

Cos'è l'Energia

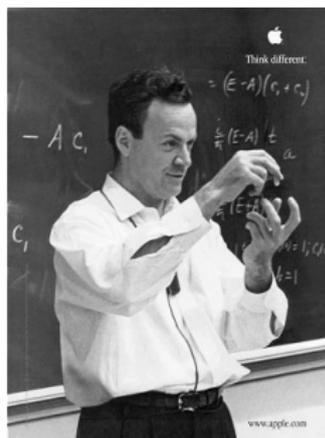
Nicola Cabibbo

Dipartimento di Fisica
Università di Roma "La Sapienza"
INFN — Sezione di Roma

Incontri di Fisica — 4 Ottobre 2006

Cos'è l'energia

- 1 Meccanica Classica
- 2 Calore e Termodinamica
- 3 Gli Acceleratori di Particelle
- 4 Invarianza e Leggi di Conservazione
- 5 Meccanica Quantistica e Relatività
- 6 Le Particelle
- 7 Il Cosmo



C'è un fatto, o se volete una legge, che governa i fenomeni naturali sinora noti. Non ci sono eccezioni a questa legge — per quanto ne sappiamo è esatta. La legge si chiama “conservazione dell’energia”, ed è veramente una idea molto astratta, perchè è un principio matematico: dice che c'è una grandezza numerica, che non cambia qualsiasi cosa accada. Non descrive un meccanismo, o qualcosa di concreto: è solo un fatto un po' strano: possiamo calcolare un certo numero, e quando finiamo di osservare la natura che esegue i suoi giochi, e ricalcoliamo il numero, troviamo che non è cambiato...

Richard Feynman,
Le Lezioni di Feynman, Vol. I



Velocità

In assenza di forze un corpo si muove con velocità uniforme. Questo principio è alla base della relatività del moto —
Relatività Galileiana.

Urto

Per il caso di più particelle occorre passare a grandezze conservate che tengano conto della loro massa, la **Quantità di moto** (Newton, Cartesio) o la **forza viva** (Leibnitz), l'odierna **energia cinetica**.

Quantità di moto

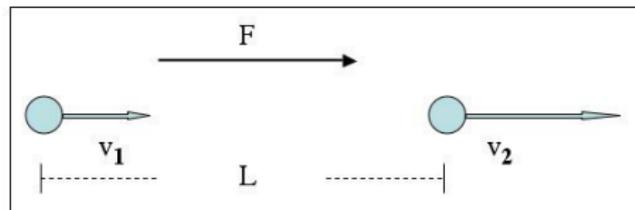
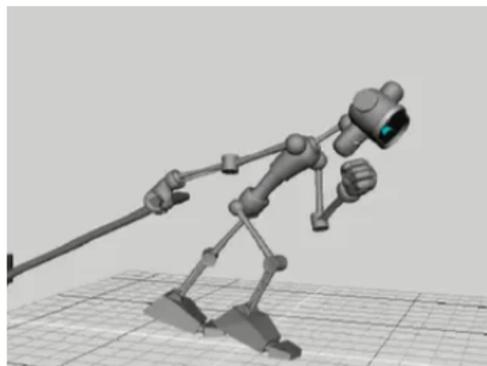
$$\vec{P} = \sum m\vec{v}$$

Energia cinetica

$$T = \sum \frac{1}{2}mv^2$$

-
- 1 \vec{P} e \vec{v} sono dei **vettori**: hanno un valore numerico e una direzione.
 - 2 \vec{P} e T sono la somma dei contributi delle singole particelle.

L'energia in presenza di forze



Dalla seconda legge di Newton

$$F = ma$$

segue che l'energia cinetica aumenta per effetto del lavoro $F \times L$ eseguito da una forza F :

$$\frac{1}{2}mv_2^2 = \frac{1}{2}mv_1^2 + F \times L$$

Il lavoro — prodotto della forza applicata per la distanza su cui opera esprime il trasferimento di energia tra un sistema e un'altro.

Lavoro=Forza \times Distanza

In presenza di forze l'energia cinetica $Mv^2/2$ e la quantità di moto $M\vec{v}$ non si conservano, ma si conserva l'energia totale

$$E = T + V(x)$$

dove $V(x)$ è l'energia potenziale.

Il lavoro prodotto dalla forza si può esprimere come differenza di energia potenziale tra due punti:

$$F \times L = V(L) - V(0)$$

Se V fosse costante (indipendente da x) la forza sarebbe nulla e la quantità di moto $M\vec{v}$ sarebbe conservata.

