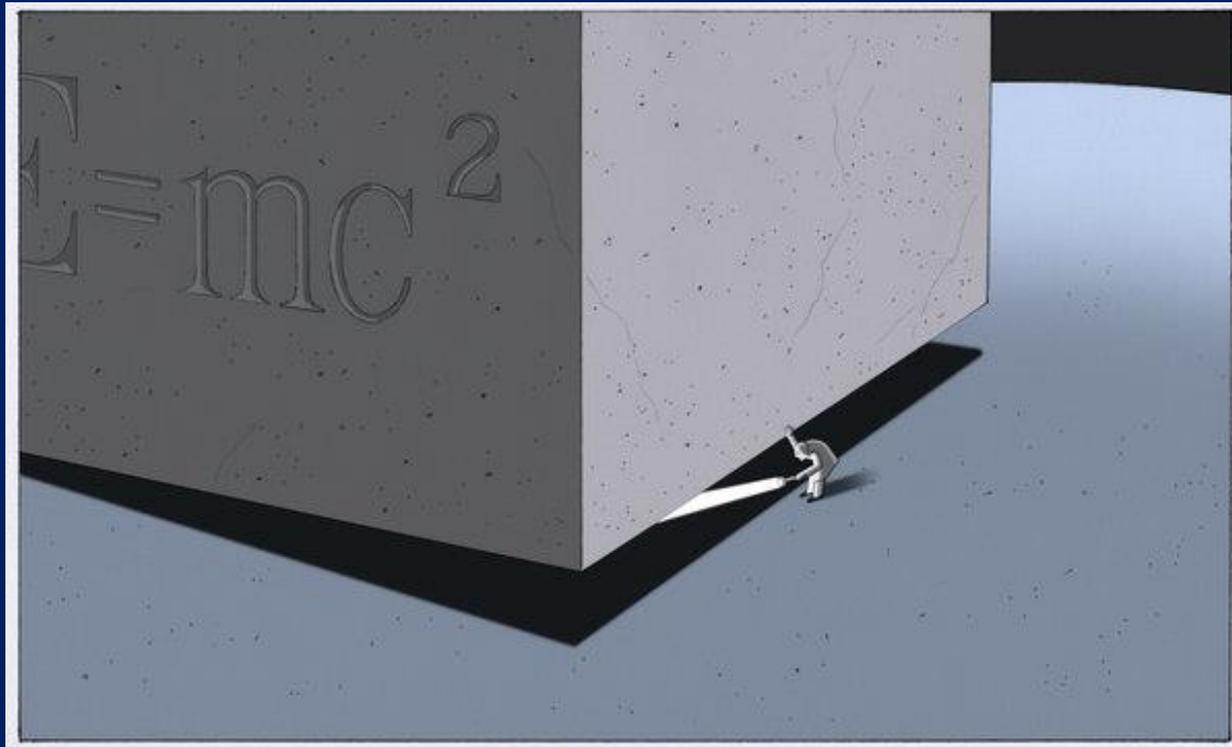


# Storia e interpretazioni di una formula molto famosa



Fabio Bevilacqua

- Background: una equazione tra energia, massa elettromagnetica,  $c^2$  precede la teoria della relatività
- Gli sviluppi del progetto Manhattan hanno influenza anche sulla storia della fisica e sulla didattica: i libri di testo sono influenzati dal dibattito scientifico.
- Il dibattito sul significato dell'equazione e' ancora molto vivo
- Einstein ha elaborato 18 tentativi di dimostrazione in 40 anni. L'equazione esprime più un principio corroborato che un risultato.
- Negli anni 30 l'equazione era accettata come strumento di indagine sulla struttura del nucleo. Solo dopo la determinazione della fissione la possibilità di una reazione a catena la mette in primo piano
- I punti di vista di Wheeler, Bondi, Wilczek sull'origine della massa
- Inerzia dell'energia, no conversione massa-energia ma energia potenziale-cinetica, no equivalenza, tentativi di eliminare la «massa»
- Open access a tantissimi documenti on line. Traduzioni on line

Massa

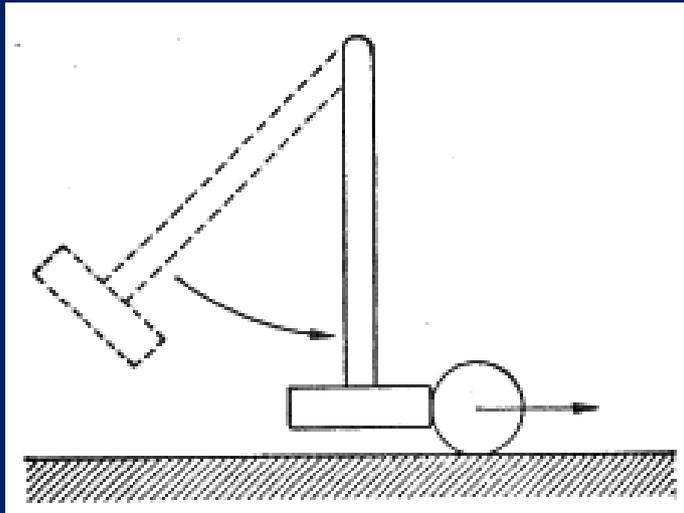
Energia

Materia

Radiazione

# Newton: massa inerziale e gravitazionale

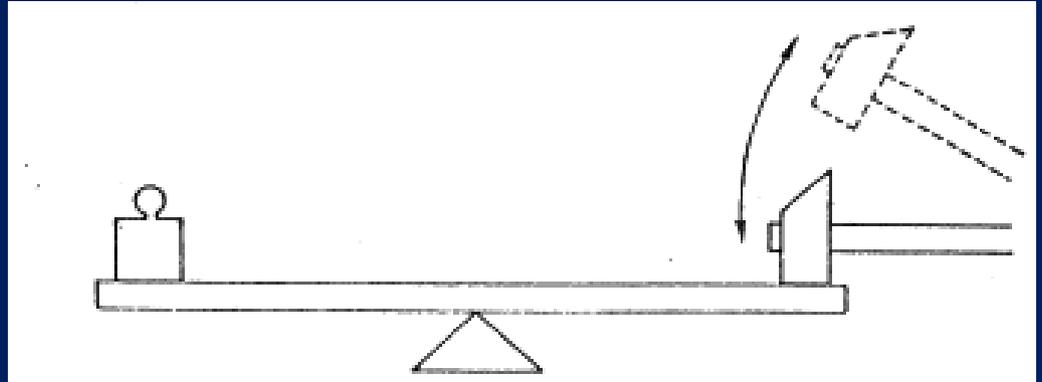
$$F = m_i a$$



$$F = K m_g M / R^2$$

$$\text{Poniamo: } g = K M / R^2$$

$$P = m_g g$$



$$P = F$$

$$m_g g = m_i a$$

dato che  $m_i = m_g$

$$a = g$$

# Maxwell-Lorentz

$$\mathbf{F} = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad (\text{Forza di Lorentz})$$

$$\rightarrow \nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (\text{Legge di Gauss})$$

$$\rightarrow \nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (\text{Legge di Faraday})$$

$$\mathbf{E} = -\nabla\phi - \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t}$$

In un conduttore  $\mathbf{E}$  produce correnti.

$$\rightarrow \nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (\text{Non esistono cariche magnetiche})$$

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}$$

$$\rightarrow c^2 \nabla \times \mathbf{B} = \frac{\mathbf{J}}{\epsilon_0} + \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$$

# JJ Thomson: Elettrone

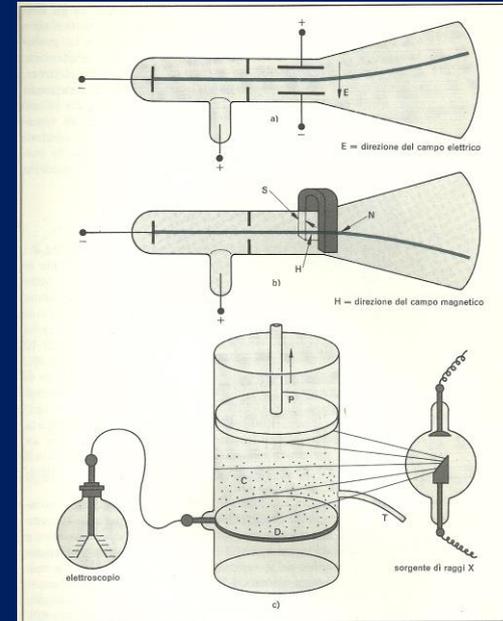


Fig.79 La misura della massa dell'elettrone secondo J. J. Thomson: a) la deflessione di un fascio di elettroni in un campo elettrico permette di misurare il rapporto  $mv^2/e$ ; b) la deflessione in un campo magnetico permette di misurare  $mv/e$ ; c) la velocità di caduta delle goccioline che si fermano sotto l'azione di radiazioni ionizzanti permette di misurare  $e$ . Dai risultati di a) e di b) si deduce  $e/m$ ; da questo rapporto e da c) si ricava  $m$ .

# Massa elettromagnetica

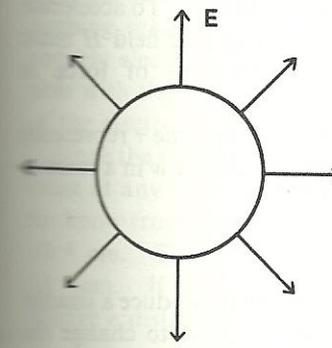


Fig. 107 The electric field around a charge at rest.

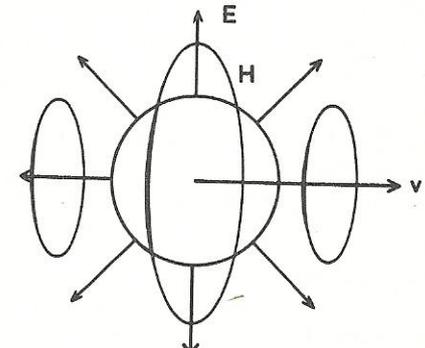


Fig. 108 The electric field around a charge is supplemented by a magnetic field when it is moved.

# Feynman: Massa elettromagnetica

## 28-3 La massa elettromagnetica

**Da dove viene la massa?** Nelle leggi della meccanica si è supposto che ciascun oggetto “porti” con sé una cosa che chiamiamo la massa, il che vuole anche dire che “porta” un impulso proporzionale alla sua velocità. Adesso scopriamo come arrivare a capire che una particella carica porta un impulso proporzionale alla sua velocità. Potrebbe darsi, effettivamente, che la massa non fosse che un effetto di elettrodinamica. **Finora l'origine della massa non è stata spiegata:** nella teoria dell'elettrodinamica abbiamo finalmente una magnifica occasione di capire qualcosa che non si era mai capito prima. Sembra pioverci dal cielo — ma in realtà discende da Maxwell e Poynting — la nozione che qualunque particella carica ha un impulso proporzionale alla sua velocità come effetto di pure influenze elettromagnetiche.

Procediamo con moderazione e diciamo per il momento che ci sono due sorta di massa e che l'impulso totale di un oggetto potrebbe essere la somma di un impulso meccanico e di un impulso elettromagnetico. L'impulso meccanico è dato dalla massa “meccanica”,  $m_{\text{mecc}}$  moltiplicata per  $v$ . Nelle esperienze in cui si misura la massa di una particella andando a vedere quanto impulso possiede o come si deflette secondo una certa orbita, quella che viene misurata è la massa totale. Diremo in generale che l'impulso è dato dalla massa totale ( $m_{\text{mecc}} + m_{\text{el}}$ ) moltiplicata per la velocità. Perciò la massa osservata può consistere di due porzioni (o forse più, se si includono altri campi): una porzione meccanica, più una porzione elettromagnetica. Sappiamo che c'è sicuramente una porzione elettromagnetica e per essa possediamo una formula e c'è l'entusiasmante possibilità che la porzione meccanica non esista affatto: che tutta la massa sia elettromagnetica.

## 28-3 Electromagnetic mass

Where does the mass come from? In our laws of mechanics we have supposed that every object “carries” a thing we call the mass—which also means that it “carries” a momentum proportional to its velocity. Now we discover that it is understandable that a charged particle carries a momentum proportional to its velocity. It might, in fact, be that the mass is just the effect of electrodynamics. The origin of mass has until now been unexplained. We have at last in the theory of electrodynamics a grand opportunity to understand something that we never understood before. It comes out of the blue—or rather, from Maxwell and Poynting—that any charged particle will have a momentum proportional to its velocity just from electromagnetic influences.

Let's be conservative and say, for a moment, that there are two kinds of mass—that the total momentum of an object could be the sum of a mechanical momentum and the electromagnetic momentum. The mechanical momentum is the “mechanical” mass,  $m_{\text{mech}}$ , times  $v$ . In experiments where we measure the mass of a particle by seeing how much momentum it has, or how it swings around in an orbit, we are measuring the total mass. We say generally that the momentum is the total mass ( $m_{\text{mech}} + m_{\text{elec}}$ ) times the velocity. So the observed mass can consist of two pieces (or possibly more if we include other fields): a mechanical piece plus an electromagnetic piece. We know that there is definitely an electromagnetic piece, and we have a formula for it. And there is the thrilling possibility that the mechanical piece is not there at all—that the mass is all electromagnetic.

Let's see what size the electron must have if there is to be no mechanical mass

# Feynman: Massa elettromagnetica

Seguiamo a sviluppare la teoria elettromagnetica della massa. Il nostro calcolo era valido per  $v \ll c$ ; cosa accade se si passa alle alte velocità? Alcuni primi tentativi condussero a una certa confusione, ma Lorentz capì che alle alte velocità la sfera carica doveva contrarsi per diventare un ellissoide e che i campi dovevano modificarsi in accordo con le formule (26.6) e (26.7) da noi ricavate per il caso relativistico nel Cap. 26. Eseguendo gli integrali per  $\mathbf{p}$  in questo caso si trova che per una velocità arbitraria  $\mathbf{v}$ , l'impulso viene alterato secondo il fattore  $1/\sqrt{1 - v^2/c^2}$ :

In altre parole la massa elettromagnetica cresce con la velocità come l'inverso di  $\sqrt{1 - v^2/c^2}$ , una scoperta che fu fatta prima della teoria della relatività.

Esperienze furono dapprima proposte per misurare la variazione della massa di una particella con la velocità allo scopo di determinare quanta parte della massa era meccanica e quanta era elettrica. Si credeva a quei tempi che la parte elettrica dovesse variare con la velocità, mentre quella meccanica non variava. Ma mentre gli esperimenti venivano fatti, anche i teorici erano al lavoro. Presto si sviluppò la teoria della relatività, la quale proponeva che qualunque fosse l'origine della massa essa dovesse sempre variare come  $m_0/\sqrt{1 - v^2/c^2}$ . L'Equazione (28.7) fu il principio della teoria che fa dipendere la massa dalla velocità.

Torniamo ora al calcolo dell'energia del campo che ci portò all'Eq. (28.2). Secondo la teoria della relatività, l'energia  $U$  avrà la massa  $U/c^2$ ; l'Eq. (28.2) afferma dunque che il campo dell'elettrone deve avere la massa

$$m'_{el} = \frac{U_{el}}{c^2} =$$

che non è la stessa della massa elettromagnetica  $m_{el}$ . Difatti, basta combinare le Eq. (28.2) e (28.4) per scrivere

Questa formula fu scoperta prima della relatività e quando Einstein e altri cominciarono a capire che si deve sempre avere  $U = mc^2$ , ci fu una gran confusione.

Let's pursue our electromagnetic theory of mass. Our calculation was for  $v \ll c$ ; what happens if we go to high velocities? Early attempts led to a certain amount of confusion, but Lorentz realized that the charged sphere would contract into a ellipsoid at high velocities and that the fields would change in accordance with the formulas (26.6) and (26.7) we derived for the relativistic case in Chapter 26. If you carry through the integrals for  $\mathbf{p}$  in that case, you find that for an arbitrary velocity  $\mathbf{v}$ , the momentum is altered by the factor  $1/\sqrt{1 - v^2/c^2}$ :

$$\mathbf{p} = \frac{2}{3} \frac{e^2}{ac^2} \frac{\mathbf{v}}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}. \quad (28.7)$$

In other words, the electromagnetic mass rises with velocity inversely as  $\sqrt{1 - v^2/c^2}$ —a discovery that was made before the theory of relativity.

Early experiments were proposed to measure the changes with velocity in the observed mass of a particle in order to determine how much of the mass was mechanical and how much was electrical. It was believed at the time that the electrical part would vary with velocity, whereas the mechanical part would not. But while the experiments were being done, the theorists were also at work. Soon the theory of relativity was developed, which proposed that no matter what the origin of the mass, it all should vary as  $m_0/\sqrt{1 - v^2/c^2}$ . Equation (28.7) was the beginning of the theory that mass depended on velocity.

Let's now go back to our calculation of the energy in the field, which led to Eq. (28.2). According to the theory of relativity, the energy  $U$  will have the mass  $U/c^2$ ; Eq. (28.2) then says that the field of the electron should have the mass

$$m'_{elec} = \frac{U_{elec}}{c^2} = \frac{1}{2} \frac{e^2}{ac^2}, \quad (28.8)$$

28-5

which is not the same as the electromagnetic mass,  $m_{elec}$ , of Eq. (28.4). In fact, if we just combine Eqs. (28.2) and (28.4), we would write

$$U_{elec} = \frac{3}{4} m_{elec} c^2.$$

This formula was discovered before relativity, and when Einstein and others began to realize that it must always be that  $U = mc^2$ , there was great confusion.

# Einstein ad Habicht, Giugno/Settembre 1905

- “Dai miei studi di elettrodinamica mi sovvenne una conseguenza: il principio di relatività, associato all’equazione fondamentale di Maxwell, **richiede che la massa sia una misura diretta dell’energia contenuta in un corpo**; la luce trasporta massa con sé. **In caso di radiazione dovrebbe avvenire una sensibile riduzione della massa.**
- Questo pensiero è divertente e seducente; per quanto ne so, il Dio Onnipotente potrebbe anche sorridere sull’intera vicenda e potrebbe essersi preso gioco di me.”

- 1905: Einstein «Inerzia dell'energia»
- 2005: Mostra a Pavia: Einstein Ingegnere dell'Universo



# 27 Settembre 1905: inerzia dell'energia

## 13. Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig? von A. Einstein.

Die Resultate einer jüngst in diesen Annalen von mir publizierten elektrodynamischen Untersuchung<sup>1)</sup> führen zu einer sehr interessanten Folgerung, die hier abgeleitet werden soll.

Ich legte dort die Maxwell-Hertz'schen Gleichungen für den leeren Raum nebst dem Maxwell'schen Ausdruck für die elektromagnetische Energie des Raumes zugrunde und außerdem das Prinzip:

Die Gesetze, nach denen sich die Zustände der physikalischen Systeme ändern, sind unabhängig davon, auf welches von zwei relativ zueinander in gleichförmiger Parallel-Translationsbewegung befindlichen Koordinatensystemen diese Zustandsänderungen bezogen werden (Relativitätsprinzip).

