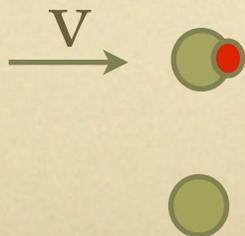
“un protone e' un portone e' un protone”
- *Unicita'* (delle leggi fondamentali): indipendenti da posizione, tempo e condizioni esterne

I principi fondamentali della fisica, e le particelle elementari

- Le particelle elementari sono soggette agli stessi principi fondamentali della fisica che si imparano a scuola:
 - “ $F=ma$ ”
 - causalita' (la causa precede l'effetto)
 - conservazione dell'energia (E), impulso (p) e momento angolare (L) (invarianza delle leggi fisiche rispetto a traslazioni spaziali e temporali e rotazioni)
 - Principio della relativita' speciale (Einstein)
 - Meccanica quantistica (dualita' onda-particella, principio di indeterminazione, quantizzazione dei livelli energetici, etc.)

Principi e conseguenze della relativita' speciale

- Nessun segnale / informazione puo' propagarsi a velocita' maggiore della luce
- Le leggi della fisica sono le stesse in due sistemi di riferimento in moto relativo costante
 - non c'e' sistema di riferimento privilegiato, o "centro dell'universo"
 - la luce ha la stessa velocita' in tutti i sistemi di riferimento
 - lo scorrere del tempo e' "relativo"



Principi e conseguenze della relativita' speciale

- Nessun segnale / informazione puo' propagarsi a velocita' maggiore della luce
- Le leggi della fisica sono le stesse in due sistemi di riferimento in moto relativo costante
 - non c'e' sistema di riferimento privilegiato, o "centro dell'universo"
 - la luce ha la stessa velocita' in tutti i sistemi di riferimento
 - lo scorrere del tempo e' "relativo"



Principi e conseguenze della relativita' speciale

- Nessun segnale / informazione puo' propagarsi a velocita' maggiore della luce
- Le leggi della fisica sono le stesse in due sistemi di riferimento in moto relativo costante
 - non c'e' sistema di riferimento privilegiato, o "centro dell'universo"
 - la luce ha la stessa velocita' in tutti i sistemi di riferimento
 - lo scorrere del tempo e' "relativo"

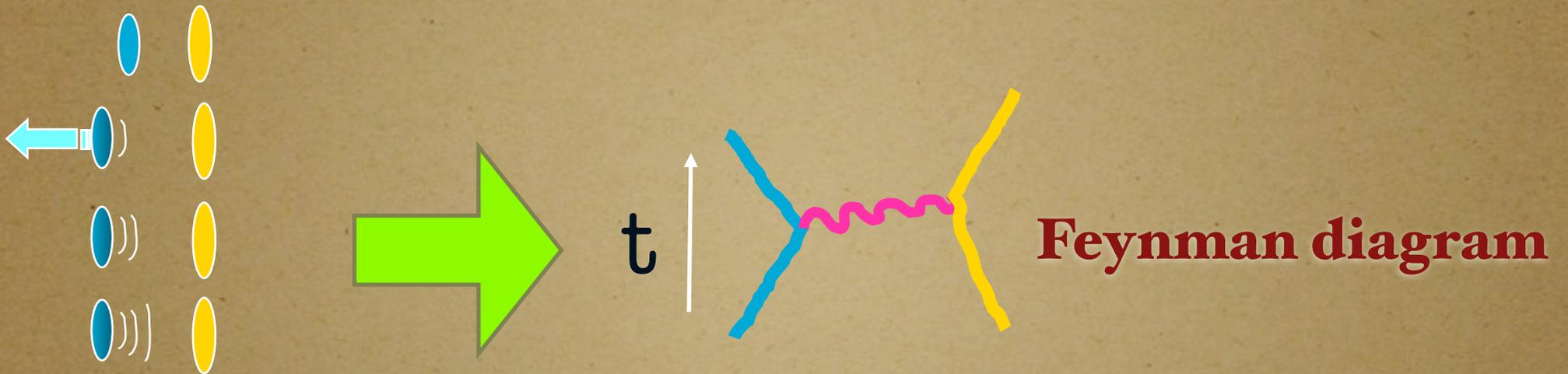




Il ruolo della Relativita' Speciale

- Le particelle elementari hanno masse piccolissime, e le forze tipiche presenti negli acceleratori e nell'universo le accelerano a velocita' vicine a quella della luce. La descrizione del loro comportamento deve essere consistente con le leggi della Relativita' Speciale (Einstein).
- In particolare, ogni modello delle interazioni fra particelle elementari deve rispettare il principio che le forze non possono essere trasmesse istantaneamente, ma al piu' alla velocita' della luce

