

**Luciano
Ramello**

Università degli Studi
del Piemonte
Orientale "Amedeo
Avogadro" e INFN,
Torino

I neutrini all'OPERA

ABSTRACT

The OPERA experiment, based on the observation of about 16000 neutrino events measured at Gran Sasso, seems to indicate that the neutrinos travelled at 25 parts per million above the speed of light. The article describes some details of the procedure for measuring the neutrinos' velocity and briefly outlines possible experimental checks and some implications for theory.

**I neutrini e
l'esperimento
OPERA**

La fisica dei neutrini continua a fornire risultati sorprendenti dopo circa 80 anni dalla prima ipotesi sull'esistenza del neutrino, fatta da W. Pauli come tentativo disperato per salvare la conservazione dell'energia nel decadimento beta (il nome neutrino è dovuto a E. Fermi). Il tema di ricerca attualmente più caldo riguarda le oscillazioni di neutrini, ovvero la possibilità che un neutrino di un dato sapore (elettronico, muonico o tau) si trasformi in un neutrino di altro sapore. Storicamente il primo indizio in questa direzione è stato il deficit di neutrini solari – rispetto a quelli attesi nel modello di produzione di energia nel Sole – rivelati sulla Terra (R. Davis, inizio degli anni 1970) in una miniera d'oro nel South Dakota; per la soluzione di questo problema si veda [1]. Una condizione necessaria affinché l'oscillazione avvenga è che i neutrini abbiano una massa diversa da zero: il limite superiore sperimentale (ottenuto in laboratorio) è di circa $2 \text{ eV}/c^2$ per l'antineutrino elettronico; dati astrofisici forniscono un limite dello stesso ordine di grandezza per la somma delle masse dei tre neutrini.

Gli esperimenti K2K in Giappone e MINOS negli Stati Uniti hanno pubblicato nel 2006 risultati concordanti sulla sparizione di neutrini muonici (ν_μ) prodotti mediante acceleratori. In particolare MINOS con un fascio di ν_μ di energia media 3 GeV ha osservato una diminuzione di circa 1/3 del flusso di ν_μ alla distanza di 734 km tra il FermiLab e il rivelatore, collocato nella miniera di ferro di Soudan nel Minnesota. L'interpretazione corrente, basata anche su altre osservazioni, è che la maggior parte dei ν_μ scomparsi si siano trasformati in neutrini tau (ν_τ).

L'esperimento OPERA [2] ai Laboratori Nazionali del Gran Sasso è stato progettato per rivelare direttamente l'apparizione di ν_τ in un fascio quasi puro di ν_μ prodotto al CERN. Il percorso di circa 730 km tra il CERN e il Gran Sasso, illustrato in Figura 1, è analogo in lunghezza a quello dell'esperimento MINOS, mentre l'energia media dei neutrini del CERN (17 GeV) è più alta di quella del FermiLab, in modo da massimizzare il numero di ν_τ rivelabili al Gran Sasso.

Il fascio di neutrini prodotto al CERN (si veda ad es. [3]) è illustrato in Figura 2. Protoni da 400 GeV vengono estratti dal *Super Proton Synchrotron* (SPS) e inviati su un bersaglio di grafite, nel quale vengono prodotti mesoni π e K. I mesoni di carica positiva vengono focalizzati da due magneti verso un tunnel di decadimento lungo circa 1 km, nel quale i mesoni decadono producendo un muone positivo e un neutrino muonico. Gli adroni rimanenti vengono assorbiti in un blocco di ferro, mentre i muoni vengono assorbiti successivamente dalla roccia.

L'apparato di OPERA (Figura 3) consiste di due supermoduli identici, ciascuno costituito da un bersaglio di 625 tonnellate, con pareti fatte di mattoni emulsione/piombo alternati a piani di scintillatori, e da uno spettrometro per muoni.

Gli scintillatori segnalano la presenza di una interazione nel bersaglio, mentre lo spettrometro verifica la presenza o meno di un muone tra i prodotti dell'interazione.

Gli eventi più interessanti sono quelli indotti da ν_τ : senza muone al vertice di interazione e con produzione di un leptone tau, identificato in emulsione dal suo caratteristico decadimento in una o tre particelle cariche.