SistemaSolare

La attrazione gravitazionale tra due corpi è descritta da un potenziale

$$V(x_1, x_2) = \frac{GM_1 M_2}{R}$$

dove R è la distanza tra i due corpi.

Daniel Bernoulli e la cinetica dei gas — Hydrodinamica 1738

408 (200) 500

HYDRODYNAMICÆ

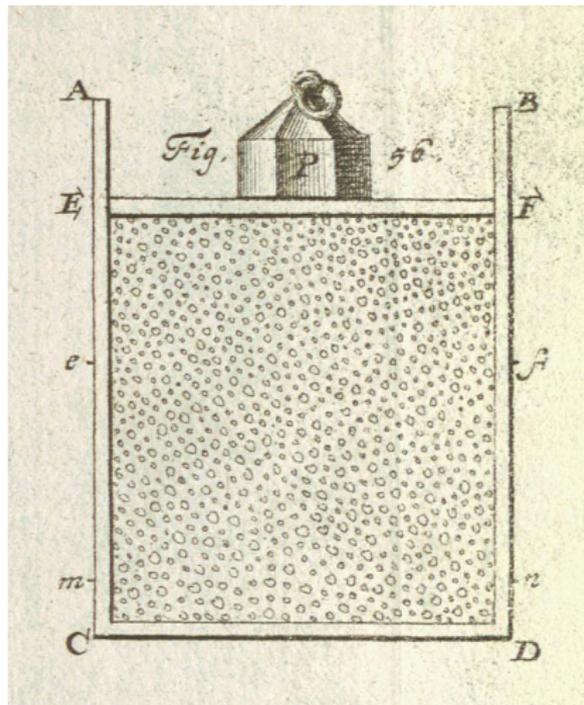
SECTIO DECIMA.

De affectionibus atque motibus fluidorum elasticorum, præcipue autem aëris.

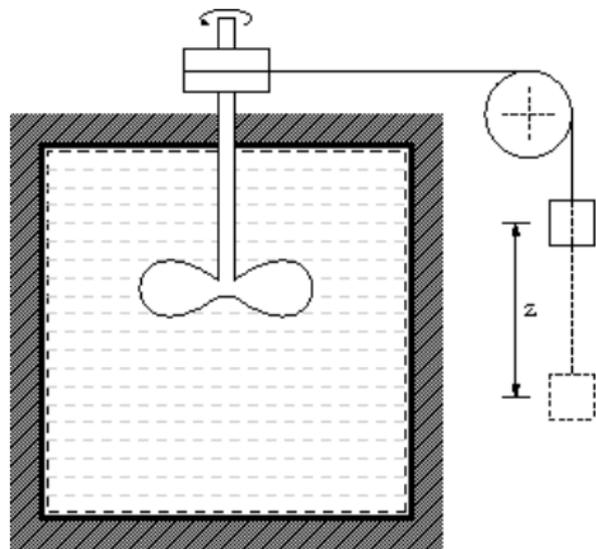
§. I.

Fluida nunc elastica consideraturis licebit nobis talem iis affingere constitutionem, quæ cum omnibus adhuc cognitis conveniat affectionibus, ut sic ad reliquas etiam nondum satis exploratas detur aditus. Fluidorum autem elasticorum præcipue affectiones in eo posite sunt: 1°. ut sint gravia, 2°. ut se in omnes plagas explint, nisi contineantur, & 3°. ut se continue magis magisque comprimantur crescentibus potentiis compressionis: Ita comparatus est aër, ad quem potissimum præsentis nostræ pertinent cogitationes.

Fig. 56. §. 2. Finge itaque vas cylindricum verticaliter positum $A C D B$ (Fig. 56.) atque in illo operculum mobile $E F$, cui pondus P super incumbent: contineat cavitas $E C D F$ corpuscula minima motu rapidissimo hinc inde agitata: sic corpuscula, dum impingunt in operculum $E F$ idemque suis sustinent impetibus continue repetitis fluidum componunt elasticum quod remoto aut diminuto pondere P sese expandit: quod eodem aucto condensatur & quod in fundum horizontalem $C D$ haud aliter gravitat, ac si nulla virtute elastica esset præditum: sive enim quiescant corpuscula sive agitentur, non mutant gravitatem, ita ut fundum tum pondus tum elasticitatem fluidi sustineat. Tale igitur fluidum quod cum primariis convenit fluidorum elasticorum affectionibus substituemus aëri, atque sic alias, quæ jam in aëre detectæ fuerunt explicabimus aliasque nondum satis perpenas ulterius illustrabimus proprietates.