Gestützt auf diese Grundlagen<sup>2)</sup> leitete ich unter anderem das nachfolgende Resultat ab (l. c. § 8):

Ein System von ebenen Lichtwellen besitze, auf das Koordinatensystem  $(x, y, z)$  bezogen, die Energie  $l$ ; die Strahlrichtung (Wellennormale) bilde den Winkel  $\varphi$  mit der  $x$ -Achse des Systems. Führt man ein neues, gegen das System  $(x, y, z)$  in gleichförmiger Paralleltranslation begriffenes Koordinatensystem  $(\xi, \eta, \zeta)$  ein, dessen Ursprung sich mit der Geschwindigkeit  $v$  längs der  $x$ -Achse bewegt, so besitzt die genannte Lichtmenge — im System  $(\xi, \eta, \zeta)$  gemessen — die Energie:

$$l' = l \frac{1 - \frac{v}{V} \cos \varphi}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{V}\right)^2}},$$

wobei  $V$  die Lichtgeschwindigkeit bedeutet. Von diesem Resultat machen wir im folgenden Gebrauch.

1) A. Einstein, Ann. d. Phys. 17. p. 891. 1905.

2) Das dort benutzte Prinzip der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit ist natürlich in den Maxwell'schen Gleichungen enthalten.

# 1939: Lettera a Roosevelt

Albert Einstein  
Old Grove Rd.  
Nassau Point  
Peconic, Long Island

August 2nd, 1939

F.D. Roosevelt,  
President of the United States,  
White House  
Washington, D.C.

Sir:

Some recent work by E. Fermi and L. Szilard, which has been communicated to me in manuscript, leads me to expect that the element uranium may be turned into a new and important source of energy in the immediate future. Certain aspects of the situation which has arisen seem to call for watchfulness and, if necessary, quick action on the part of the Administration. I believe therefore that it is my duty to bring to your attention the following facts and recommendations:

In the course of the last four months it has been made probable - through the work of Joliot in France as well as Fermi and Szilard in America - that it may become possible to set up a nuclear chain reaction in a large mass of uranium, by which vast amounts of power and large quantities of new radium-like elements would be generated. Now it appears almost certain that this could be achieved in the immediate future.

This new phenomenon would also lead to the construction of bombs, and it is conceivable - though much less certain - that extremely powerful bombs of a new type may thus be constructed. A single bomb of this type, carried by boat and exploded in a port, might very well destroy the whole port together with some of the surrounding territory. However, such bombs might very well prove to be too heavy for transportation by air.

The United States has only very poor ores of uranium in moderate quantities. There is some good ore in Canada and the former Czechoslovakia, while the most important source of uranium is Belgian Congo.

In view of this situation you may think it desirable to have some permanent contact maintained between the Administration and the group of physicists working on chain reactions in America. One possible way of achieving this might be for you to entrust with this task a person who has your confidence and who could perhaps serve in an unofficial capacity. His task might comprise the following:

a) to approach Government Departments, keep them informed of the further development, and put forward recommendations for Government action, giving particular attention to the problem of securing a supply of uranium ore for the United States;

b) to speed up the experimental work, which is at present being carried on within the limits of the budgets of University laboratories, by providing funds, if such funds be required, through his contacts with private persons who are willing to make contributions for this cause, and perhaps also by obtaining the co-operation of industrial laboratories which have the necessary equipment.

I understand that Germany has actually stopped the sale of uranium from the Czechoslovakian mines which she has taken over. That she should have taken such early action might perhaps be understood on the ground that the son of the German Under-Secretary of State, von Weizsäcker, is attached to the Kaiser-Wilhelm-Institut in Berlin where some of the American work on uranium is now being repeated.

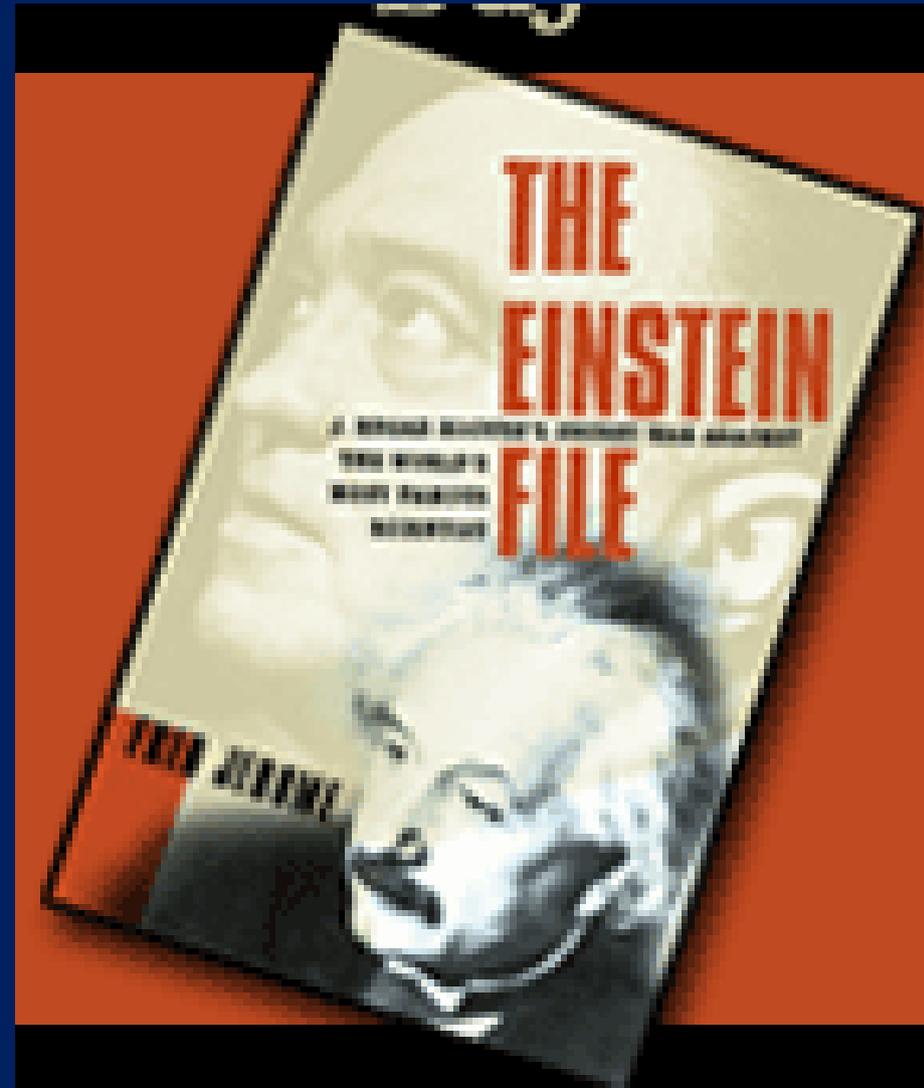
Yours very truly,

*A. Einstein*

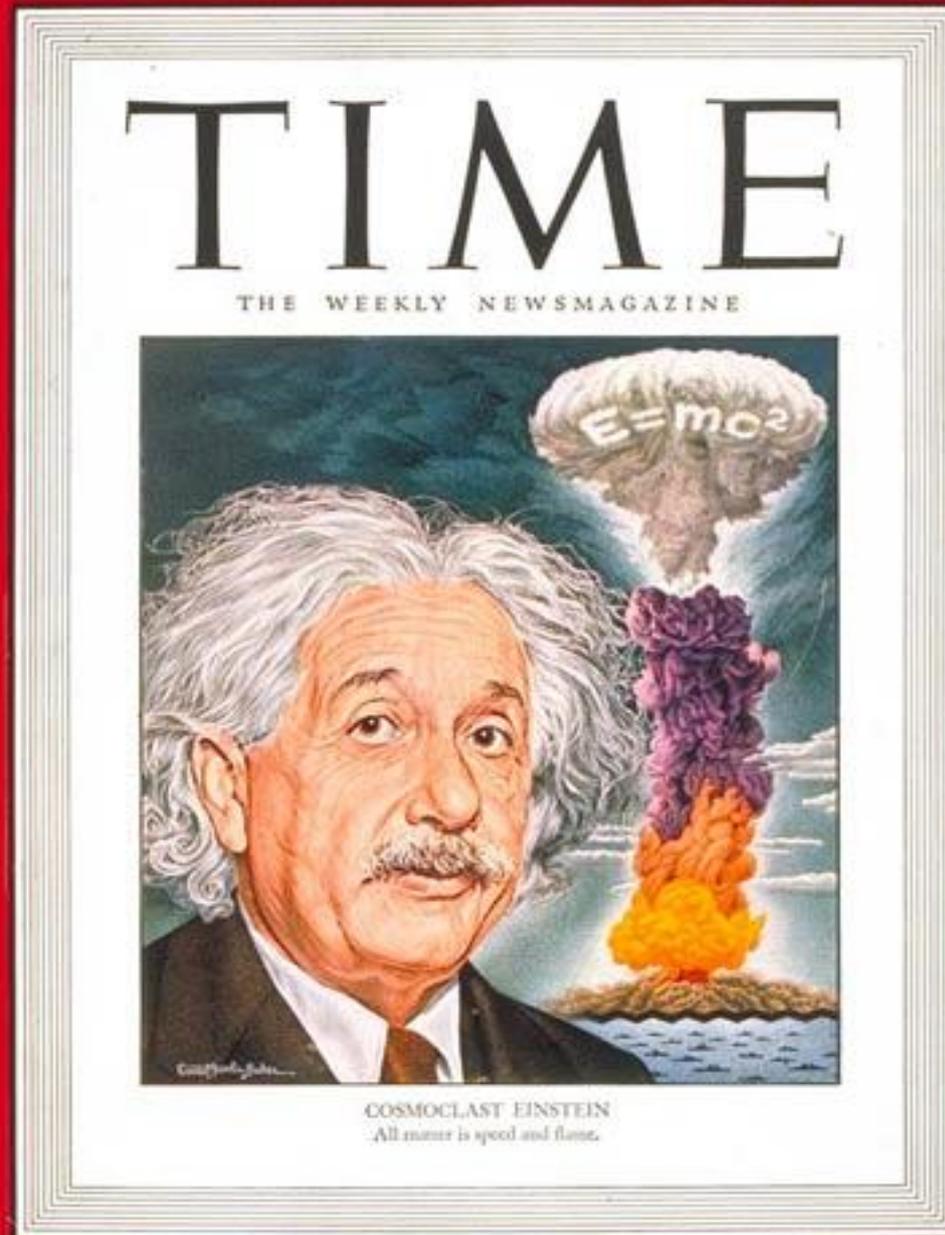
(Albert Einstein)

# The Einstein file

- L' FBI di Hoover reputa Einstein comunista e gli impedisce di partecipare al progetto Manhattan



1° luglio 1946



# The Manhattan Project not only gave birth to Big Science and Digital technologies, but also to Science Education and History of Science.

16 July 1945 Trinity: Two main actors: Conant and Bush



# Vannevar Bush (1890-1974)

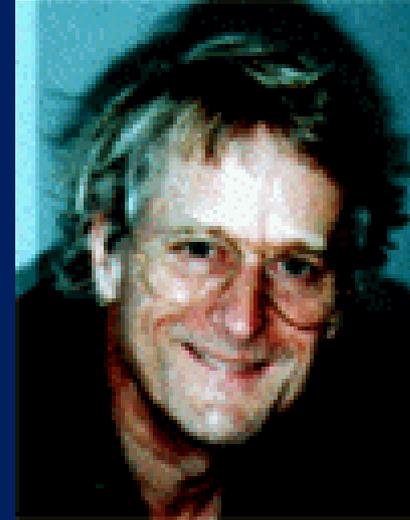


- *Engineer*
- *Director of the Office of Scientific Research and Development (1940-43)*
- *National Science Foundation (1947)*
- **1945:** *“As We May Think”*: *the Memex machine*

# After Bush: Hypertexts and the web



**Douglas C. Engelbart (1925-)**  
1960': Hypertext; 1969 Arpanet



**Theodor H. Nelson (1937-)**  
1960: Xanadu; 1965: Hypertext

**Tim Berners-Lee (1955-)**  
**WWW:**  
**1980: Enquire;**  
**1991: First web site at CERN**



# Kuhn's "Structure" is dedicated to James Conant (1893-1978)



**Chemist**

**President of Harvard (1933-53)**

- SAT
- Core Curriculum

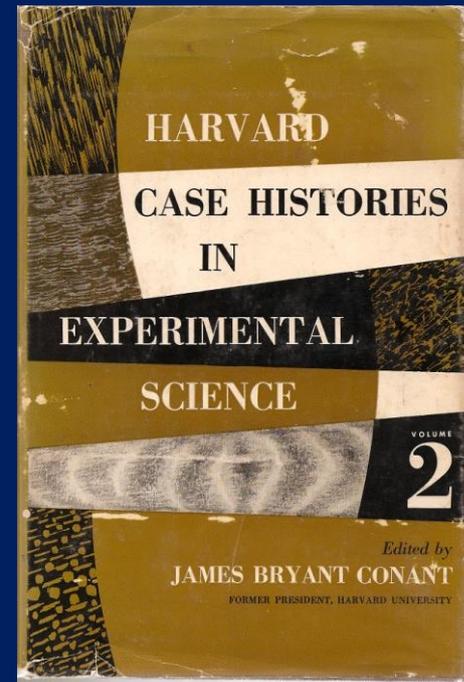
**Military advisor to F.D.Roosevelt**

**Head of NDRC Manhattan Project**

**Postwar Ambassador to Germany**

**In 1945**

**Facing the Two cultures problem, the difference between Big and Small Science, introduced at Harvard the: Case Histories in Experimental Science (for the Humanities)**



1957

# Thomas Kuhn (1922–1996)

- **Harvard**  
PHD Physics 1949 (van Vleck)  
Society of Fellows  
1948-56 HoS
- **Berkeley 1956**  
– Philosophy Dept.
- **Princeton 1964**
- **MIT 1979-1991**



# Textbooks as grinding machines

Isis, Vol. 52, No. 2 (Jun., 1961), pp. 161-193

## The Function of Measurement in Modern Physical Science

By Thomas S. Kuhn\*

AT the University of Chicago, the façade of the Social Science Research Building bears Lord Kelvin's famous dictum: "If you cannot measure, your knowledge is meager and unsatisfactory."<sup>1</sup> Would that statement be there if it had been written, not by a physicist, but by a sociologist, political scientist, or economist? Or again, would terms like "meter reading" and "yardstick" recur so frequently in contemporary discussions of epistemology and scientific method were it not for the prestige of modern physical science and the fact that measurement so obviously bulks large in its research? Suspecting that the answer to both these questions is no, I find my assigned role in this conference particularly challenging. Because physical science is so often seen as *the* paradigm of sound knowledge and because quantitative techniques seem to provide an essential clue to its success, the question how measurement has actually functioned for the past three centuries in physical science arouses more than its natural and intrinsic interest. Let me therefore make my general position clear at the start. Both as an ex-physicist and as an historian of physical science I feel sure that, for at least a century and a half, quantitative methods have indeed been central to the development of the fields I study. On the other hand, I feel equally convinced that our most prevalent notions both about the function of measurement and about the source of its special efficacy are derived largely from myth.

Partly because of this conviction and partly for more autobiographical reasons,<sup>2</sup> I shall employ in this paper an approach rather different from that of most other contributors to this conference. Until almost its close my essay will include no narrative of the increasing deployment of quantitative techniques in physical science since the close of the Middle Ages. Instead, the two

\* University of California, Berkeley  
<sup>1</sup> For the façade see, *Eleven Twenty-Six: A Decade of Social Science Research*, ed. Louis Wirth (Chicago, 1940), p. 169. The sentiment there inscribed recurs in Kelvin's writings, but I have found no formulation closer to the Chicago quotation than the following: "When you cannot express it in numbers, your knowledge is of a meagre and unsatisfactory kind." See Sir William Thomson,

was added to the present program at a late date, are abstracted from my essay, "The Role of Measurement in the Development of Natural Science," a multilithed revision of a talk first given to the Social Sciences Colloquium of the University of California, Berkeley. That version will be published in a volume of papers on "Quantification in the Social Sciences" that grows out of the Berkeley colloquium. In deriving the present paper from it, I have pre-

*Theory*

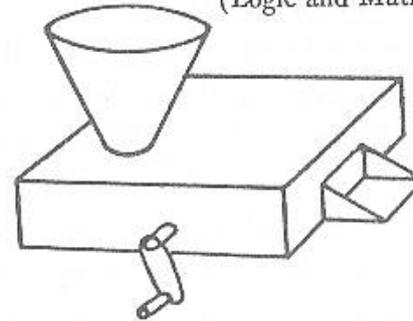
$$(X) \phi_1(X)$$

$$(X) \phi_2(X)$$

• • •

$$(X) \phi_n(X)$$

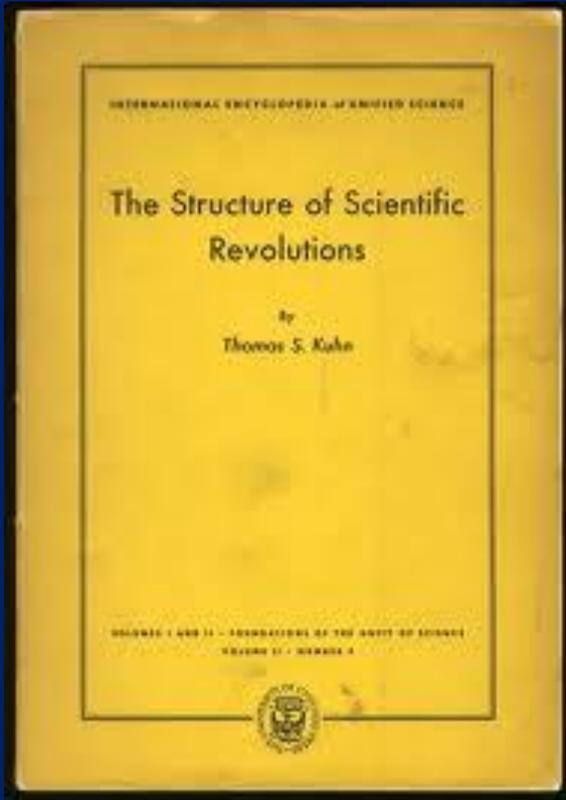
*Manipulation*  
(Logic and Math)