The representation of interactions



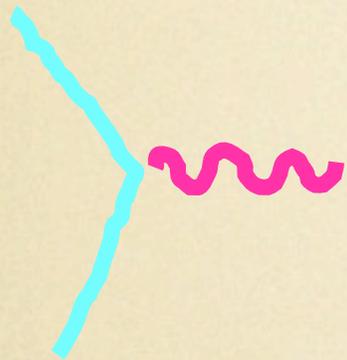
Locality

N.B.: in meccanica quantistica onde e particelle sono rappresentazioni diverse ma equivalenti dello stesso oggetto. Dunque all'onda che trasmette il segnale dell'interazione associamo una particella

Proprieta' delle interazioni

- **Localita'** (le proprieta' delle interazioni dipendono solo dalle proprieta' dei partecipanti in un punto definito dello spazio-tempo)
- **Causalita'** (l'effetto segue la causa. Non puo' manifestarsi prima del tempo necessario perche' un segnale di luce possa coprire la distanza fra causa ed effetto.)
- **Universalita'** (l'interazione fra 2 particelle fattorizza in termini delle proprieta' delle particelle singole (per es. la loro carica)

Semplice ... ma sottile!



prima: ●

dopo: ● + ●

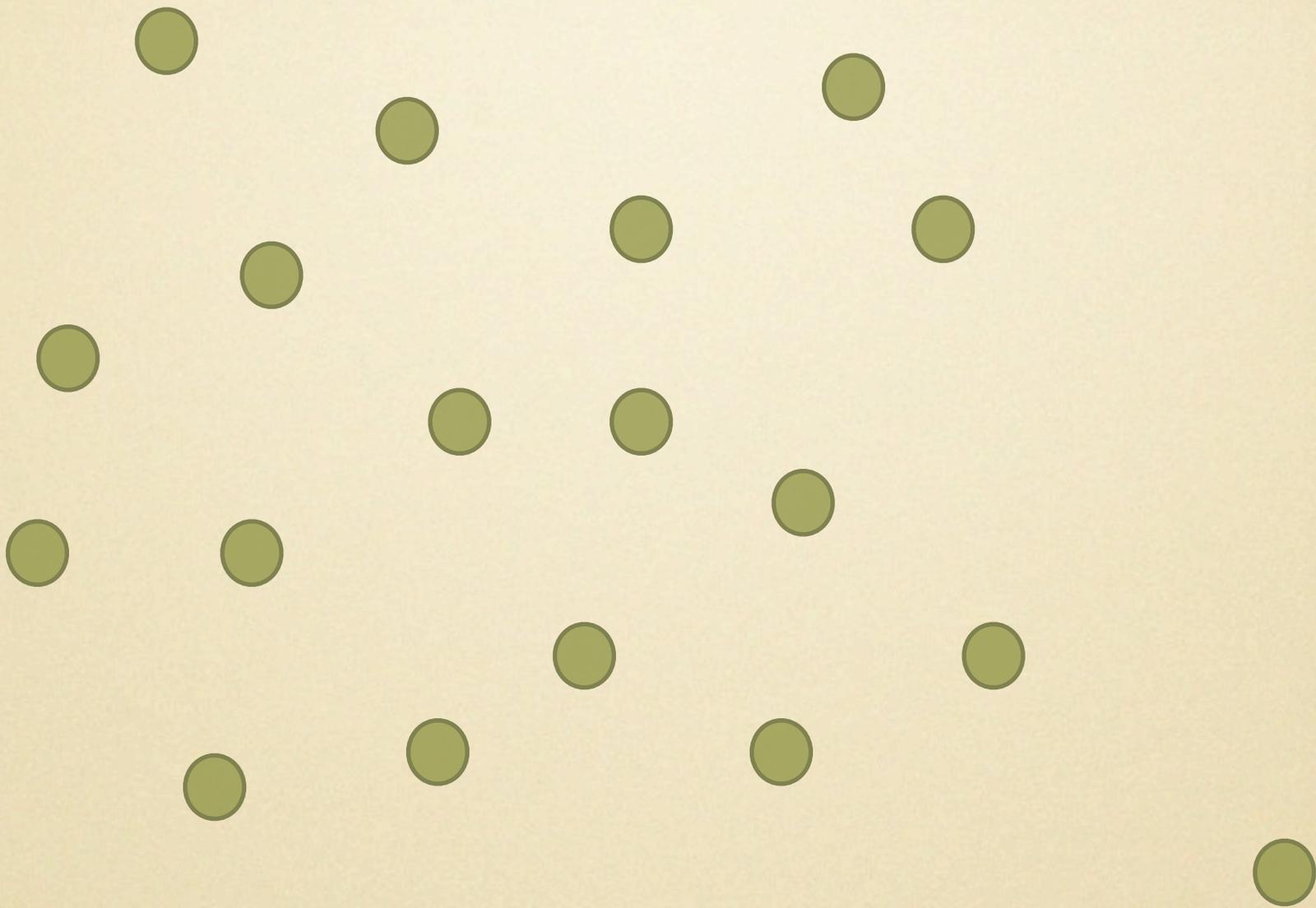


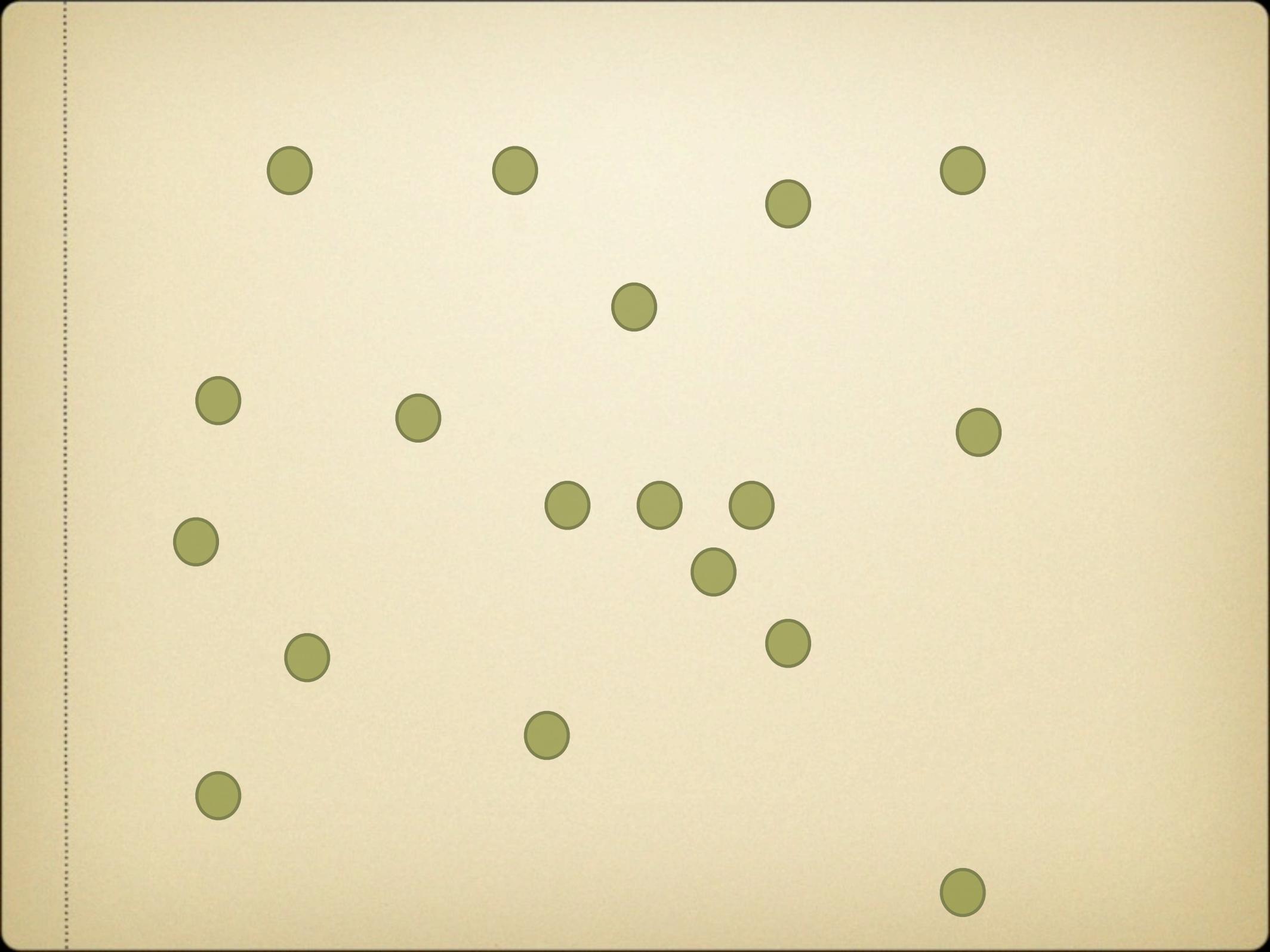
Energy(after) \neq Energy(before)

**Cosa succede alla
conservazione dell'energia ?!**

Contate veloci!