Joule e l'equivalenza tra energia e calore — 1845



Il lavoro eseguito da un peso che cade si trasforma in energia del fluido, quindi in calore.

Joule determinò il corrispettivo termico dell'energia

$$1 \text{ Joule} = 4.41 \text{ calorie}$$

“Vediamo quindi quale enorme quantità di *vis viva* esista nella materia. In una libra di acqua a 60° sarebbe pari a ... quella acquisita da un peso di 415036 libbre che cade per un piede”

James P. Joule, Esq.

Irreversibilità

La trasformazione di calore in energia utile è regolata dalla seconda legge della termodinamica che affonda le sue basi nella irreversibilità dei processi che involgono moltissime particelle.

Ma questo ci porterebbe lontano...

Ciclotrone

<http://www.phy.ntnu.edu.tw/ntnujava/>

In un ciclotrone la particella si muove in un campo magnetico che la mantiene in orbita, e un campo elettrico alternato sincronizzato con il periodo di rotazione.

Notiamo un fatto interessante:
l'accelerazione in una macchina circolare dipende in modo essenziale dal fatto che la forza applicata dipende dal tempo.

L'energia $E = T + V$ si conserva se e solo se V non dipende dal tempo.

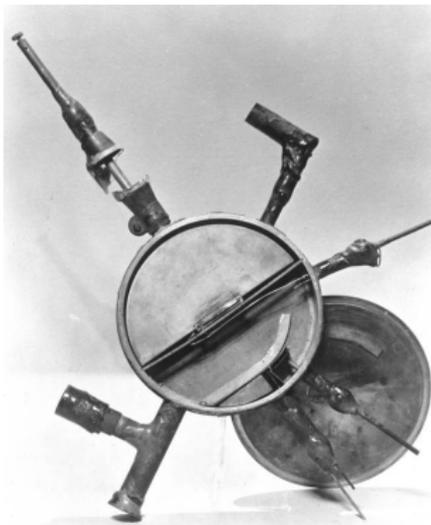
Abbiamo visto che:

- 1 La **quantità di moto** si conserva se $V(x)$ non dipende da x .
- 2 L'**energia** $E = T + V$ si conserva se V non dipende dal tempo t .

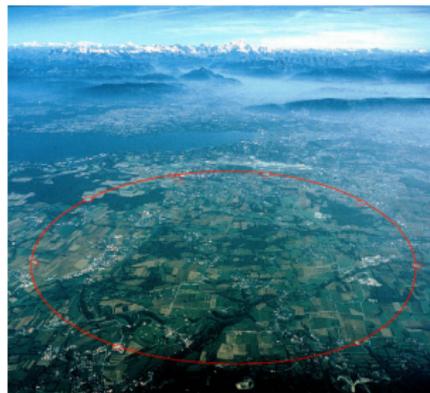
Sono esempi di un fatto profondo e generale: ad ogni proprietà di invarianza — dal tempo, dalla posizione — corrisponde una grandezza conservata.

L'origine di questa connessione tra tempo ed energia, spazio e quantità di moto, si capisce molto meglio in meccanica quantistica.

L'evoluzione degli acceleratori.



Da dieci centimetri a decine di
chilometri
Verso energie sempre più alte.
Vedremo perchè



Una introduzione brutale alla Meccanica Quantistica

Ad una particella di energia E e quantità di moto P corrisponde un'onda che esprime la probabilità di trovare la particella in un dato punto a un dato tempo.

Tutto quello che volevate sapere sullo stato della particella

Dati E e P , lunghezza d'onda e frequenza sono date dalle seguenti relazioni: se definiamo la *pulsazione* ω e il *numero d'onde* k ,

$$\omega = \frac{2\pi}{t} = 2\pi\nu; \quad k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

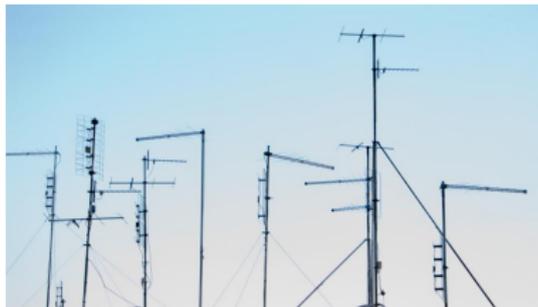
dove λ è la lunghezza d'onda, t il periodo di oscillazione, ν la frequenza,

$$E = \hbar\omega; \quad P = \hbar k$$

Dove \hbar è la costante di Planck,

$$\hbar = 1.055 \cdot 10^{-27} \text{ erg sec} = 6.58 \cdot 10^{-22} \text{ MeV sec}$$