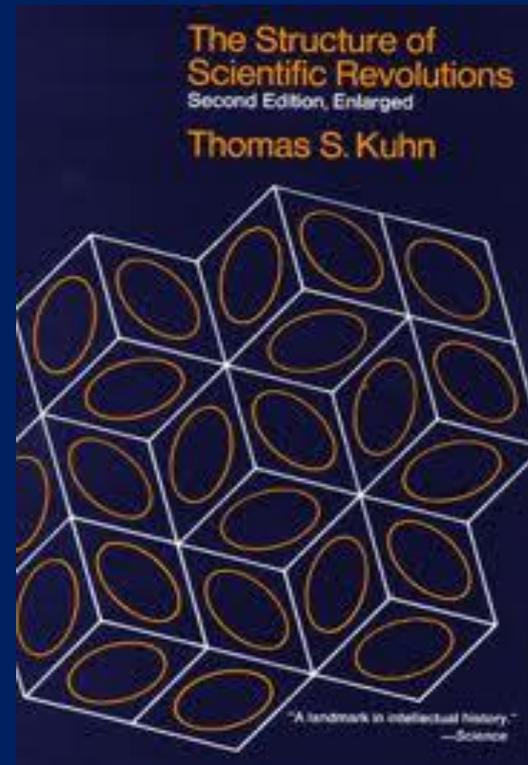
*Results*

Theory	Experiment
1.414	1.418
1.732	1.725
2.236	2.237

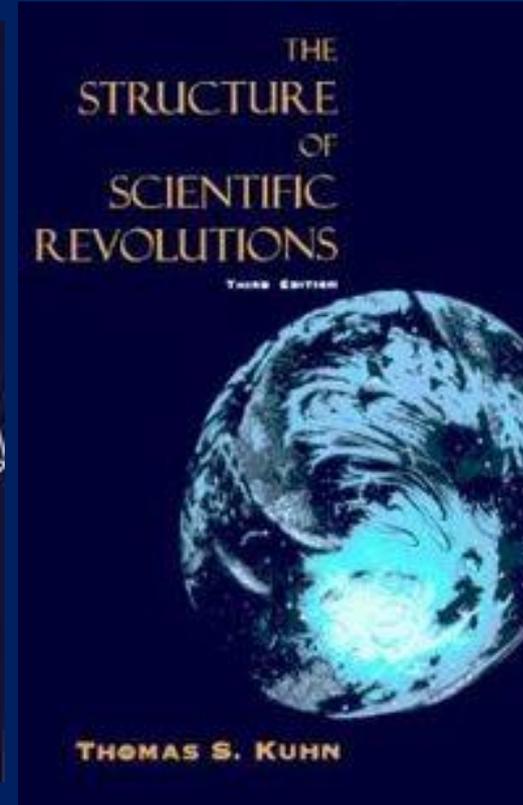
# Kuhn's "Structure": Normal and Extraordinary science



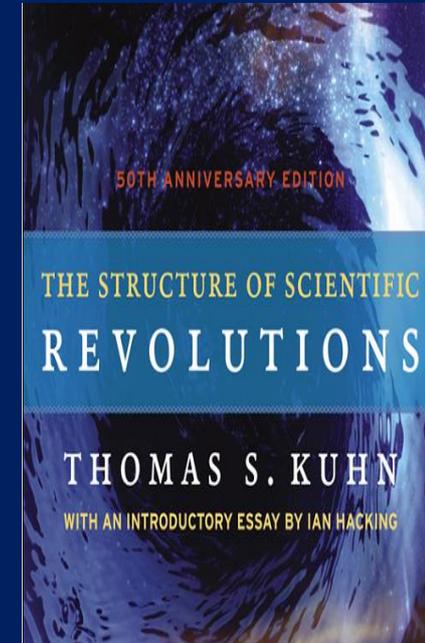
1962



1970



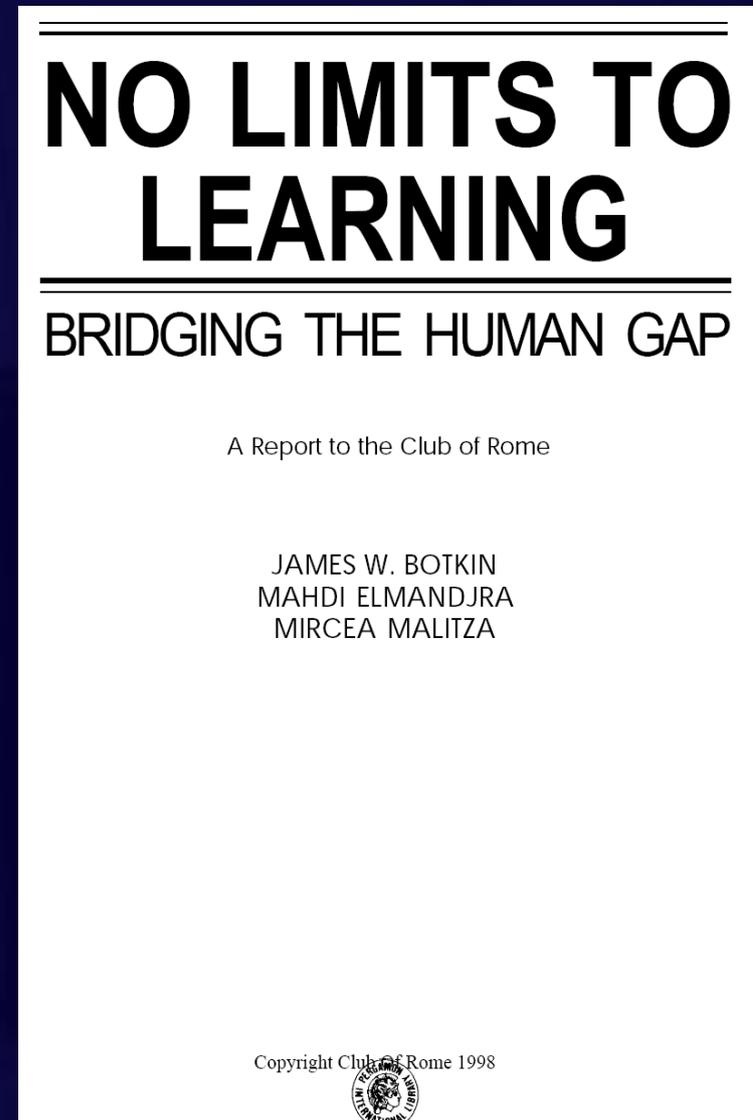
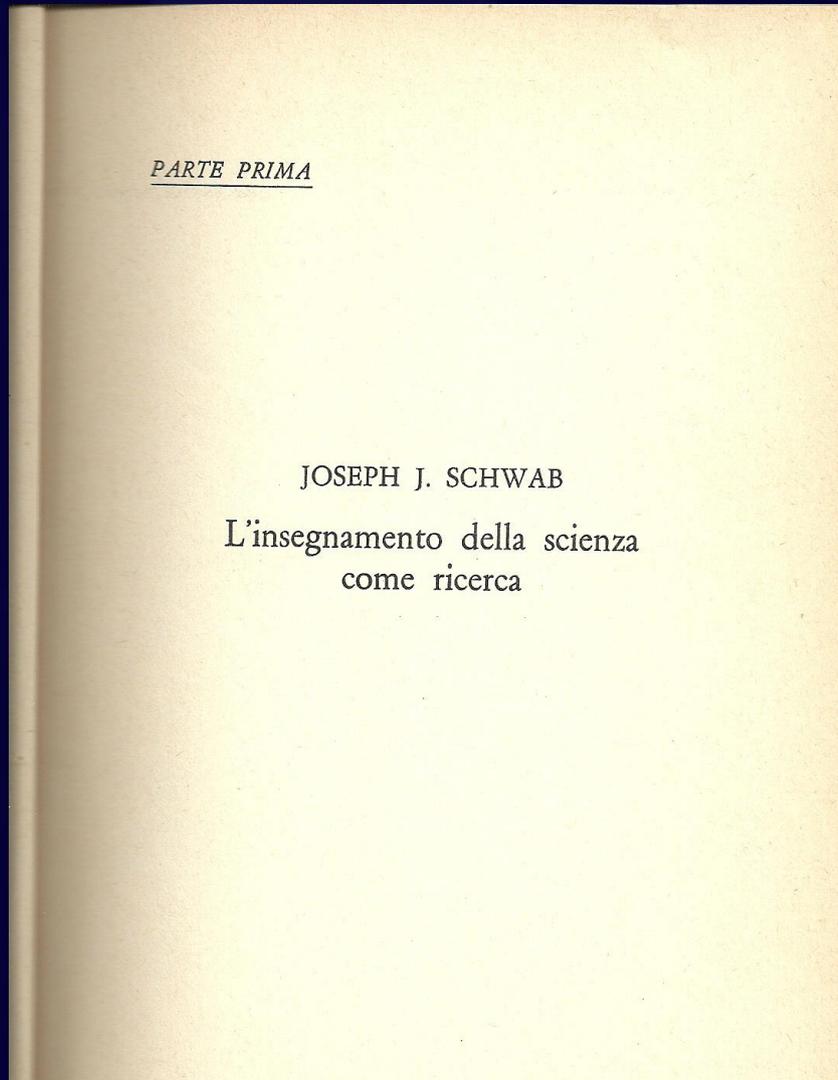
1993



2012

1966 J.Schwab: Scienza stabile, scienza fluida

1979 Club di Roma: Insegnamento conservativo, innovativo



# Einstein letter to Solovine 1952

Nel suo sconvolto - ma sempre lucido - pensiero, Einstein ha una chiara coscienza  
 dell'importanza di un sistema assiomatico che sia in grado di derivare  
 logicamente le conseguenze che si verificano nel mondo fisico.

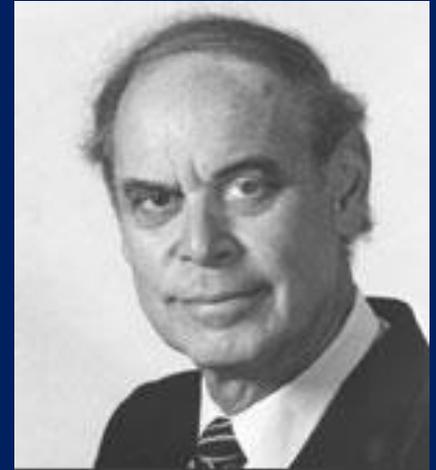
A, Sistema di assiomi  
 S, S', S'', proposizioni risultanti  
 E, varietà delle esperienze sensoriali immediate

- (1) *Il sistema deve essere* coerente.
- (2) *A chi si dà il sistema, sono dovute tutte le conseguenze* logiche.  
 Esistono, tuttavia, delle *A* in cui si può dimostrare, per mezzo  
 di un ragionamento logico, che non è possibile costruire un sistema  
 consistente, che derivi, da un insieme di assiomi.
- (3) *Se si è partiti da un sistema di assiomi, le conseguenze logiche*  
 risultanti sono indipendenti dalle esperienze sensoriali immediate.



Fig. 6 - Fonte: Icpce, Einstein's Centenary Volume

# Themata and the Project Physics Course



Gerald Holton  
Berlin 1922-

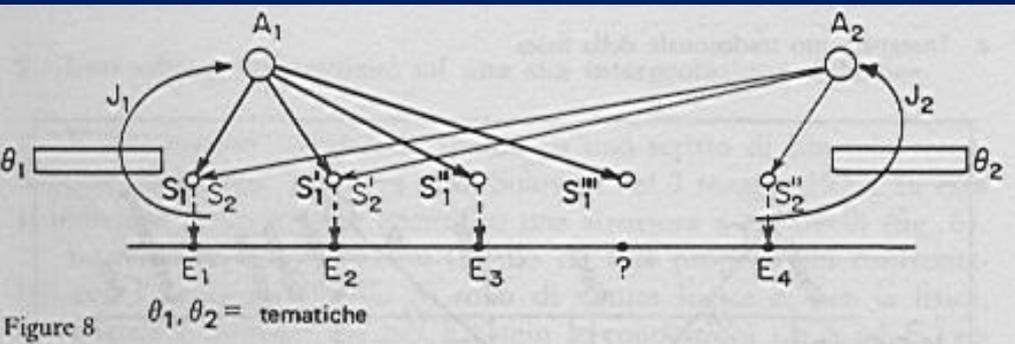
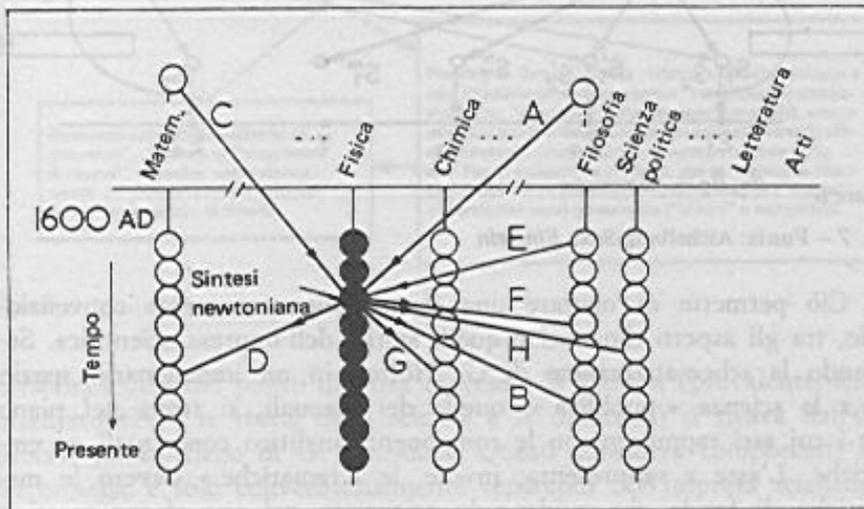


Figure 8

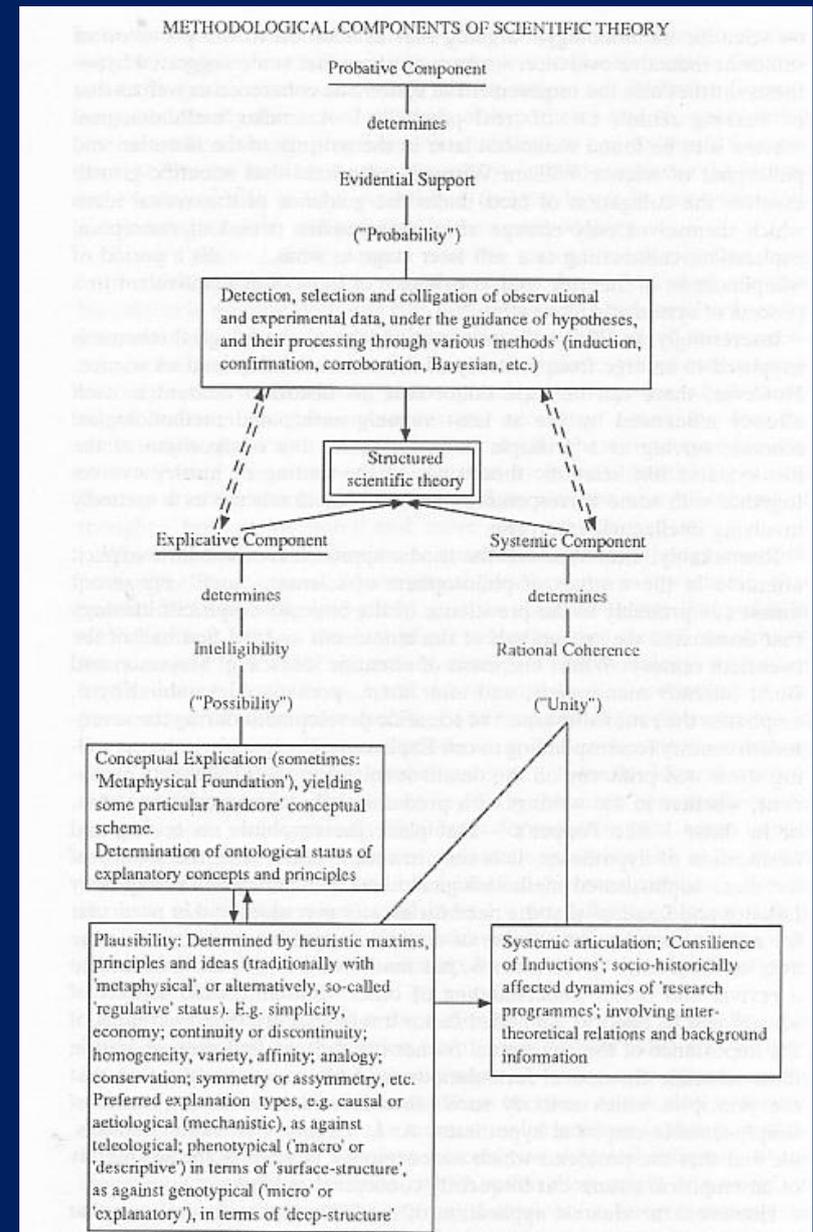
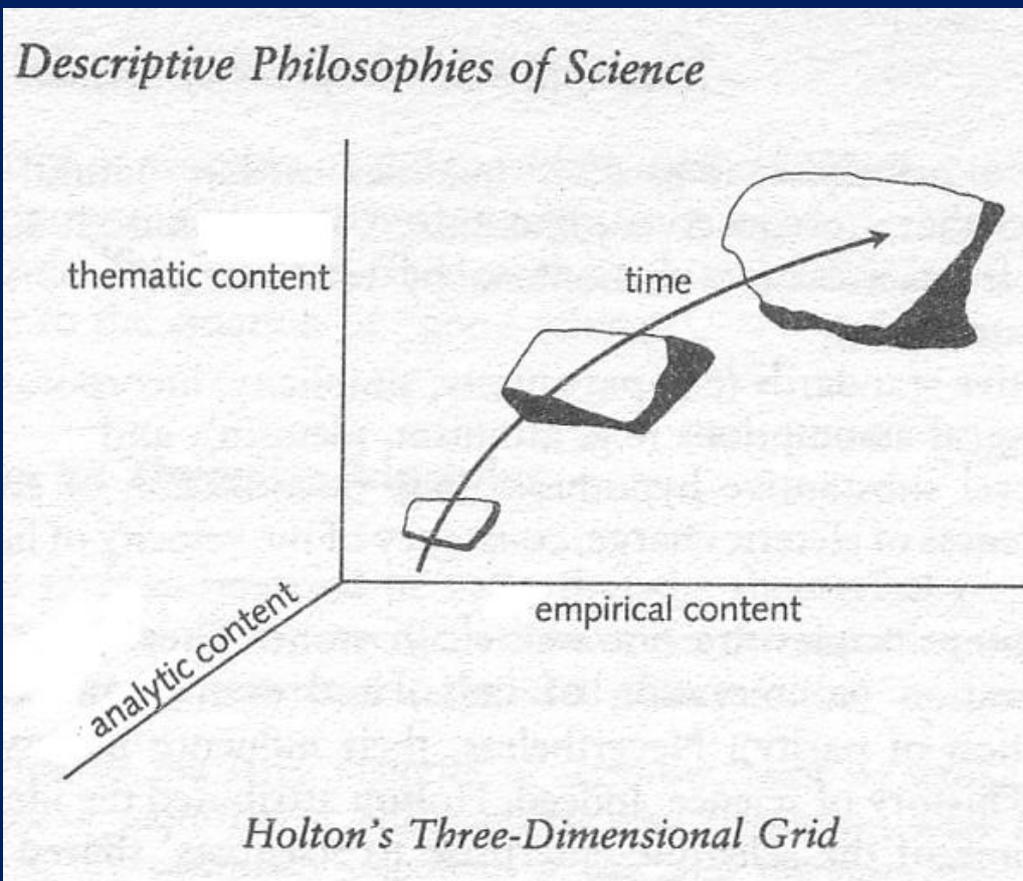
What I am recommending, especially in the third type of course, is what I call a **connective approach** to the teaching of science, and indeed of each field, not least as intellectual preparation for the student's later life. For historically, most basic findings developed not linearly, but as part of a constellation of an interdisciplinary network



b. Il Project Physics Cause evidenza i legami interdisciplinari: il caso della meccanica newtoniana.