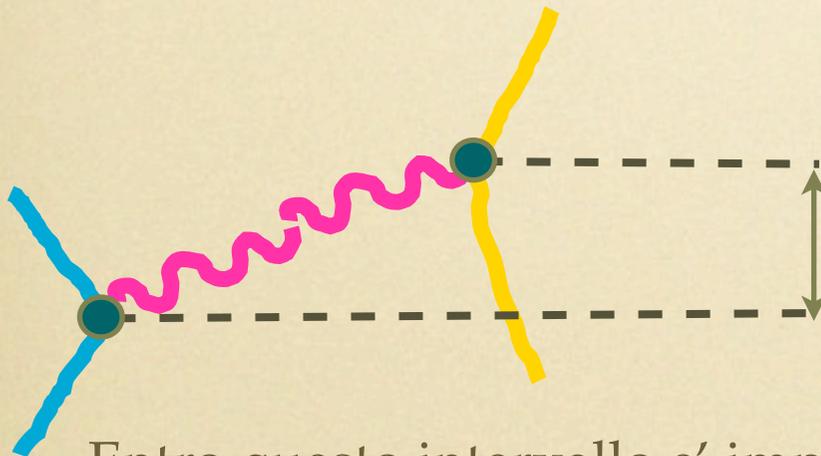
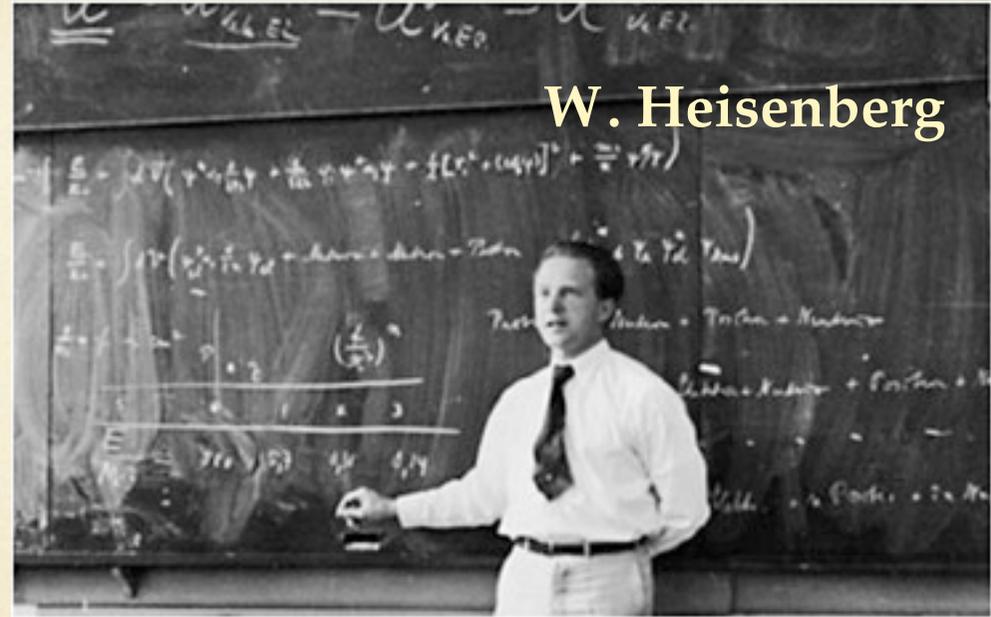




Quantum mechanics

Heisenberg uncertainty principle:

una misura di energia
eseguita entro un tempo Δt
puo' al piu' raggiungere
una precisione $\Delta E \geq \hbar/\Delta t$



$$\Delta t < \hbar/\Delta E$$

Entro questo intervallo e' impossibile determinare se l'energia e' conservata o meno, poiche' non possiamo misurarla con sufficiente accuratezza! Dunque e' possibile "barare" con la natura, e permettere lo scambio di energia fra le due particelle, effettuandolo entro Δt