Il Principio di Indeterminazione

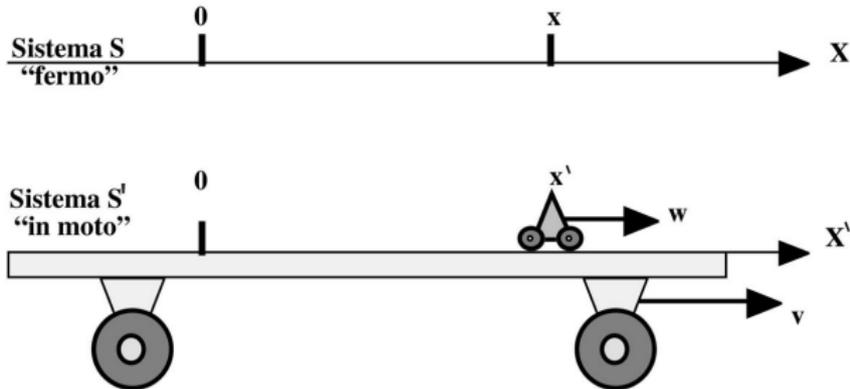
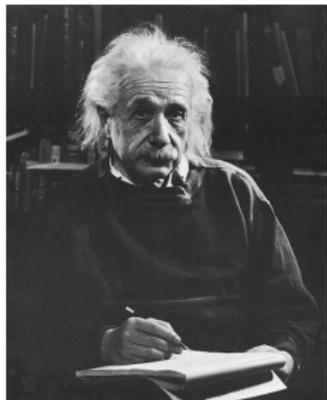


Quanto è “grande” l’incertezza sulla posizione di un elettrone?
Quanto è grande un’onda elettromagnetica? Guardate alle antenne —
i costruttori assicurano di fare il loro meglio per coglierla tutta!
L’incertezza è circa eguale alla lunghezza d’onda:

$$\Delta X \sim \lambda \sim \hbar/P$$

Per guardare in piccolo nella struttura della materia occorrono
radiazioni (particelle) con piccola lunghezza d’onda, quindi grande
quantità di moto ed energia.

$E=Mc^2$ — La relatività in due schermate.



La relatività è in realtà molto semplice. Tutto comincia dal fatto che la velocità della luce è la stessa in qualsiasi sistema di riferimento, anche in moto relativo tra loro. Da questo segue che la grandezza $(x^2 - c^2 t^2)$ deve essere eguale in qualsiasi sistema di riferimento,

$$x'^2 - c^2 t'^2 = x^2 - c^2 t^2$$

e da questo segue (con semplici passaggi) tutto il resto.

$E=Mc^2$ — Passando per la meccanica quantistica

Una dimostrazione semplice-semplice: Considerate un'onda-particella

$$\sin(kx - \omega t)$$

Se l'onda si annulla in un punto (cioè la particella non è lì), questo deve essere vero in qualsiasi sistema di riferimento. Quindi

$$(k'x' - \omega't') = (kx - \omega t)$$

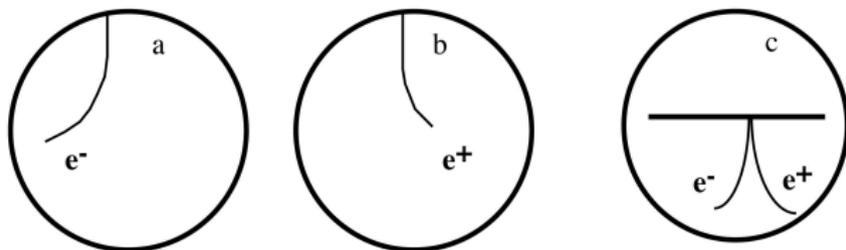
e anche (ma qui occorrerebbe qualche passaggio...),

$$\omega'^2 - c^2 k'^2 = \omega^2 - c^2 k^2$$

Quindi, dato che $E = \hbar\omega$, $P = \hbar k$, $(E^2 - c^2 P^2)$ è una grandezza invariante che possiamo identificare con la massa della particella,