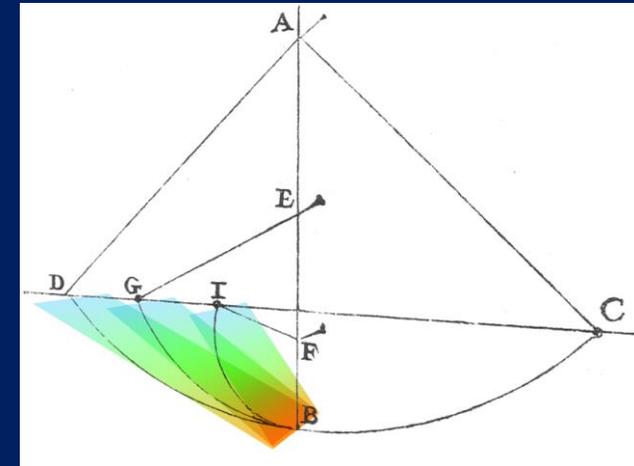
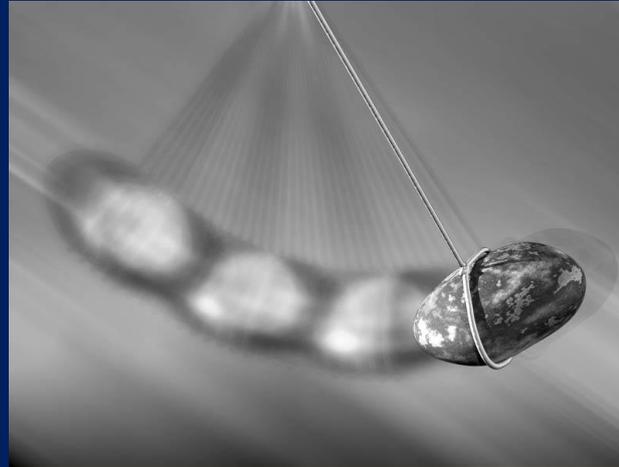
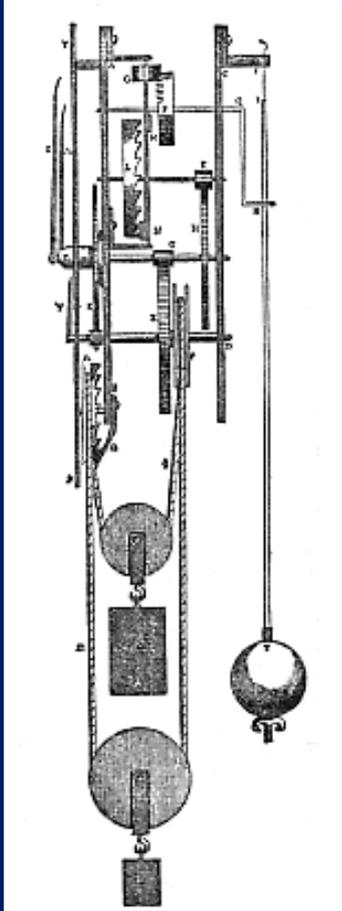
Fig. 5 - Fonte: G. Holton, *The scientific imagination*

# Holton's and G.Buchdahl's 3 components schemes

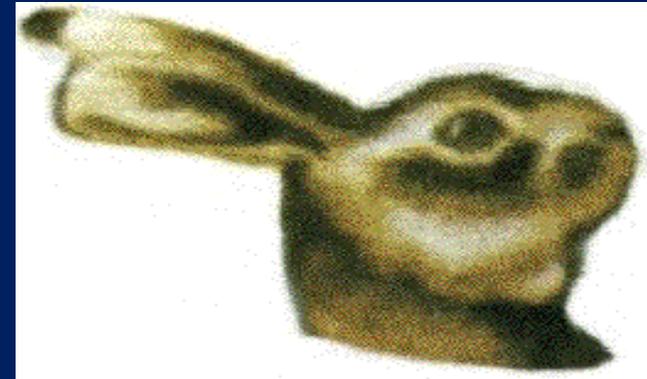


Pavia 1983; S&E 1993

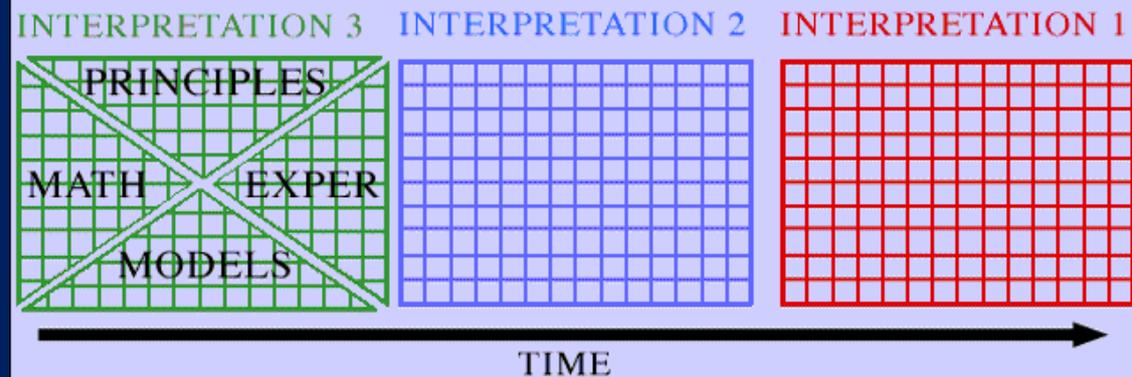
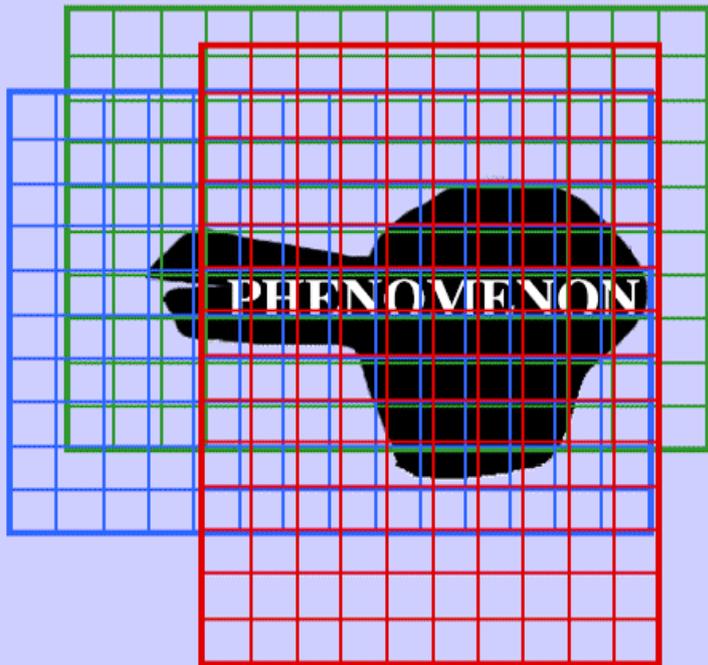
# Two alternative but not mutually exclusive interpretations



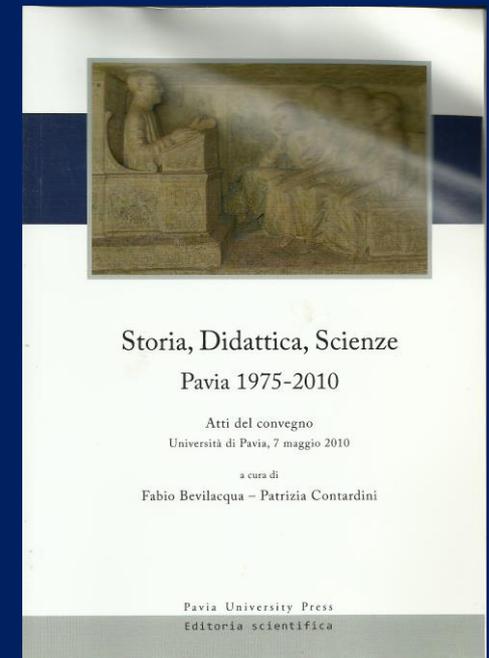
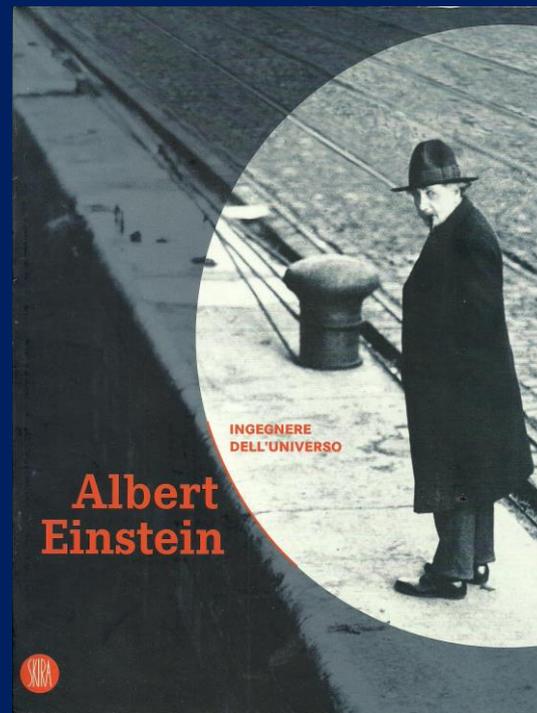
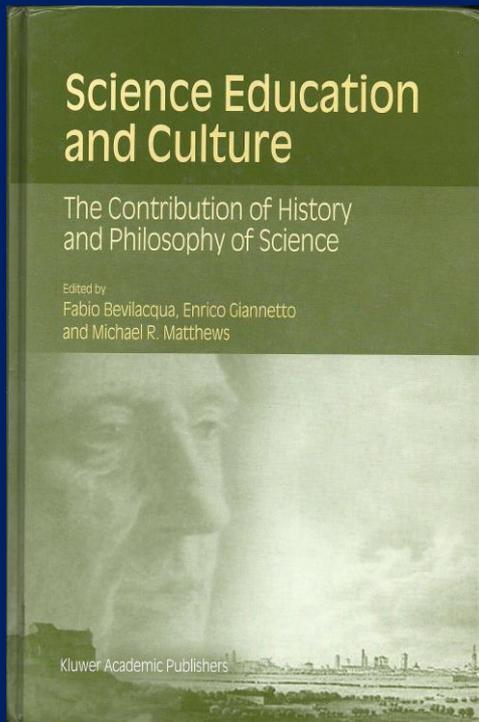
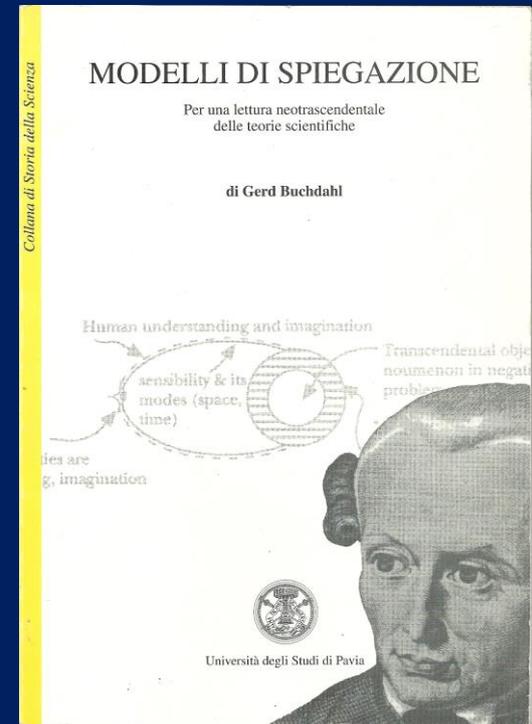
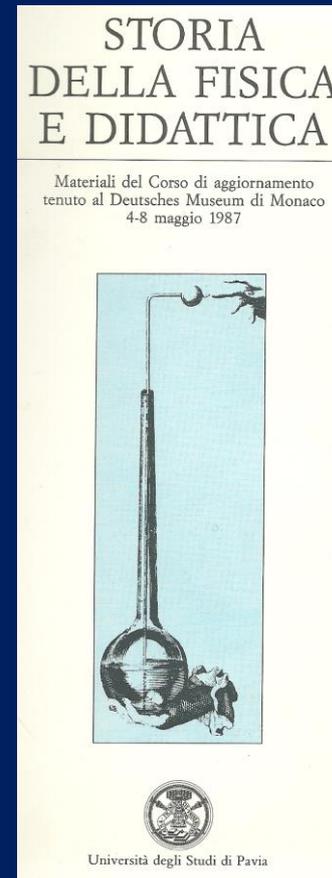
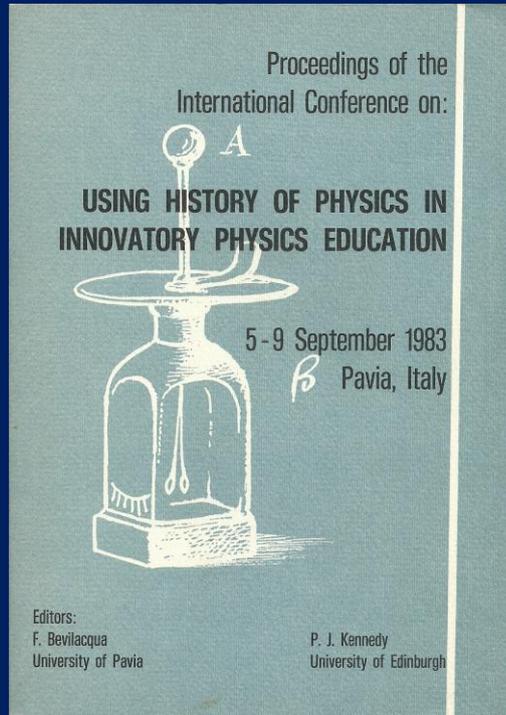
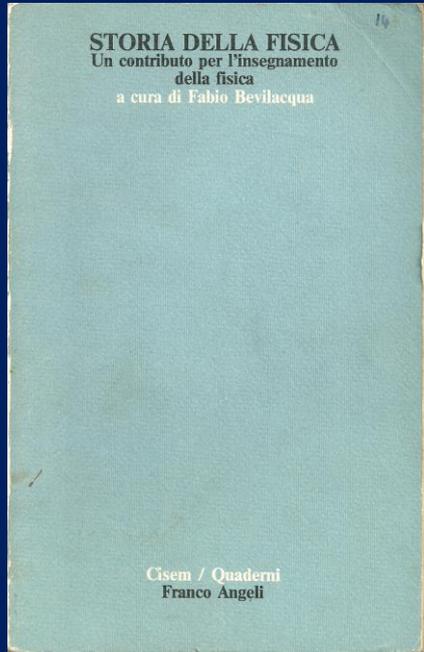
## Gestalt switch



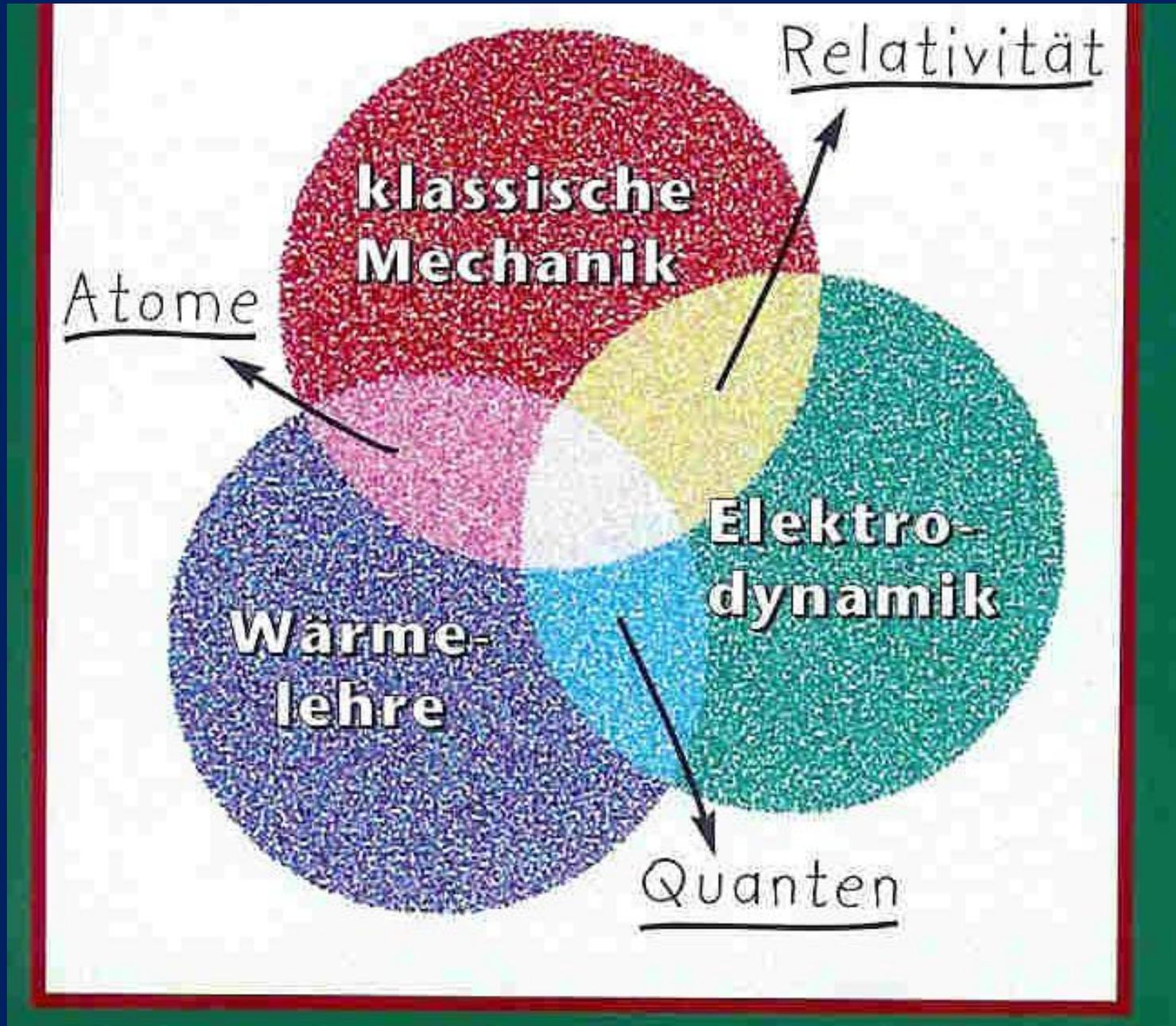
# Disentangling textbooks stratifications



# Pavia: 1980, 1983, 1987, 1995, 1999, 2005, 2010



# «Progress» and competing world views (Renn)



# I libri di testo avanzati non fanno parte della «Scienza Normale».....

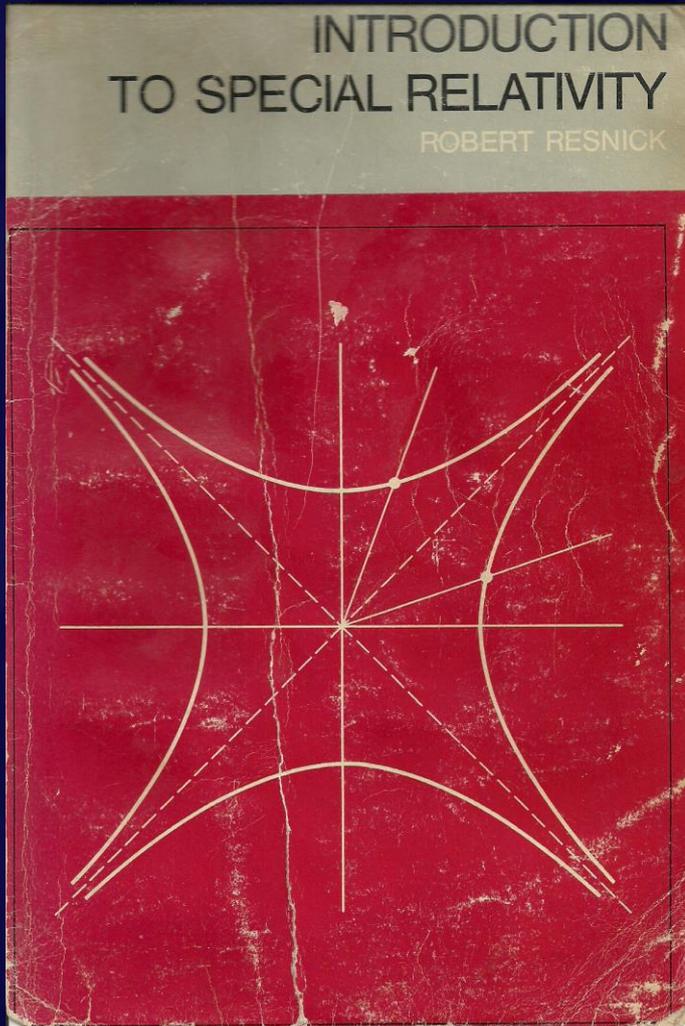
Alla fine del XIX secolo Kirchhoff (1891-7), Helmholtz (1897-1907), Poynting e Thomson (1899-1914) hanno stabilito un' importante tradizione: hanno scritto una serie di libri di testo avanzati che cercano di offrire a studenti e ricercatori avanzati un' interpretazione personale del crescente corpus di conoscenze fisiche.