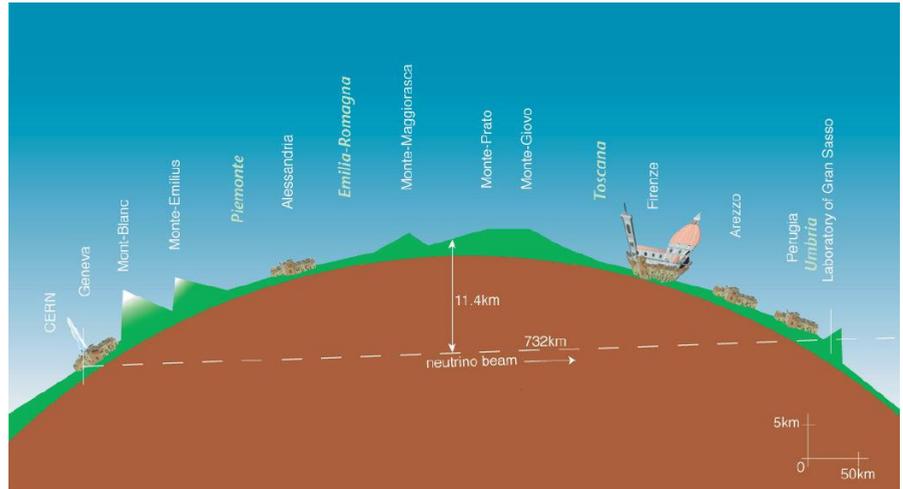


Figura 1. Schema del percorso dei neutrini dal CERN ai Laboratori Nazionali del Gran Sasso.

OPERA ha terminato la costruzione nel 2005 e dopo alcune prove tecniche nel 2006-2007 ha iniziato a prendere regolarmente dati nel 2008. Il numero di interazioni di ν_τ atteso in 5 anni di presa dati (in pratica fino al 2012 compreso, quando verranno totalizzati circa 2.25×10^{20} protoni sul bersaglio al CERN) va da 95 a 215 a seconda dei parametri che regolano il fenomeno di oscillazione; tenendo conto dell'efficienza di rivelazione dei leptoni τ il numero di eventi previsti in emulsione si riduce a 10-15. L'analisi del 35% dei dati 2008-2009, corrispondenti a 1.9×10^{19} protoni sul bersaglio, ha fornito il primo evento di ν_τ [4] [5].

La Collaborazione OPERA comprende circa 170 scienziati di 12 nazioni ed è guidata da Antonio Ereditato, professore di Fisica delle Particelle all'Università di Berna.

Come si misura la velocità dei neutrini

L'esperimento OPERA ha annunciato il 23 settembre scorso in un seminario al CERN un risultato anomalo [6] sul tempo di volo (*Time Of Flight*, TOF) dei neutrini muonici tra il CERN e il Gran Sasso. Rispetto al tempo di volo atteso in base alla velocità della luce nel vuoto, i neutrini mostrano un anticipo significativo (in nanosecondi):

$$\Delta t = \text{TOF}_c - \text{TOF}_\nu = 60.7 \pm 6.9 \text{ (stat.)} \pm 7.4 \text{ (syst.)} \quad (1)$$

che, combinando in quadratura l'errore statistico con quello sistematico, risulta diverso da zero per ben 6 deviazioni standard. Questo anticipo corrisponde a circa 18 m sulla distanza CERN-Gran Sasso. La conseguenza immediata è che la velocità media dei neutrini appare superiore di circa 25 parti per milione alla velocità della luce nel vuoto:

$$(v - c)/c = (2.48 \pm 0.28 \text{ (stat.)} \pm 0.30 \text{ (syst.)}) \times 10^{-5}. \quad (2)$$

Come è stato ottenuto questo sorprendente risultato? Ci sono tre fattori decisivi: (i) la dimensione del campione di interazioni di ν_μ , circa 16000 sommando quelle nel bersaglio e nella roccia circostante, raccolte negli anni 2009, 2010 e 2011; (ii) l'estrema precisione raggiunta dai sistemi di misura del tempo al CERN, al Gran Sasso e la sincronizzazione tra i due sistemi mediante GPS a livel-