$$(E^2 - c^2 P^2) = (M c^2)^2$$

$E=Mc^2$ — Il perché degli acceleratori



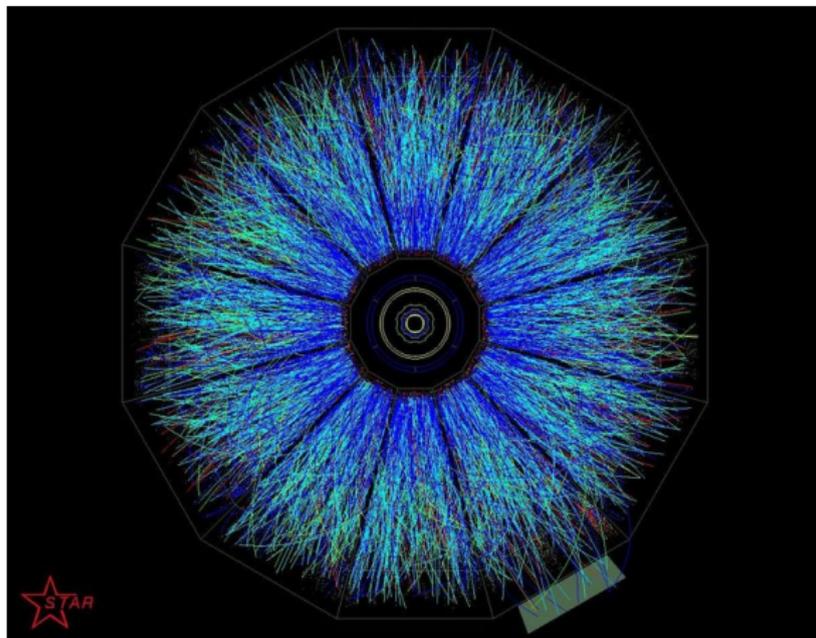
Due ragioni per andare a energie sempre più alte

- 1 L'energia e la massa sono equivalenti: ad alte energie possiamo produrre particelle di grande massa e studiarne le proprietà.
- 2 Alta energia significa piccola lunghezza d'onda, quindi la possibilità di esplorare le più piccole strutture della materia.

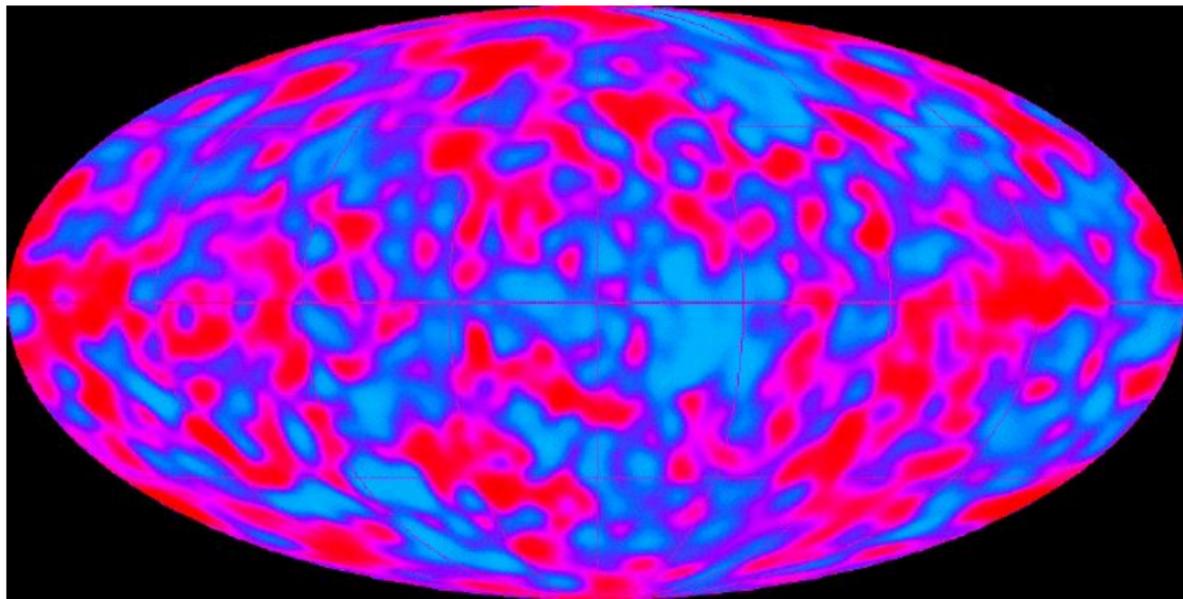
a,b — 1932 — C. D. Anderson scopre il positrone nella radiazione cosmica.

c — 1933 — Blackett, Chadwick, Occhialini, Produzione di coppie elettrone positrone.

$E=Mc^2$ — Produzione di particelle



Urto di due nuclei d'oro a 100+100 GeV nell'acceleratore RHIC di Brookhaven (2005). Gran parte delle tracce sono mesoni π^\pm



La radiazione infrarossa dell'universo primordiale vista dal satellite COBE — Premio Nobel per la Fisica 2006.

L'Energia e la storia dell'Universo