Nel XX secolo, dopo lo sviluppo della Teoria della relatività e della Meccanica Quantistica, questo impegno dei grandi fisici della fine del XIX secolo è stato proseguito, tra gli altri, da Planck, Sommerfeld, Pauli, Landau e Feynman, tutti loro (tranne Sommerfeld) vincitori del premio Nobel (Max Planck nel 1918, Wolfgang Pauli nel 1945, Lev Landau nel 1962, Richard P Feynman nel 1965).

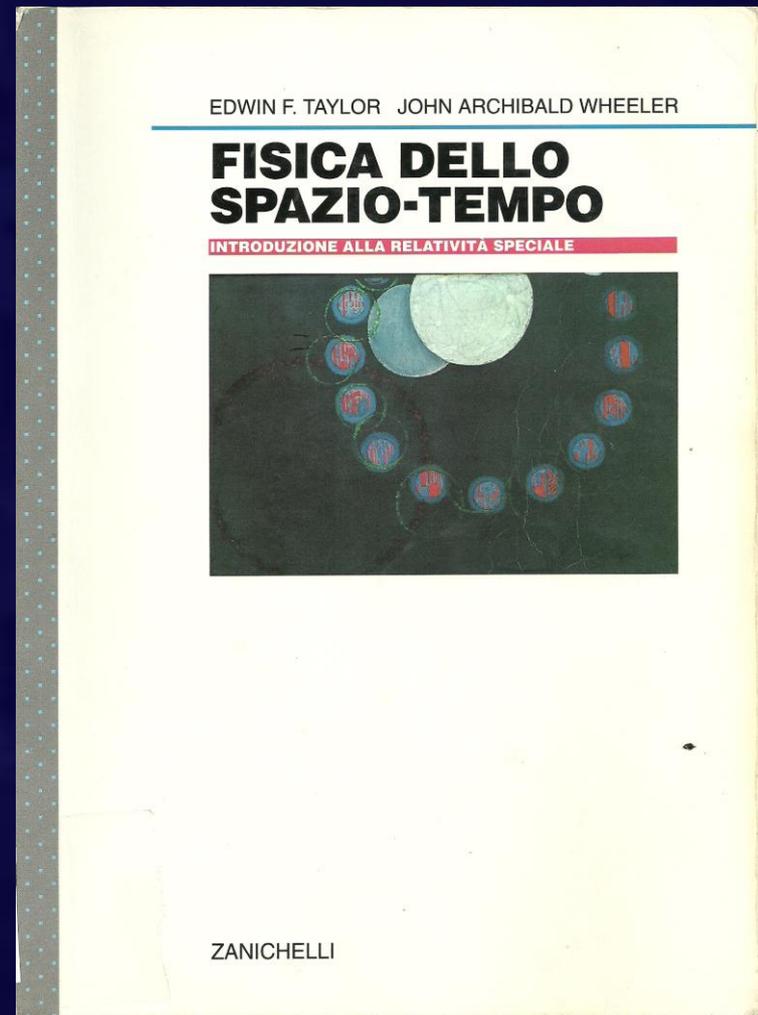
Confrontando la loro interpretazione ed esposizione dell' Elettromagnetismo Classico (Planck, 1932; Sommerfeld, 1952; Pauli 1949 (1970); Feynman, Leighton & Sands, 1963, Landau & Lifchitz, 1970) emergono differenze concettuali rilevanti, anche se i risultati quantitativi sono gli stessi.

# ...così anche i libri di testo «introduttivi» Nel caso della Relatività (Levrini 2014):

1968 Resnick



1965, 1992 Wheeler -  
Taylor



I due curricula si concentrano su concetti diversi (effetti relativistici o quantità e relazioni invarianti), utilizzano lingue diverse e riflettono interpretazioni diverse della relatività speciale. La proposta di Resnick presenta la teoria seguendo il suo sviluppo storico e in coerenza con l'approccio operativo attribuito ai lavori originali di Einstein. La proposta di Taylor e Wheeler offre un'elegante e concettualmente trasparente ricostruzione non storica della teoria, basandosi pesantemente su una formulazione geometrico/Minkowskiana della relatività speciale. Più specificamente, la proposta di Resnick sostiene la tesi secondo cui la relatività è «una teoria della misurazione» e una tale tesi è argomentata concentrandosi sulle trasformazioni di Lorentz, e utilizzando prevalentemente rappresentazioni algebriche e illustrando il significato fisico degli effetti relativistici (relatività della simultaneità, contrazione di lunghezza e dilatazione del tempo) per mezzo degli esperimenti pensati di Einstein. Attenzione particolare viene corrisposta ai risultati sperimentali che hanno portato - e corroborato - la necessità di rivisitare le basi concettuali della cinematica e della dinamica classica. La proposta di Taylor e Wheeler sottolinea, per mezzo di un linguaggio geometrico, i concetti di evento, intervallo spazio-temporale, energia-quantità di moto e invarianza. Uno dei suoi principali vantaggi è che apre la strada alla fisica contemporanea compresa la fisica delle particelle e la relatività generale. A differenza dell'approccio tradizionale e grazie alla loro decisione di tenersi lontani dalla storia, gli autori fanno la sorprendente scelta di presentare, fin dall'inizio, la relatività speciale come teoria che vale in assenza di gravitazione, cioè, secondo il principio di equivalenza, in sistemi di riferimento in libera fluttuazione.



# Il dibattito è ancora intenso sul concetto di massa, conversione, equivalenza

1905 Einstein Elettrodinamica corpi in m...  
1905b Einstein Does the inertia  
1905b Einstein Inerzia energia ita  
1906 Einstein eng  
1906 Einstein ita  
1907 Einstein eng  
1908 Slate Electromagnetic mass  
1916 Einstein ita  
1922 Einstein ita  
1922 Fermi  
1932 Cockroft Walton Nature  
1935 Einstein derivation mass energy equ...  
1938 Einstein ita  
1946 Barker Energy Transformations and ...  
1946 Eddy C.R. A Relativistic Misconcepti...  
1946 Einstein eng  
1949 Einstein autobiografia  
1951 Cockroft cockcroft-Nobel lecture  
1951 Nobel Prize in Physics 1951 - Presen...  
1951 Walton walton-Nobel lecture  
1952 Ives Derivation of the mass energy e...  
1962 Hanson The dematerialization of m...  
1963 FeynmanThe Feynman Lectures on ...  
1969 Sambursky The equivalence of mas...  
1970 Frisch Lise Meitner  
1976 Bromberg, Joan. The Concept of Pa...  
1976 Warren The mistery of mass energy  
1981 Cushing Electromagnetic mass, rela...  
1982 Stachel Torretti Einstein's first deriva...  
1987 Adler Does mass really depend on v...  
1987 Bondi Spurgin Energy has mass Phy...  
1987 Peierls Phys Bull 38 p128  
1988 Fadner Did Einstein really discover E...  
1988 Mendel Sachs Inertial Mass Concept  
1989 Okun The concept of mass (mass, e...  
1989 Okun The Concept of Mass\_ Physic...  
1990 Rindler et al Putting to rest mass mi...  
1991 Baierlein Teaching  $E=mc^2$   
1991 Sandin In defence of relativistic mass

1993 Stuewer  
1997 Jammer Concepts of Mass in Classi...  
1998 Flores Einstein 1935 mass energy eq...  
1999 Wilczek Mass without mass 1 Physic...  
2000 Fuller  
2000 Jammer Concepts of Mass in Conte...  
2000 Wilczek Mass without mass II  
2001 Lange The Most Famous Equation T...  
2001 Okun  
2003 Wilczek Origin of mass Physicstmi...  
2004 Darrigol The Mystery of the Einstein...  
2005 Darrigol Genesis of the theory of rel...  
2005 Fabri Einstein e la massa relativistica  
2005 Flores Interpretations\_Einstein\_Equa...  
2005 Hobson Mass-without-Mass  
2005 Leong Chin Conceptual Developme...  
2005 Roche What-is-mass Eur.\_J.\_Phys.\_2...  
2006 Flores On the Interpretation of the E...  
2006 Hecht There is no really good defini...  
2006 Krajewski On the interpretation of t...  
2006 Rindler\_on\_potential\_energy\_and\_m...  
2007 Baierlein Does nature convert mass i...  
2007 Hecht Energy and Change The Phys...  
2007 Topper Vincent Einstein's 1934 Two-...  
2008 Hecht Energy conservation simplifie...  
2008 Oas On the abuse and use of relativ...  
2008 Ohanian Einstein's  $E = mc^2$  mistake...  
2008 Ohanian Einstein's Mistakes \_ W. W....  
2008 Ohanians\_Third\_Mistake p.105  
2008 Okun The Einstein formula  $E_0 = mc...$   
2008 Okun The mass versus relativistic an...  
2008 Okun The theory of relativity and th...  
2009 Hecht Einstein never approved R m  
2009 Hecht Einstein on mass and energy\_...  
2009 Hecht on mass and energy  
2009 Ohanian Did Einstein prove  $E=mc^2$  ...  
2009 Okun Mass versus relativistic and re...  
2009 Solbes, Guisasola, Tarin Teaching en...  
2010 Pössel From  $E=mc^2$  to the atomic b...

2010 Pössel Is the whole the sum of its pa...  
2011 Hecht How Einstein confirmed  $E=m...$   
2011 Hecht On Defining Mass\_ The Physi...  
2011 Mermin Understanding Einstein's 19...  
2012 FB Appunti  
2012 Fernflorencie Francisco The Equivale...  
2012 Mermin Reply to Ohanian  
2012 Ohanian A comment on Mermin's  
2012 Wilczek Origins of mass  
2013 Mamedov Esmer On the philosophi...  
2014 Bachtold L'équation Elibérée =  $\Delta m...$   
2014 FB Energy Learning from the past S...  
2017 aHarrer On the Origin of Energy Me...

# Einstein: 18 tentativi di dimostrazione in 40 anni!

## How Einstein confirmed $E_0=mc^2$

Eugene Hecht<sup>a)</sup>

*Department of Physics, Adelphi University, Garden City, New York 11530*

(Received 13 August 2010; accepted 27 December 2010)

The equivalence of mass  $m$  and rest-energy  $E_0$  is one of the great discoveries of all time. Despite the current wisdom, Einstein did not derive this relation from first principles. Having conceived the idea in the summer of 1905 he spent more than 40 years trying to prove it. We briefly examine all of Einstein's conceptual demonstrations of  $E_0=mc^2$ , focusing on their limitations and his awareness of their shortcomings. Although he repeatedly confirmed the efficacy of  $E_0=mc^2$ , he never constructed a general proof. Leaving aside that it continues to be affirmed experimentally, a rigorous proof of the mass-energy equivalence is probably beyond the purview of the special theory. © 2011 American Association of Physics Teachers.

Although he affirmed the correctness of the mass-energy equivalence in about 18 different presentations, he was not able to provide a conclusive general proof of this seminal hypothesis. Einstein seems to have been aware of the limitations of these efforts as witnessed by his continued offering of new derivations up to 1946. Even so, establishing ownership of the concept of the equivalence of mass and energy was of great importance to him.

## L'inerzia di un corpo dipende dal suo contenuto energetico?

Traduzione dal tedesco di A. Chierico dall'originale

“Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig?“, *Annalen der Physik* **18** (1905)

I risultati di una ricerca elettrodinamica da me recentemente pubblicati in questi Annali<sup>1)</sup> conducono ad un corollario assai interessante che vorrei qui ricavare.

Io presi a base le equazioni di Maxwell-Hertz per lo spazio vuoto assieme all'espressione maxwelliana per l'energia elettromagnetica dello spazio, ed inoltre il seguente principio:

Le leggi secondo cui variano gli stati dei sistemi fisici non dipendono da quale sia, fra due sistemi di coordinate in moto traslatorio uniforme parallelo relativamente l'uno all'altro, quello a cui queste variazioni di stato vengano riferite (Principio di relatività).

Appoggiandomi a questi fondamenti<sup>2)</sup> io derivai tra l'altro il seguente risultato (l. c. § 8):

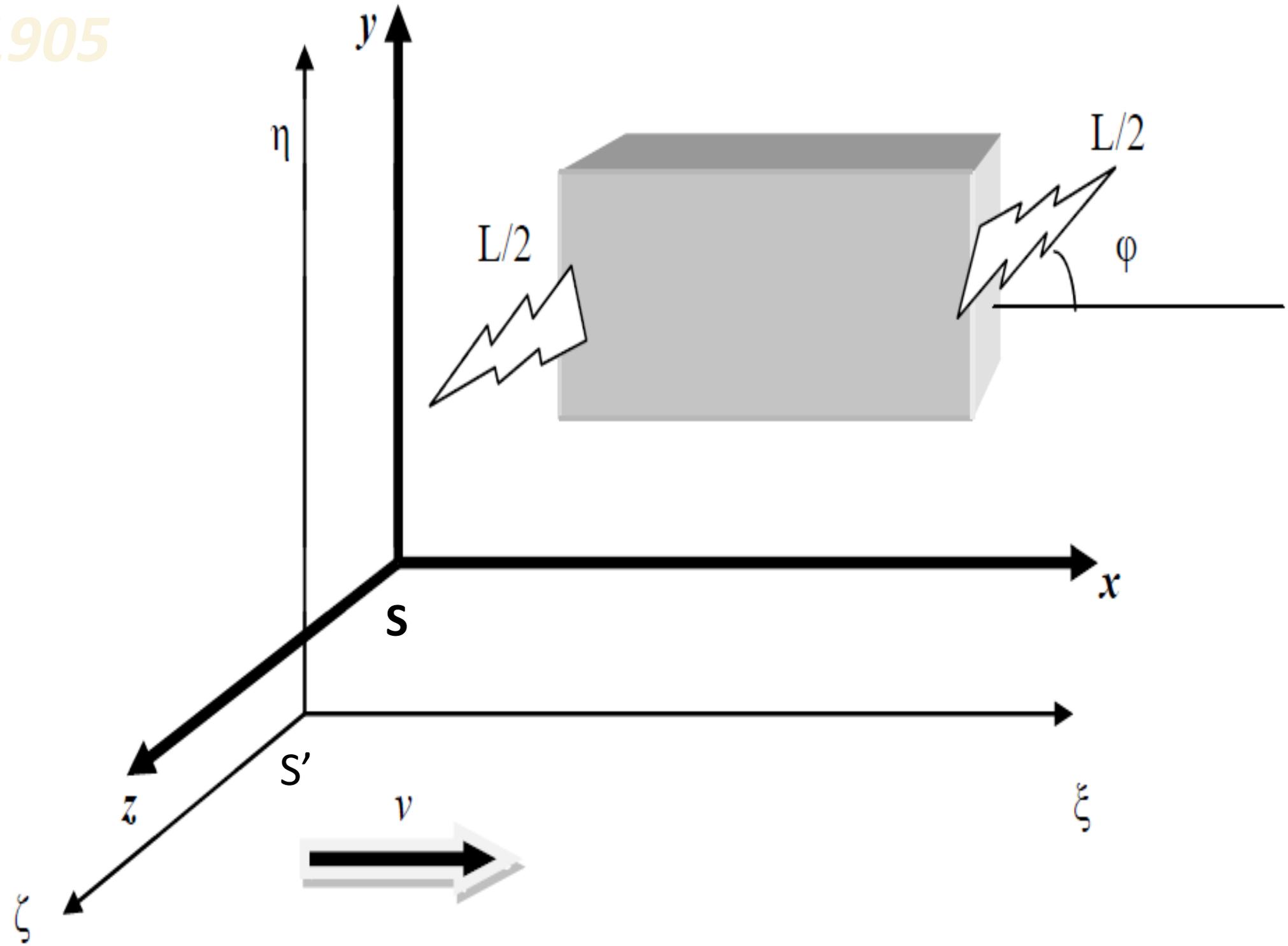
Un sistema di onde piane, riferito al sistema di coordinate  $(x, y, z)$  possieda l'energia  $l$ ; la direzione dei raggi (normale all'onda) formi l'angolo  $\varphi$  con l'asse  $x$  del sistema. Se si introduce un nuovo sistema di coordinate  $(\xi, \eta, \zeta)$  concepito in moto traslatorio uniforme rispetto al sistema  $(x, y, z)$  la cui origine si muova lungo l'asse  $x$  con velocità  $v$ , allora la suddetta quantità di luce – misurata nel sistema  $(\xi, \eta, \zeta)$  – possiede l'energia:

$$l^* = l \frac{1 - \frac{v}{c} \cos \varphi}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}},$$

dove  $c$  indica la velocità della luce. Di questo risultato faremo uso nel seguito.

Si trovi ora nel sistema  $(x, y, z)$  un corpo in quiete, la cui energia – riferita al sistema  $(x, y, z)$  – sia  $E_0$ . Rispetto al sistema  $(\xi, \eta, \zeta)$ , come sopra in moto con velocità  $v$ , l'energia del corpo sia  $H_0$ .