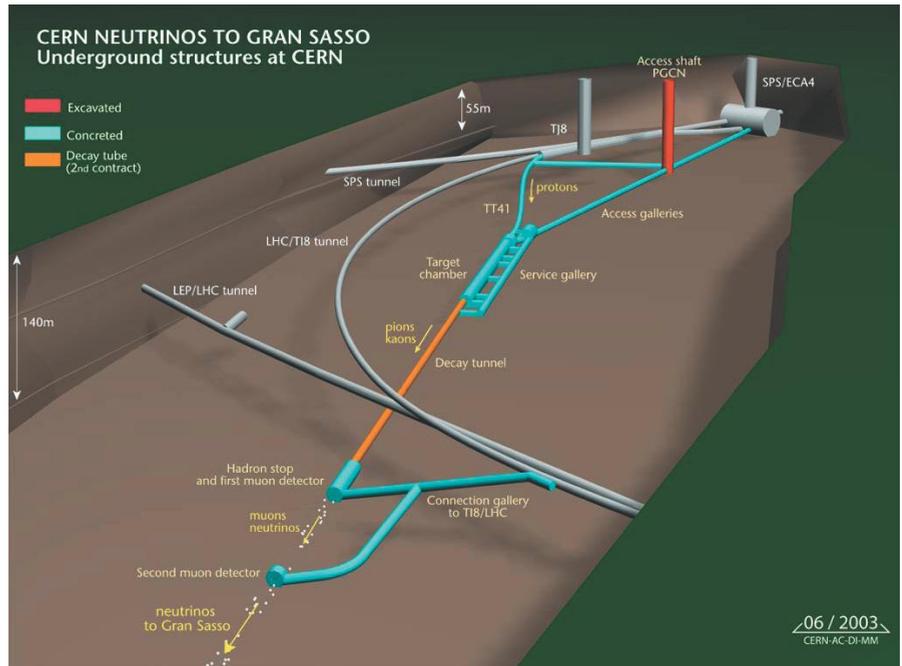


Figura 2. Schema del fascio di neutrini al CERN. I protoni estratti dal tunnel SPS producono mesoni π e K . Nel tunnel di decadimento lungo circa 1 km i mesoni decadono producendo muoni e neutrini.

lo di 1-2 ns; (iii) la buona precisione nella misura della distanza tra i punti di riferimento al CERN e all'esperimento OPERA, circa 20 cm.

La misura della distanza utilizza tecniche standard in geodesia e non presenta particolari problemi; l'errore di 20 cm è dovuto sostanzialmente al collegamento tra i ricevitori GPS ai due imbocchi del tunnel autostradale del Gran Sasso e il punto di riferimento di OPERA mediante triangolazione. Per confronto, la riproducibilità delle coordinate delle stazioni della Rete Dinamica Nazionale (RDN) che hanno accesso diretto al sistema GPS è generalmente migliore del centimetro sia in planimetria che in quota.

La misura del tempo di volo dei neutrini utilizza una tecnica non banale. Il tempo di arrivo di un neutrino che interagisce nel bersaglio di OPERA o nella roccia circostante viene misurato dagli scintillatori del *Target Tracker* con una precisione di 2.3 ns.

Il tempo di partenza non può essere misurato evento per evento al CERN, piuttosto viene misurata la distribuzione temporale di ciascuna estrazione dei protoni, che dura $10.5 \mu\text{s}$ (curva continua in Figura 4), mediante un BCT (*Beam Current Transformer*) posto subito prima del bersaglio di grafite; il protone "genitore" di un dato neutrino può trovarsi ovunque nella finestra di $10.5 \mu\text{s}$. Adattando la distribuzione dei tempi misurati per circa 16000 interazioni di neutrini al Gran Sasso alla curva dell'estrazione dei protoni (simboli con barre di errore in Figura 4), i ricercatori di OPERA hanno ricavato il tempo di volo dei neutrini con un errore statistico sorprendentemente piccolo di 6.9 ns. L'assunzione fatta è che la probabilità di osservare una interazione di ν_{μ} nel bersaglio di OPERA o nella roccia circostante in ciascun intervallo di tempo all'interno di una estrazione sia proporzionale al numero di protoni sul bersaglio al CERN nello stesso intervallo di tempo (nel caso specifico sono stati usati intervalli da 150 ns).