1905



Questo corpo emetta, in una direzione formante l'angolo  $\varphi$  con l'asse  $x$ , onde piane di energia  $L/2$  (misurata rispetto a  $(x, y, z)$ ), e contemporaneamente una uguale quantità di luce nella direzione opposta. Inoltre il corpo rimanga in quiete rispetto al sistema  $(x, y, z)$ . Per questo evento deve valere il principio di conservazione dell'energia, e precisamente (secondo il principio di relatività) rispetto ad entrambi i sistemi di coordinate. Se chiamiamo  $E_1$ , e rispettivamente  $H_1$ , l'energia del corpo dopo l'emissione di luce relativamente al sistema  $(x, y, z)$ , e rispettivamente  $(\xi, \eta, \zeta)$ , otteniamo, con l'uso della relazione indicata sopra:

$$E_0 = E_1 + \left[ \frac{L}{2} + \frac{L}{2} \right],$$

$$H_0 = H_1 + \left[ \frac{L}{2} \frac{1 - \frac{v}{c} \cos \varphi}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} + \frac{L}{2} \frac{1 + \frac{v}{c} \cos \varphi}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} \right] = H_1 + \frac{L}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$$

Per sottrazione si ottiene da queste equazioni:

$$(H_0 - E_0) - (H_1 - E_1) = L \left\{ \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} - 1 \right\}.$$

Le due differenze, della forma  $H - E$ , che compaiono in questa espressione hanno semplici significati fisici.  $H$  ed  $E$  sono valori di energia del medesimo corpo, relativamente a due sistemi di coordinate in moto relativo fra loro, mentre il corpo in uno dei sistemi (sistema  $(x, y, z)$ ) è in quiete. È quindi chiaro che la differenza  $H - E$  può distinguersi dall'energia cinetica  $K$  del corpo riferita all'altro sistema (sistema  $(\xi, \eta, \zeta)$ ) solo attraverso una costante additiva  $C$ , la quale dipende solo dalla scelta delle costanti additive arbitrarie delle energie  $H$  ed  $E$ . Possiamo allora porre:

$$H_0 - E_0 = K_0 + C$$

$$H_1 - E_1 = K_1 + C$$

dal momento che  $C$  non cambia durante l'emissione di luce. Otteniamo quindi:

$$K_0 - K_1 = L \left\{ \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} - 1 \right\}.$$

L'energia cinetica del corpo in relazione a  $(\xi, \eta, \zeta)$  diminuisce in seguito all'emissione di luce, e precisamente di un importo indipendente dalle qualità del corpo. Inoltre la differenza  $K_0 - K_1$ , allo stesso modo dell'energia cinetica dell'elettrone (l. c. § 10), dipende dalla velocità

Trascurando le grandezze del quarto ordine, e superiore, possiamo porre:

$$K_0 - K_1 = \frac{L}{c^2} \frac{v^2}{2}.$$

Da questa equazione segue immediatamente:

Se un corpo cede l'energia  $L$  in forma di radiazione, allora la sua massa si riduce di  $L/c^2$ . In questo caso è manifestamente inessenziale che l'energia sottratta al corpo si trasformi proprio in energia di radiazione, sicché noi veniamo condotti al corollario generale:

La massa di un corpo è una misura del suo contenuto di energia; se l'energia varia di  $L$ , allora la massa varia nello stesso verso di  $L/9 \cdot 10^{20}$ , se l'energia è misurata in erg e la massa in grammi.

Non è escluso che per corpi il cui contenuto di energia è variabile in grande misura (p. es., i sali di Radio) una verifica della teoria potrà riuscire.

Se la teoria corrisponde ai dati di fatto, allora la radiazione trasferisce inerzia tra corpi emettitori ed assorbitori.

Berna, settembre 1905.

# Einstein 1906

Il principio di conservazione del moto del baricentro e l'inerzia dell'energia di A: Einstein.

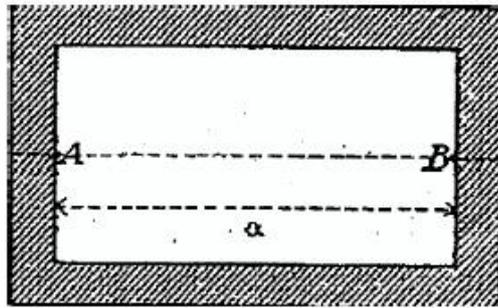
In un lavoro <sup>1</sup> pubblicato lo scorso anno ho mostrato che le equazioni elettromagnetiche di Maxwell, insieme col principio di relatività e col principio dell'energia, conducono al corollario che la massa di un corpo varia al variare del suo contenuto in energia, qualunque sia il tipo di questa variazione di energia. È stato mostrato che ad una variazione di energia in quantità  $\Delta E$  deve corrispondere, nel medesimo verso, una variazione di massa nella quantità  $\frac{\Delta E}{V^2}$ , dove  $V$  significa la velocità della luce.

Ora voglio mostrare, in questo lavoro, che quel teorema è la condizione necessaria e sufficiente affinché la legge di conservazione del moto del baricentro sia valida (almeno in prima approssimazione) anche per sistemi in cui avvengano oltre a processi meccanici anche processi elettromagnetici. Sebbene le semplici considerazioni formali da tenere presenti per la dimostrazione di questa affermazione siano già contenute per la maggior parte in un lavoro di H. Poincaré <sup>2</sup>, io, tuttavia, per una visuale completa, non mi appoggerò a quel lavoro.

## § 1. Un caso particolare.

Sia  $K$  un cilindro cavo rigido in quiete liberamente librantesi nello spazio. In  $A$  si trovi un dispositivo per inviare una determinata quantità  $S$  di energia raggiante verso  $B$  attraverso la cavità. Durante l'emissione di quella quantità di radiazione una pressione di radiazione agisce sulla parete interna sinistra del cilindro cavo  $K$ , la quale conferisce a quest'ultimo una certa velocità diretta verso sinistra. Se il cilindro cavo possiede la massa  $M$ , allora questa velocità, come si può facilmente dedurre dalle leggi

della pressione di radiazione, è uguale a  $\frac{1}{V} \frac{S}{M}$ , dove  $V$  indica la velocità della luce.  $K$  mantiene questa velocità fintanto che il fascio di raggi, la cui estensione spaziale è molto piccola rispetto a quella della cavità, non viene assorbito in  $B$ .



La durata del moto del cilindro cavo (a meno di termini di ordine superiore) è uguale a  $\frac{\alpha}{V}$  dove  $\alpha$  indica la distanza tra  $A$  e  $B$ . Dopo l'assorbimento del fascio di raggi

in  $B$  il corpo  $K$  è di nuovo in quiete. Durante il processo di radiazione considerato,  $K$  si è spostato verso sinistra del tratto

$$\delta = \frac{1}{V} \frac{S}{M} \cdot \frac{\alpha}{V}.$$

Entro la cavità di  $K$  sia presente un corpo  $k$ , per semplicità immaginato senza massa, insieme ad un meccanismo (pure privo di massa) che faccia muovere avanti ed indietro fra  $A$  e  $B$  il corpo  $k$  inizialmente in  $B$ . Dopo che la quantità di radiazione  $S$  è stata assorbita in  $B$ , questa quantità di energia viene trasferita su  $k$  e, tramite questo, trasportata verso  $A$ . Infine, la quantità di energia  $S$  viene di nuovo assorbita in  $A$  dal cilindro cavo  $K$  e  $k$  viene di nuovo messo in movimento verso  $B$ . L'intero sistema ha quindi effettuato un processo ciclico completo, che si può immaginare ripetuto fin che si vuole.

Se si assume che il corpo trasportatore  $k$  sia privo di massa anche quando esso ha assorbito la quantità di energia  $S$ , bisogna allora assumere altresì che il trasporto di ritorno della quantità di energia  $S$  non sia legato ad alcuna variazione di posizione del cilindro cavo  $K$ . L'esito di tutto il processo ciclico descritto consiste quindi unicamente in uno spostamento  $\delta$  di tutto il sistema verso sinistra, spostamento che può essere reso arbitrariamente

grande per ripetizione del processo ciclico. Otteniamo quindi il risultato che un sistema originariamente in quiete, senza che su di esso agiscano forze esterne, può variare arbitrariamente di quanto si vuole la posizione del suo baricentro, e precisamente senza che il sistema subisca una qualsivoglia modificazione permanente,

È chiaro che il risultato raggiunto non contiene alcuna intima contraddizione, ben piuttosto esso contraddice alle leggi fondamentali della meccanica, secondo le quali un corpo originariamente in quiete, sul quale non agiscano altri corpi, non può effettuare alcun movimento traslatorio.

Se, comunque, si presuppone che ad ogni energia  $E$  spetti l'inerzia  $\frac{E}{V^2}$ , allora scompare la contraddizione con gli elementi della meccanica. Secondo questa ipotesi, infatti, il corpo trasportatore, mentre trasporta la quantità di energia  $S$  da  $B$  ad  $A$ , possiede la massa  $\frac{S}{V^2}$ , e poichè il baricentro di tutto il sistema, per la legge del baricentro, deve rimanere in quiete durante questo processo, allora il cilindro cavo  $K$ , durante lo stesso, subisce nel complesso uno spostamento  $\delta'$  verso destra, del valore

$$\delta' = \alpha \cdot \frac{S}{V^2} \cdot \frac{1}{M}.$$

Un confronto col risultato trovato sopra mostra che (almeno in prima approssimazione) è  $\delta = \delta'$ , e quindi la posizione del sistema prima e dopo il processo ciclico è la medesima. Con ciò è eliminata la contraddizione con gli elementi della meccanica.

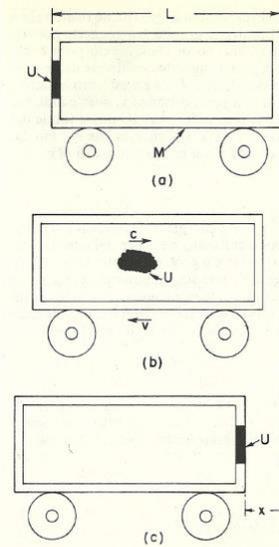


Fig. 27-7. The energy  $U$  in motion at the speed  $c$  carries the momentum  $U/c$ .

It is also true for light. When we studied light in Volume I, we saw that when the energy is absorbed from a light beam, a certain amount of momentum is delivered to the absorber. We have, in fact, shown in Chapter 36 of Vol. I that the momentum is  $1/c$  times the energy absorbed [Eq. (36.24) of Vol. I]. If we let  $U_0$  be the energy arriving at a unit area per second, then the momentum arriving at a unit area per second is  $U_0/c$ . But the momentum is travelling at the speed  $c$ , so its density in front of the absorber must be  $U_0/c^2$ . So again the theorem is right.

Finally we will give an argument due to Einstein which demonstrates the same thing once more. Suppose that we have a railroad car on wheels (assumed frictionless) with a certain big mass  $M$ . At one end there is a device which will shoot out some particles or light (or anything, it doesn't make any difference what it is), which are then stopped at the opposite end of the car. There was some energy originally at one end—say the energy  $U$  indicated in Fig. 27-7(a)—and then later it is at the opposite end, as shown in Fig. 27-7(c). The energy  $U$  has been displaced the distance  $L$ , the length of the car. Now the energy  $U$  has the mass

27-15  
OF ENERGY 283  
the definition of velocity. Intro-  
obtains the result  
=  $T(0) + U(0)$ ,  
s in classical mechanics.

Einstein's equation (83)

$$E = mc^2,$$

which states the proportionality of energy and inertial mass and is often called the law of inertia of energy, is perhaps the most important result of the theory of relativity. We shall give another simple proof of it due to Einstein himself, a proof which does not make use of the mathematical formalism of the theory of relativity.

It is based on the fact that radiation exerts a pressure. From Maxwell's field equations, supplemented by a theorem first deduced by Poynting (1884), it follows that a light wave which falls on an absorbing body exerts a pressure on it. It is found that the momentum transferred to an absorbing surface by a short flash of light is equal to  $\frac{E}{c}$ , where  $E$  is the energy of the light flash. This fact, which we will prove in the next section (9), was confirmed experimentally by Lebedew (1890) and again later with greater accuracy by Nichols

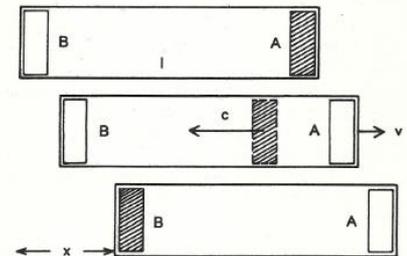


Fig. 130 A tube with two equal bodies, A and B, at its ends. A carries an energy  $E$  which is sent from A to B in the form of a light flash with velocity  $c$ ; the recoil produces a velocity  $v$  of the tube. When  $E$  is absorbed by B, the tube is at rest again, but displaced by a distance  $x$ .

# Einstein 1907

## ON THE INERTIA OF ENERGY REQUIRED BY THE RELATIVITY PRINCIPLE

by A. Einstein

[*Annalen der Physik* 23 (1907): 371-384]

The principle of relativity, in combination with Maxwell's equations, leads to the conclusion that the inertia of a body increases or decreases with its energy content in a completely determined way. That is to say, if one observes a body that emits a certain radiation energy simultaneously in two opposite directions, and if one examines this process from two coordinate systems which move uniformly relative to each other,<sup>1</sup> one of which is at rest relative to the body, and if one applies--from both coordinate systems--the energy principle to the process, one arrives at the result that to an increase in the body's energy  $\Delta E$  there must always correspond an increase in the mass  $\Delta E/V^2$ , where  $V$  denotes the velocity of light.

The circumstance that the special case discussed there necessitates an assumption of such extraordinary generality (about the dependence of the inertia on the energy) demands that the necessity and justification of this assumption be examined in a more general way. Especially, the question

arises: Do not other special cases lead to conclusions that are incompatible with the one mentioned above? A first step in this respect I took last year<sup>2</sup> by showing that the above assumption resolves the contradiction between electrodynamics and the principle of the constancy of the motion of the center of gravity (at least as far as the terms of first order are concerned).

The *general* answer to the question posed is not yet possible because we do not yet have a complete world view that would correspond to the principle of relativity. Rather, we must limit ourselves to the special cases that we can handle at present without arbitrariness from the standpoint of relativistic electrodynamics. We are going to consider two such cases; in the first of

# Einstein 1916

Il corpo ha così la stessa energia di un corpo di massa  $m + E_0/c^2$  che si muove con la velocità  $v$ . Possiamo dunque dire: se un corpo assorbe una quantità di energia  $E_0$ , allora la sua massa inerziale cresce di una quantità  $E_0/c^2$ ; la massa inerziale di un corpo non è una costante, ma varia a seconda del mutamento di energia del corpo stesso. La massa inerziale di un sistema di corpi può perfino venir considerata come una misura dell'energia del sistema. Il principio di conservazione della massa di un sistema diventa identico al principio di conservazione dell'energia, ed è valido solo in quanto il sistema non assorba né emetta energia. Scrivendo l'espressione per l'energia nella forma

$$\frac{mc^2 + E_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

vediamo che il termine  $mc^2$ , che aveva or ora attratto la nostra

<sup>1</sup>  $E_0$  rappresenta l'energia acquisita, giudicata da un sistema di coordinate che si muove con il corpo.

attenzione, non è altro che l'energia posseduta dal corpo<sup>1</sup> prima che esso assorbisse l'energia  $E_0$ .

# Einstein 1922 Il significato della relatività

Se si applica l'ultima delle equazioni [43] a una particella materiale in quiete ( $q = 0$ ), si vede che l'energia  $E_0$  di un corpo in quiete è uguale alla sua massa. Se si fosse scelto come unità di tempo il secondo, si sarebbe ottenuto

$$E_0 = mc^2 . \quad [44]$$

Massa ed energia sono perciò essenzialmente simili; esse sono soltanto espressioni differenti della medesima cosa. La massa di un corpo non è una costante, ma varia al variare della sua energia.\* Dall'ultima delle equazioni [43], si vede che  $E$  diviene infinita quando  $q$  si avvicina a 1, cioè alla velocità della luce. Sviluppando  $E$  in serie di potenze di  $q^2$ , si ottiene

$$E = m + \frac{m}{2} q^2 + \frac{3}{8} mq^4 + \dots . \quad [45]$$

Il secondo termine di questo sviluppo corrisponde all'ener-

\* È ovvio, quindi, che l'impossibilità di esprimere i pesi atomici con numeri interi dipende dal fatto che, durante i processi radioattivi, si ha emissione di energia. È stato già dimostrato che dalla precedente relazione si possono trarre notevoli conclusioni sulla struttura e sulla stabilità del nucleo atomico.

# Einstein 1935

## ELEMENTARY DERIVATION OF THE EQUIVALENCE OF MASS AND ENERGY\*

be maintained in the face of the data of molecular physics. In the following considerations, except for the Lorentz transformation, we will depend only on the assumption of the conservation principles for impulse and energy.

for which after all is the really significant one? Here it is natural to give it directly the meaning of energy, hence to ascribe to the mass-point in a state of rest the *rest-energy*  $m$  (with the usual time unit,  $mc^2$ ).

Of course, this derivation cannot pretend to be a proof since

mere changes of translation velocity. The above interpretation asserts, then, that in such a transformation of a material point its inertial mass changes as the rest-energy; this assertion naturally requires a proof.

What we will now show is the following. If the principles of conservation of impulse and energy are to hold for all coordinate systems which are connected with one another by the Lorentz transformations, then impulse and energy are really given by the above expressions and the presumed equivalence of mass and rest-energy also exists.

can stipulate that  $E_0$  should vanish together with  $m$ . Then we have simply

$$E_0 = m,$$

which states the principle of equivalence of inertial mass and rest-energy.

# Einstein 1938

Un corpo in riposo possiede una massa determinata, la cosiddetta *massa di riposo*. La meccanica insegna che qualsiasi corpo oppone resistenza ad un mutamento del suo moto. Quanto maggiore è la massa, tanto più forte è la resistenza; od ancora: quanto minore è la massa, tanto più debole è la resistenza. Ma la teoria della relatività ci dice qualcosa di più. La resistenza che i corpi oppongono ad un mutamento è tanto più forte non soltanto quanto maggiore è la loro massa di riposo, ma altresì quanto maggiore è la loro velocità. Corpi dotati di velocità vicine a quella della luce opporrebbero resistenze enormi alle forze esterne. Secondo la meccanica classica, la resistenza di un dato corpo è invariabile e caratterizzata unicamente dalla sua massa. Nella teoria della relatività la resistenza dipende da ambo i fattori: massa di riposo e velocità del corpo. La resistenza diventa infinitamente grande, allorché la velocità raggiunge quella della luce.

Mediante esperimenti assai complicati ed ingegnosi è possibile accertare l'entità della resistenza che le particelle elementari in moto, oppongono all'azione di una forza esterna. Gli esperimenti provano che la resistenza offerta dalle particelle dipende dalla velocità, come previsto dalla teoria della relatività. In vari altri casi nei quali è possibile accertare che la resistenza dipende dalla velocità, c'è accordo completo fra teoria ed esperimento. Qui riconosciamo nuovamente i caratteri essenziali del lavoro creativo nel campo scientifico: la predizione teorica di determinati eventi e la loro conferma sperimentale.

Tali risultati suggeriscono un'ulteriore ed importante generalizzazione. Un corpo in riposo possiede massa, ma non possiede

energia cinetica ossia energia di moto. Un corpo in movimento possiede ambo le cose: massa ed energia cinetica. Esso resiste perciò alla variazione di velocità od accelerazione più fortemente del corpo in riposo. È come se l'energia cinetica del corpo in movimento accrescesse la sua resistenza. Di due corpi che possiedono la stessa massa di riposo, quello la cui energia cinetica è maggiore, oppone maggior resistenza all'azione di una forza esterna.

La ragione dell'accresciuta resistenza cinetica della scatola è la seguente maggior resistenza che la scatola opporrà al moto. L'energia o quanto meno l'energia cinetica, resiste al moto, come le masse ponderabili. Ma è ciò forse vero per tutte le specie o forme di energia?

A questa domanda la teoria della relatività dà una risposta chiara e netta, ricavata dai suoi presupposti fondamentali: una risposta, anche questa, di carattere quantitativo. *L'energia sotto tutte le sue forme si comporta come la materia*; un pezzo di ferro pesa più quando è caldo di quando è freddo; la radiazione emessa dal Sole attraverso lo spazio, possiede energia e pertanto anche massa; il Sole e tutte le stelle radianti perdono massa emettendo radiazione. Questa conclusione di carattere quantitativo generale costituisce un'importante conquista della teoria della relatività e si accorda con tutti i fatti rispetto ai quali è stata messa a prova.

La fisica classica aveva introdotto due sostanze: materia ed energia, la prima dotata di peso, la seconda imponderabile. In fisica classica si avevano perciò due leggi di conservazione, l'una

fu ed è decisamente: No! Secondo la teoria della relatività non c'è differenza essenziale fra massa ed energia. *L'energia possiede massa e la massa rappresenta energia.* In luogo di due leggi di conservazione ne abbiamo una sola: la legge di conservazione della massa-energia. Nell'ulteriore sviluppo della fisica, questa veduta si è mostrata assai fortunata e feconda.

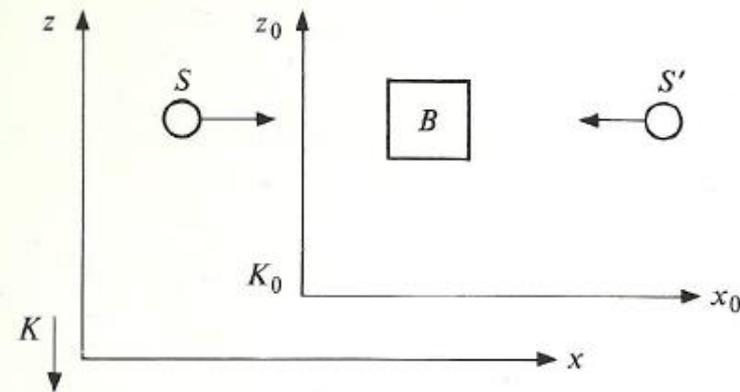
# Einstein 1946

## An elementary derivation of the equivalence of mass and energy

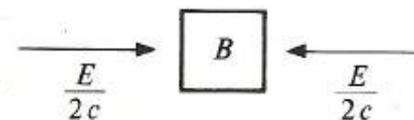
The following derivation of the law of equivalence, which has not been published before, has two advantages. Although it makes use of the principle of special relativity, it does not presume the formal machinery of the theory but uses only three previously known laws:

- (1) The law of the conservation of momentum.
- (2) The expression for the pressure of radiation; that is, the momentum of a complex of radiation moving in a fixed direction.
- (3) The well known expression for the aberration of light (influence of the motion of the earth on the apparent location of the fixed stars—Bradley).

We now consider the following system. Let the body  $B$  rest freely in



space with respect to the system  $K_0$ . Two complexes of radiation  $S, S'$  each of energy  $E/2$  move in the positive and negative  $x_0$  direction respectively and are eventually absorbed by  $B$ . With this absorption the energy of  $B$  increases by  $E$ . The body  $B$  stays at rest with respect to  $K_0$  by reasons of symmetry.



We now assume the law of the conservation of momentum and apply it with respect to the  $z$  direction. This gives the equation

$$Mv + \frac{E}{c^2}v = M'v$$

$$M' - M = \frac{E}{c^2}$$

This equation expresses the law of the equivalence of energy and mass. The energy increase  $E$  is connected with the mass increase  $E/c^2$ . Since energy according to the usual definition leaves an additive constant free, we may so choose the latter that

$$E = Mc^2$$

# Einstein 1949 Autobiografia scientifica

rinunziare a un'interpretazione fisica delle coordinate in generale (ciò che sarebbe, in sé, possibile), era meglio accettare questa contraddizione, con l'obbligo però di eliminarla in uno stadio più avanzato della teoria. Ma non si può legalizzare questo peccato fino al punto d'immaginare che gli intervalli siano entità fisiche di tipo particolare, intrinsecamente diverse dalle altre grandezze fisiche ("ridurre la fisica a geometria," ecc.).

Vediamo ora quali concetti di carattere definitivo la fisica debba alla teoria della relatività particolare.

1) Non esiste alcuna simultaneità per eventi fra loro lontani: quindi non esiste nemmeno alcuna azione immediata a distanza, nel senso della meccanica newtoniana. E anche se l'introduzione di azioni a distanza, che si propagano con la velocità della luce, resta ammissibile secondo tale teoria, essa sembra però innaturale, poiché in una teoria siffatta sarebbe impossibile affermare ragionevolmente un principio come quello della conservazione dell'energia. Sembra perciò inevitabile che la realtà fisica debba essere descritta in termini di funzioni continue nello spazio. Il punto materiale, quindi, non può più essere considerato come il concetto base della teoria.

2) I due principi della conservazione della quantità di moto e della conservazione dell'energia si fondono in un unico principio. La massa inerte di un sistema chiuso coincide con la sua energia, e la massa viene così eliminata come concetto indipendente.

La possibilità di dimostrare questo schema era però assai dubbia fin dal principio, perché la teoria doveva mettere d'accordo i seguenti fatti:

1) dalle considerazioni generali della teoria della relatività particolare risultava chiaro che la massa inerte di un sistema fisico doveva aumentare con l'aumento dell'energia totale (quindi, ad esempio, dell'energia cinetica);

2) da esperimenti molto accurati (specialmente dagli esperimenti fatti con la bilancia di torsione di Eötvös) era noto empiricamente con altissima precisione che la massa gravitazionale di un corpo è esattamente uguale alla sua massa inerte.

Da 1) e 2) seguiva che il peso di un sistema dipende in modo perfettamente noto dalla sua energia totale. Se la teoria non giustificava questo, o non poteva farlo in modo naturale, doveva essere respinta. La stessa condizione può esprimersi più semplicemente come segue: l'accelerazione di un sistema che cada liberamente in un dato campo gravitazionale è indipendente dalla natura del sistema che cade (e quindi, in particolare, anche dal suo contenuto di energia).

Apparve così chiaro che, nell'ambito dello schema delineato, questo stato di cose elementare non poteva assolutamente, o per lo meno non poteva in modo naturale, essere rappresentato in maniera soddisfacente. Ciò mi convinse che, nell'ambito della teoria della relatività particolare, non c'è posto per una soddisfacente teoria della gravitazione.

Allora mi venne in mente questo: l'uguaglianza della massa inerte e di quella pesante, cioè l'indipendenza dell'accelerazione gravitazionale dalla natura di ciò che cade, può essere espressa come segue: in un campo gravitazionale (di piccola estensione spaziale) tutto accade come in uno spazio libero da gravitazione, purché vi si introduca, al posto di un "sistema inerziale", un sistema di riferimento accelerato rispetto a un sistema inerziale.

energia invece ci porta senz'altro a delle cifre grandiose. Ad esempio se si riuscisse a mettere in libertà l'energia contenuta in un grammo di materia si otterrebbe un'energia maggiore di quella sviluppata in tre anni di lavoro ininterrotto da un motore di mille cavalli (inutili i commenti!). Si dirà con ragione che non appare possibile che, almeno in un prossimo avvenire, si trovi il modo di mettere in libertà queste spaventose quantità di energia, cosa del resto che non si può che augurarsi, perché l'esplosione di una così spaventosa quantità di energia avrebbe come primo effetto di ridurre in pezzi il fisico che avesse la disgrazia di trovar il modo di produrla.

Ma se anche una tale esplosione completa della materia non appare per ora possibile, sono però già in corso da qualche anno delle esperienze dirette ad ottenere la trasformazione degli elementi chimici uno nell'altro. Tale trasformazione, che si presenta naturalmente nei corpi radioattivi è stata recentemente ottenuta anche artificialmente da Rutherford che, bombardando con delle particelle  $\alpha$  (corpuscoli lanciati con velocità grandissime dall'



dando con delle particelle  $\alpha$  (corpuscoli lanciati con velocità grandissima dalle sostanze radioattive) degli atomi, è riuscito ad ottenerne la decomposizione. Ora a queste trasformazioni degli elementi uno nell'altro sono legati degli scambi energetici che la relazione tra massa ed energia ci permette di studiare in modo molto chiaro. Ad illustrarli valga ancora un esempio numerico. Si ha ragione di ritenere che il nucleo dell'atomo di elio sia costituito da quattro nuclei dell'atomo di idrogeno. Ora il peso atomico dell'elio è 4,002 mentre quello dell'idrogeno è 1,0077. La differenza tra il quadruplo della massa dell'idrogeno e la massa dell'elio, è dunque dovuta all'energia dei legami che uniscono i quattro nuclei di idrogeno per formare il nucleo dell'elio. Questa differenza è 0,029 corrispondente, secondo la relazione relativistica tra massa ed energia ad un'energia di circa sei miliardi di calorie per grammo-atomo di elio. Queste cifre ci dimostrano che l'energia dei legami nucleari è qualche milione di volte maggiore di quella dei più energici legami chimici e ci spiegano come contro il problema della trasformazione della materia, il sogno degli alchimisti, si siano per tanti secoli rotti gli sforzi degli ingegni più eletti, e come solo ora, adottando i mezzi più energici a nostra disposi-

il sogno degli alchimisti, si siano per tanti secoli rotti gli sforzi degli ingegni più eletti, e come solo ora, adottando i mezzi più energici a nostra disposizione, si sia riusciti ad ottenere questa trasformazione; in quantità del resto tanto minime da sfuggire alla più delicata analisi.

Bastino questi brevi accenni a dimostrare come la teoria della relatività, oltre a darci una interpretazione chiara delle relazioni tra spazio e tempo, sarà, forse in un prossimo avvenire, destinata ad esser la chiave di volta per la risoluzione del problema della struttura della materia, l'ultimo e più arduo problema della fisica.

# Roger Stuewer 1993

James Chadwick's discovery of the neutron in February 1932 (Chadwick 1932a, [1932b] 1949) occurred in the midst of a plethora of developments that, within a short period of time, fundamentally transformed the field of nuclear physics. Preceded by Harold C. Urey's discovery of deuterium in December 1931 (Urey et al. 1932), Chadwick's discovery was followed by Carl D. Anderson's discovery of the positron in August 1932 (Anderson 1932, [1933] 1949). New machines also were invented. Less than a week after Chadwick reported his discovery, his colleagues John D. Cockcroft and Ernest T. S. Walton sent off a description of their proton accelerator for publication (Cockcroft and Walton [1932a] 1966), and two months later they reported its use in disintegrating the lithium nucleus (Cockcroft and Walton 1932b, [1932c] 1949). Virtually simultaneously, Ernest O. Lawrence and his former student, M. Stanley Livingston, submitted a paper for

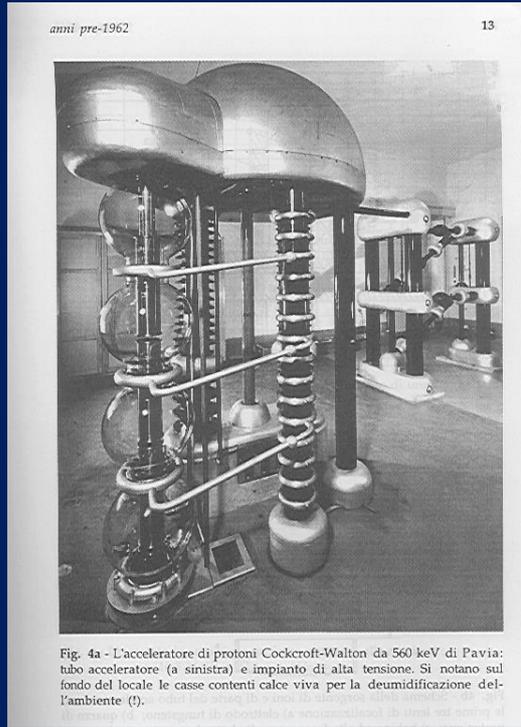
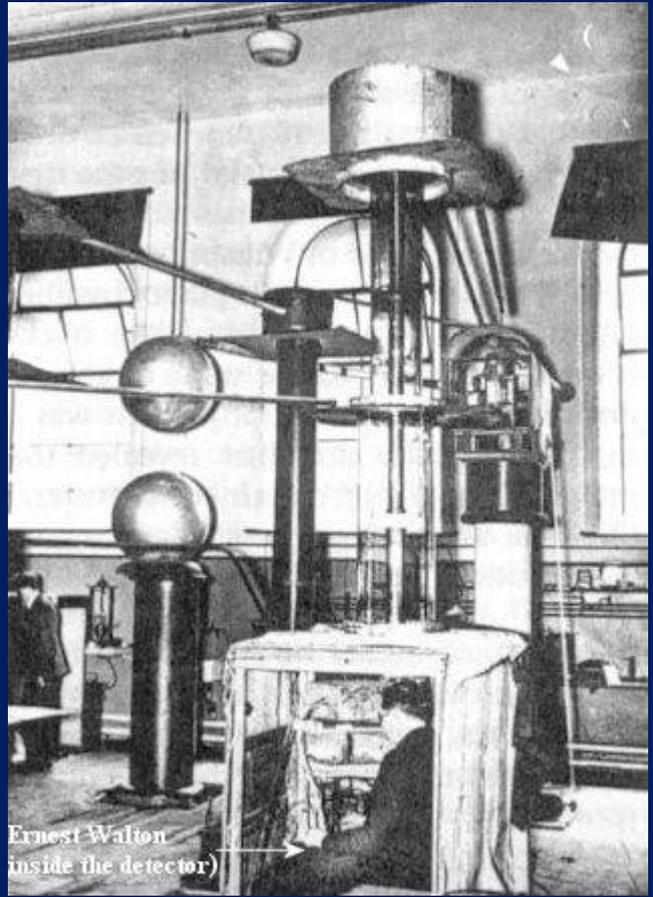


publication reporting the production of energetic protons using a new type of accelerator eventually called a “cyclotron” (Lawrence and Livingston [1932] 1966). Other accelerators soon went into operation as well — for example, Merle A. Tuve’s electrostatic generator (Tuve 1933) and Charles C. Lauritsen and H. Richard Crane’s two-stage cascade accelerator (Crane and Lauritsen 1933; Crane et al. 1934).

All of these discoveries and inventions of that *annus mirabilis* of 1932 in nuclear physics had lives of their own, yet each influenced others in significant ways, the whole forming a complex, evolving matrix of experiment and theory. My principal focus in this paper will be on one of these discoveries, that of the neutron, and we shall see how each of the other discoveries and inventions cited above played a role in elucidating its properties and nature.

Inseparably involved in this quest was Albert Einstein’s mass-energy relationship,  $E = mc^2$ . This illuminates yet another aspect of the period, further displaying its complexity, for Einstein’s mass-energy relationship occupied an ambivalent position in nuclear physics circa 1932. On the one hand, nuclear physicists used it freely in their work; on the other hand, they knew that it had never been tested and confirmed experimentally. My first task, then, must be to place Einstein’s mass-energy relationship within the context of nuclear physics in

1932



anni pre-1962

13

Fig. 4a - L'acceleratore di protoni Cockcroft-Walton da 560 keV di Pavia: tubo acceleratore (a sinistra) e impianto di alta tensione. Si notano sul fondo del locale le casse contenenti calce viva per la deumidificazione dell'ambiente (!).

# Einstein sulla conferma di $e=mc^2$



- "It followed from the special theory of relativity that mass and energy are both but different manifestations of the same thing -- a somewhat unfamiliar conception for the average mind. Furthermore, the equation  $E$  is equal to  $m c$ -squared, in which energy is put equal to mass, multiplied by the square of the velocity of light, showed that very small amounts of mass may be converted into a very large amount of energy and vice versa. The mass and energy were in fact equivalent, according to the formula mentioned before. This was demonstrated by Cockcroft and Walton in 1932, experimentally."

# Stuewer 1993

In other words, Cockcroft and Walton did not see their experiments as a *test* of Einstein's mass-energy relationship; rather, they simply used that relationship in their analysis, assuming it to be valid.

The experimental testing of Einstein's mass-energy relationship thus was not a significant part of Cockcroft and Walton's motivation to invent and use their accelerator. Instead, with the support of Rutherford, and encouraged by George Gamow's quantum-mechanical barrier-penetration calculations, Cockcroft and Walton were primarily interested in gaining more knowledge about the structure of the nucleus.<sup>3</sup> Other consequences might follow, but only as by-products of this primary objective.

Thus it was not Cockcroft and Walton in early 1932 but Kenneth T. Bainbridge one year later who first called attention to the Cockcroft-Walton experiment as a means of testing Einstein's mass-energy relationship. In April 1933, Bainbridge was quoted as saying:

The results of atomic mass measurements in cooperation with disintegration experiments furnish an experimental proof of the equivalence of mass and energy deduced theoretically by Einstein. The best example of this is given by the experiments of Cockcroft and Walton. (Quoted in "Energy Turned into Mass" 1933)

### What is the Role of the Electron in Nuclear Physics?

Is the electron, the light particle, also the basic particle? Yes: so the successes of Dirac's relativistic theory of the electron<sup>168</sup> were beginning to make one think in the early 1930s. Moreover, the Dirac electron, by filling all negative energy states, had preempted even the vacuum for its own, and endowed that vacuum with a rich and interesting physics. The ostensibly infinite density of electric charge and infinite polarizability of this vacuum Dirac<sup>169</sup> and Heisenberg<sup>170</sup> in beautiful papers had taught us how to regularize.

Was not the dead dream of Lorentz<sup>171</sup> and Poincaré<sup>172</sup>—to give a purely electromagnetic account of the structure of matter<sup>173</sup>—almost at the point of reviving in a new form, an electron-theory account of matter?

“Why was it that you turned away from considering the electron as the truly simple particle,” I once asked Heisenberg,<sup>174</sup> “while Dirac continued in that view?” “The discovery of the neutron<sup>175</sup> convinced me,” he replied, “that the electron is not more fundamental than other particles.”

To come so quickly to so firm a conclusion as Heisenberg's was not within my power. His hypothesis<sup>176</sup>—and Iwanenko's<sup>177</sup>—that nuclei are made of neutrons and protons I had used and I would continue to use wholeheartedly, as did other colleagues working in nuclear physics. However, in addition to that picture, not in contradiction to it, might not these neutrons and protons themselves be made of electrons? Would that not be a natural consequence of Dirac's concept of the electron as the basic principle? In default of convincing observational or theoretical evidence against this view, or some beautiful alternative, how could one keep from reflecting on what an electron theory of matter might mean?

Electrons? The basic entities in nuclear physics are not electrons at all but nucleons—according to a proposal made by Yukawa<sup>178</sup> in 1935 and soon generally accepted, far from being thoroughly definitive though that proposal is today, forty-two years and hundreds of research papers later. Not a dissenting voice was to be heard when lecture after illuminating lecture on nuclear physics began with the Standard Strong-Force Credo: (1) the nucleus contains no electrons; (2) the force that binds nucleons has nothing to do with electromagnetism and constitutes a new “strong force”; and (3) this force is transmitted by mesons.

A single miracle could be laid to the credit of this Strong-Force Credo: the correlation between the mass of the meson and the range of nuclear force. Was it impressive enough to justify the stilling of all doubt? A great part of physics was at stake. I would not have had a good conscience if I had foreclosed all thought of alternative interpretations of the evidence. Frankly I could not accept the Strong-Force Credo. Why not say neither yea nor nay until light should come? Coming from a family that had fled England in the

What about the strength of the force that binds nucleon to nucleon? If it were  $10^{39}$  times stronger, or even  $10^6$  times stronger, than the electric force, one could regard as compelling the argument for a new, "strong" force. However, the actual factor is only  $\sim 10^2$ . Moreover, if the nucleus actually contained electrons, they would be of necessity not only highly relativistic but also violently and frequently accelerated. Under these conditions the accelerative component of the force acting from particle to particle could be expected enormously to exceed the static component. Were these not exactly the right conditions to build up electromagnetic forces to the order of magnitude of the so-called strong forces?

How could one be conscientious about questioning the Strong-Force Credo if one did not give a careful look at this only evident alternative? And how then could one escape a careful look at the interaction between highly accelerated relativistic electrons? This was the motive for taking a fresh look at the theory of electromagnetic action at a distance of Schwarzschild,<sup>189</sup> Tetrode,<sup>190</sup> Frenkel,<sup>191</sup> and Fokker.<sup>192</sup>

An independent difficulty made it natural to think along the same lines: the so-called infinite self-energy of a point particle. How could one forebear from asking if this was not a difficulty of one's own making? In dealing with macroscopic bodies, one was accustomed to write the field energy in the form  $(1/8\pi) \int E^2 d(\text{volume})$ . However, evaluated for two-point particles at rest, where the electric field is

$$E = e_1 r_1 / r_1^3 + e_2 r_2 / r_2^3 ,$$

this integral contains not only an interaction term,

$$(2/8\pi) \int (E_1 \cdot E_2) d(\text{volume}) = e_1 e_2 / r_{12} ,$$

in full agreement with experience, but also two "self-energy" integrals which, being infinite, make no sense. Why not be happy with the part that agrees with experience and discard the part that doesn't? I kept a slow fire going under questions of this kind all through my three years at Chapel Hill; and sometime after mid-January 1939, several months after I had gone to Princeton I discussed these considerations with Léon Rosenfeld, then visiting Princeton. He objected that electromagnetic radiation seemed to have no place in this picture. Some time later, reflecting quietly at home one Sunday afternoon on the back of an envelope, I suddenly recognized that if there were enough absorber particles around to absorb completely the radiation from an accelerated source, it would make no difference how numerous were these particles, nor what their properties. However, I failed by a factor two to get the right result for the familiar force of radiative reaction. The next day I told Richard Feynman, then a graduate student, about my line of thought and about my results. Thanks to our usual lively discussion the factor two was cleared up along with many other ramifications of "interaction with the absorber as the mechanism of radiation."<sup>193</sup> We were not able to write up and publish this work<sup>194</sup> until after World War II; and we never did publish the larger ranging work we had been doing at the time on scattering theory.

Could one find some way to translate this classical theory of direct particle interaction into quantum terms? This question, Feynman tells us in his Nobel Prize Lecture,<sup>195</sup> drove him to his beautiful "sum over histories" way of doing quantum mechanics<sup>196</sup> with its later payoff in quantum electrodynamics.<sup>197</sup>

Why did Feynman and I give up direct interparticle interaction? It was not a failure at describing interaction. It was a failure at describing particles. Nowhere did this show more clearly than in the "zig-zag world line" description of pair annihilation which Feynman<sup>198</sup> attributes to me but which, unbeknownst to me, had been put forward by Stueckelberg.<sup>199</sup> From that picture one recognizes that the so-called particle in any proper quantum theory is in actuality a kind of cloud of virtual particles in which creation and

annihilation are continually taking place. As a consequence the object that one calls a "particle" is immensely more complicated than is recognized by any single simple history of it as a world line.

### Beyond Particles, beyond Fields

It is sometimes said that "no one gets religion like a reformed drunkard." In keeping with that observation, I who had given so much effort to the theory of direct particle interaction ("sweeping out electromagnetic fields from between the point charges"), and who later devoted the summer and fall of 1949 to exploring gravitational action at a distance ("sweeping out space and time from between the elementary particles") became as "field theoretical" as anyone can be. If everything cannot be reduced to particles and the interaction between them, is it not reasonable to think of everything built out of field, including the particles themselves? And not many fields, but only one field? And what field is more naturally taken as basic than geometry? Who that observes the marvelous depth and scope of Einstein's purely geometrical theory of gravity could think of any other field as primordial? Twenty years more (1953-73) brought many new insights but most of all the realization<sup>200</sup> that any such picture is too finalistic to be final. Surely no theory of physics that deals only with physics will ever yield the key to physics! Rather than particles, rather than fields, may not the building blocks of nature be something ever so much more tenuous: elementary quantum acts of observer-participant?<sup>201</sup> And what "machinery" do they fall together to make? However, that is another story!

Go anywhere. See anyone. Ask any question. Make headway by making all possible mistakes, but make them as fast as possible and recognize them:<sup>202</sup> this was the spirit with which I and many another colleague participated in "the search." One nevertheless knows that one will fall without hope of recovery if one tries to reach out too far without keeping one's feet on solid ground. In my own case, that solid ground was nuclear physics. That topic brings me back from relativistic electrons to the other subject of primary concern to me in my three years at Chapel Hill, the structure and interactions of nuclei with special reference to the scattering of one nucleus by another.

# 1987 H. Bondi and C. B. Spurgin: "Energy Has Mass"

not so. Mass and energy are not interconvertible. They are entirely different quan-

The incorrect notion that mass can be converted to energy probably owes its origin to simplified popular accounts of nuclear fission processes, where emphasis is laid on the fact that the particulate fission products of uranium have a total rest mass somewhat less than that of the uranium atom and initiating neutron, while a very considerable amount of energy seems to have appeared from nowhere (as kinetic energy of products, energy of photons etc). But this energy has mass equal to the mass that seems to have disappeared. The energy has not come from nowhere; it was formerly present as potential energy of the arrangement of protons and neutrons prior to the fission – potential energy which has been diminished by the rearrangement into more stable fission products. It is the loss of this potential energy which gives rise to the apparent reduction in mass which is observed if one ignores the mass of the energy released. Potential energy has diminished and kinetic energy has increased. Mass of potential energy has diminished and mass of kinetic energy has increased. Energy has been conserved and mass has been conserved, each separately.

nuclide. Some of the rest mass is the mass of potential energy of the proton, neutron, electron or nucleus. However, the rest mass of any photon is zero, but since it carries finite energy it has finite mass – the mass of the energy it carries. Thus energy and its mass may be transferred among objects of differing rest masses, including zero. In a nuclear reaction (and indeed, though to a much smaller extent, in a chemical reaction) rest mass is generally not conserved, since often in the final state much energy is carried by photons, of zero rest mass; but energy is always conserved, and when its mass is taken into account along with all the rest masses we find that mass is always conserved.

## Getting it right

The best way to appreciate Einstein's conclusion is to realise that energy has mass. The best way to express it is to say that the mass of energy  $E$  is  $m$ , given by  $m = E/c^2$ . Students should be taught that:

- (i) energy has mass;
- (ii) energy is always conserved;
- (iii) mass is always conserved.

They should be warned against believing erroneous statements that mass and energy are interconvertible, and they should be urged to avoid such terminology as 'the equivalence of mass and energy'.

# 2007 Baierlein, Ralph: “Does Nature Convert Mass into Energy?”

- (1) Ontological status makes a difference. Particles and fields exist as “things;” inertia and energy exist as attributes of things.
- (2) In the context of  $E=mc^2$ , the letter  $m$  and the word mass denote “inertial mass,” that is, inertia.
- (3) At the most fundamental level, conservation of energy includes rest energy, which is conceptually distinct from rest mass.
- (4) Of course, the relation  $E_0=m_0c^2$  declares that rest energy and rest mass are universally proportional. Inertia, a dynamically measurable quantity, provides a dipstick for extractable energy content.
- (5) One may regard inertia and energy as “identical” in the sense that a single parameter suffices to determine both the rest mass and the rest energy of a particle or closed system.
- (6) One can analyze reactions (including nuclear fission and the creation and annihilation of particles) by using conservation of energy and momentum alone. There is no need to speak of “converting” mass to energy or vice versa.

A brief list of authors who write of “conversion” generates a distinguished collection: Max von Laue,<sup>24</sup> Wolfgang Pauli,<sup>25</sup> Edwin F. Taylor and John A. Wheeler,<sup>26</sup> Julian Schwinger,<sup>27</sup> and even Einstein.<sup>28</sup>

# 1999 Wilczek Frank. "Mass without Mass.1" *Physics Today*

With his unique talent for the paradoxical profundity, John Wheeler coined the phrase "mass without mass" to advertise the goal of removing any mention of mass from the basic equations of physics.<sup>1</sup> Can we

energy in terms of mass. But it doesn't take an Einstein to derive from that equation  $m = E/c^2$ , which suggests the possibility of explaining mass in terms of energy. And the con-

to replace. In quantum field theory, the primary elements of reality are not individual particles, but underlying fields. Thus, for example, all elec-

In practice, we do much better. The bulk of the mass of ordinary matter (better than 99%) comes from the masses of protons and neutrons. In quantum chromodynamics (QCD), the protons and neutrons appear as secondary, composite structures built up from quarks and gluons. We can

How is it possible that massive protons and neutrons can be built up out of strictly massless quarks and gluons? The key is  $m = E/c^2$ . There is energy stored in the motion of the quarks, and energy in the color gluon fields that connect them. This bundling of energy makes the proton's mass.

The emergent picture of the proton mass realizes, in a different context, a modified form of the dream of Hendrik A. Lorentz<sup>4</sup> (pursued by many others including Henri Poincaré, P. A. M. Dirac, Wheeler, and Richard Feynman) to account for the electron's mass entirely in terms of its electromagnetic fields. A classical

wrong, and something close to Lorentz's idea is embodied in modern QCD. Quarks carry color charge, and generate color electric fields analogous to the ordinary electric fields around electrons. The potentially

Thus QCD takes us a long stride toward the Einstein–Wheeler ideal of "mass without mass." For ordinary

# 2000 Wilczek Frank. “Mass without Mass.2” *Physics Today*

By contrast, in the other part of the Standard Model of particle physics, the electroweak sector, mass without mass is indispensable. The

actions couldn't work without it. For the core principle of this theory is chiral gauge symmetry, and chiral gauge symmetry abhors mass. This

From two independent perspectives, therefore, we see that the theory of the weak interaction would much prefer a world built from massless particles. Ours is not such a world. There is a happy resolution, however.

condensate. Something new must be added—the so-called Higgs field. What we call empty space, or vacuum, is filled with a condensate spawned by that field.

Let me summarize. We've come a long way toward dethroning mass as a primary, irreducible property of matter. Most of the mass of ordinary matter, for sure, is the pure energy of moving quarks and gluons. The remainder, a quantitatively small but qualitatively crucial remainder—it includes the mass of electrons—is all ascribed to the confounding influence of a pervasive medium, the Higgs field condensate. There is already much indirect evidence for this concept, and crucial direct tests are in the offing.

Indeed, notoriously, the source of most of the gravitational mass in the universe is yet to be identified. “Mass without matter”? As we realize past dreams, we awaken to new realities. ■

## 2003 Wilczek, Frank. “Origins of Mass.” *Open Physics*

Later developments in physics make the concept of mass seem less irreducible. Einstein’s famous equation  $E = mc^2$  of special relativity theory, written in that way, betrays the prejudice that we should express energy in terms of mass. But we can write the same equation in the alternative form  $m = E/c^2$ . When expressed in this form, it suggests the possibility of explaining mass in terms of energy. Einstein was aware of this possibility from the beginning. Indeed, his original 1905 paper is entitled, “Does the Inertia of a Body Depend on Its Energy Content?” and it derives  $m = E/c^2$ , not  $E = mc^2$ . Einstein was thinking about fundamental physics, not bombs.

A major goal of theoretical physics is to describe the world with the greatest possible economy of concepts. For that reason alone, it is an important result that we can largely eliminate mass as an independent property that we are forced to

# 2003 Wilczek, Frank. "Origins of Mass." *Open Physics*

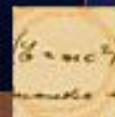
introduce in order to describe matter accurately. But there is more. The equations that describe the behavior of elementary particles become fundamentally simpler and more symmetric when the mass of the particles is zero. So eliminating mass enables us to bring more symmetry into the mathematical description of Nature.

The understanding of the origin of mass that I've sketched for you here is the most perfect realization we have of Pythagoras' inspiring vision that the world can be built up from concepts, algorithms, and numbers. Mass, a seemingly irreducible property of matter, and a byword for its resistance to change and sluggishness, turns out to reflect a harmonious interplay of symmetry, uncertainty, and energy. Using these concepts, and the algorithms they suggest, pure computation outputs the numerical values of the masses of particles we observe.

Still, as I've already mentioned, our understanding of the origin of mass is by no means complete. We have achieved a beautiful and profound understanding of the origin of *most* of the mass of ordinary matter, but not of *all* of it. The value of the electron mass, in particular, remains deeply mysterious even in our most advanced speculations about unification and string theory. And ordinary matter, we have recently learned, supplies only a small fraction of mass in the Universe as a whole. More beautiful and profound revelations surely await discovery. We continue to search for concepts and theories that will allow us to understand the origin of mass in all its forms, by unveiling more of Nature's hidden symmetries.

“Eliminating mass enables us to bring more symmetry into the mathematical description of Nature.”

# Einstein Archives Online



Digitized Manuscripts



Finding Aid



Archival Database



Gallery

About

Terms of Use

Credits

Feedback

A joint project of



**Albert Einstein Archives**  
The Library Authority  
The Hebrew University of Jerusalem  
האוניברסיטה העברית בירושלים

**Einstein Papers Project**  
at the **California Institute of Technology**  
with the support of  
**Princeton University Press**



# Berlin Declaration on Open Access

My World x Op-Ed Columnist - Behind the Bush Bu... x berlin declaration - Google Desktop x Open

HOME

Contact | Location | Sponsors | Impressum



MAX-PLANCK-GESELLSCHAFT

**Program**  
OA Conference  
Program  
Committee  
ECHO Meeting

**Berlin Declaration**  
Declaration  
Recommendation  
Roadmap  
Signatories  
Press Release &  
Statement

**Participants** List  
Snapshots

**Links**  
OA Resources  
Media Coverage

**Follow-Up Conferences**  
CERN  
May 2004  
SOUTHAMPTON  
Feb 2005  
Golm  
March 2006

## Conference on

## Open Access to Knowledge in the Sciences and Humanities

20 - 22 Oct 2003, Berlin

## Berlin Declaration

## Berlin Declaration on Open Access to Knowledge in the Sciences and Humanities

### Preface

The Internet has fundamentally changed the practical and economic realities of distributing scientific knowledge and cultural heritage. For the first time ever, the Internet now offers the chance to constitute a global and interactive representation of human knowledge, including cultural heritage and the guarantee of worldwide access.

We, the undersigned, feel obliged to address the challenges of the Internet as an emerging functional medium for distributing knowledge. Obviously, these developments will be able to significantly modify the nature of scientific publishing as well as the existing system of quality assurance.

In accordance with the spirit of the Declaration of the Budapest Open Access Initiative, the ECHO Charter and the Bethesda Statement on Open Access Publishing, we have drafted the Berlin Declaration to promote the Internet as a functional instrument for a global scientific knowledge base and human reflection and to specify measures which research policy makers, research institutions, funding agencies, libraries, archives and museums need to consider.

# Risorse

- Einstein's papers
- Nobel
- Stanford Encyclopedia of Philosophy
- Internet Encyclopedia of Philosophy
- Dictionary of the history of ideas
- Wikipedia
- Treccani: <http://www.treccani.it/>
  
- Science and education (rivista Springer)
- Handbook (Springer)
- Dictionary of scientific biography 1 e 2
- 
  
- Risorse cartacee:
- Sezione di Fisica della Biblioteca delle Scienze (in particolare la parte di Storia della Scienza)
- Possibilità di accesso alle riviste?

# Risorse online

AIP

<https://history.aip.org/history/exhibits/mod/fission/fission1/01.html>

<https://history.aip.org/history/exhibits/einstein/nuclear1.htm>

MOOC:

Harvard, MIT e altri: <https://www.edx.org/> 1748 corsi



MIT: Materiali dei corsi: <https://ocw.mit.edu/index.htm>

materials from

**2400**

courses

**200**

million visitors

[» more site statistics](#)

**“The idea is simple: to publish all of our course materials online and make them widely available to everyone.”**

**Dick K.P. Yue, Professor, MIT School of Engineering**

### Unlocking Knowledge

MIT OpenCourseWare (OCW) is a web-based publication of virtually all MIT course content. OCW is open and available to the world and is a permanent MIT activity.

[» View a list of our most visited courses](#)

### Empowering Minds

Through OCW, educators improve courses and curricula, making their schools more effective; students find additional resources to help them succeed; and independent learners enrich their lives and use the content to tackle some of our world's most difficult challenges, including sustainable development, climate change, and cancer eradication.

Stanford e altri: <https://www.coursera.org/>



**Stanford**

**UC San Diego**



**25**  
MILLION

LEARNERS

**149**

UNIVERSITY  
PARTNERS

**2,000+**

COURSES

**180+**

SPECIALIZATIONS

**4**

DEGREES

Khan Academy: <https://www.khanacademy.org/>

# Traduzioni

- **DeepL:** <https://www.deepl.com/translator>
- “On the same day that Frisch sent his two scientific papers on fission out for publication—January 16, 1939—Niels Bohr's ocean liner docked in New York. Enrico Fermi was on the pier to meet him. The Italian physicist had arrived in New York two weeks earlier. The Fascist government had allowed him to leave Italy to personally accept the Nobel Prize in Stockholm. Fermi, whose wife was of Jewish ancestry, had decided not to return, but to instead take a post at Columbia University. The next day Bohr came up to Columbia, and there he happened to run into Herbert Anderson, a physics graduate student. Anderson never forgot the meeting...”
- “Lo stesso giorno in cui Frisch inviò i suoi due articoli scientifici sulla fissione per la pubblicazione (16 gennaio 1939), il transatlantico **oceanico** di Niels Bohr approdò a New York. Enrico Fermi era sul molo per incontrarlo. Il fisico italiano era arrivato a New York due settimane prima. Il governo fascista gli aveva permesso di lasciare l' Italia per accettare personalmente il Premio Nobel a Stoccolma. Fermi, la cui moglie era di ascendenza ebraica, aveva deciso di non tornare, ma di assumere un incarico presso la Columbia University. Il giorno dopo Bohr salì **in Colombia**, e lì si imbatté in Herbert Anderson, uno studente **di fisica laureato in fisica**. Anderson non ha mai dimenticato l' incontro....”