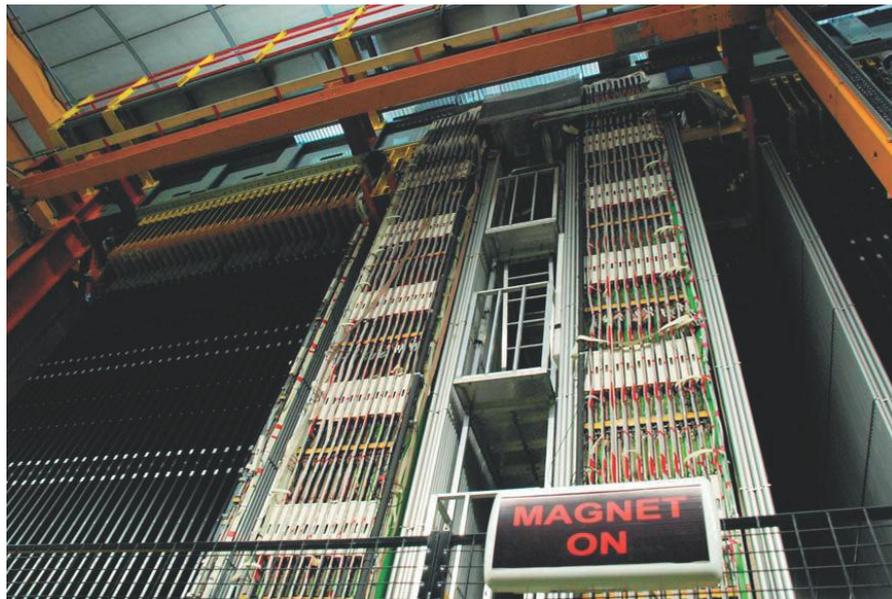


Figura 3. Fotografia del primo supermodulo dell'apparato sperimentale OPERA. A sinistra l'area del bersaglio costituito da mattoni di emulsione e Pb alternati a piani di scintillatori, che costituiscono il Target Tracker (TT). A destra lo spettrometro per muoni. Un secondo supermodulo identico si trova a destra della fotografia.

Per completare la misura del tempo di volo serviva una sincronizzazione estremamente precisa tra CERN e Gran Sasso. Fino al 2007 questa sincronizzazione aveva una precisione di 100 ns, abbastanza buona per agganciare l'acquisizione dei dati all'estrazione del fascio ma insufficiente per la misura del tempo di volo. Dal 2008 con l'installazione di due sistemi gemelli, composti ciascuno da un ricevitore GPS e da un orologio atomico al cesio e operanti in *common-view mode*, è stata raggiunta una precisione (errore sistematico) di 1.7 ns, come verificato dagli istituti metrologici svizzero (METAS) e tedesco (PTB).

L'errore sistematico complessivo è stato valutato sommando in quadratura diversi contributi, per un totale di 7.4 ns. I ricercatori di OPERA sono così arrivati al risultato (1) per la differenza del tempo di volo $TOF_c - TOF_v$, dal quale si ricava immediatamente il risultato (2).

Il risultato è attendibile?

L'analisi degli errori statistici e sistematici fatta da OPERA appare corretta. L'errore statistico di 6.9 ns proviene dal fit mostrato in Figura 4, la procedura di fit è stata validata effettuando 100 simulazioni dei dati di OPERA con ritardi diversi. L'errore sistematico di 7.4 ns è ottenuto come somma in quadratura di ben 12 contributi, di cui 3 relativi a distanze (distanza CERN - Gran Sasso, punto di decadimento nel tunnel del CERN, punto di interazione al Gran Sasso) e 9 relativi alla calibrazione dei tempi; il contributo maggiore (5 ns) è quello sulla calibrazione del BCT.

Come i ricercatori di OPERA hanno scritto nell'ultimo paragrafo delle conclusioni in [6], essi intendono continuare i loro studi per indagare su possibili fonti di errore sistematico al momento ignote che potrebbero spiegare l'anomalia osservata.

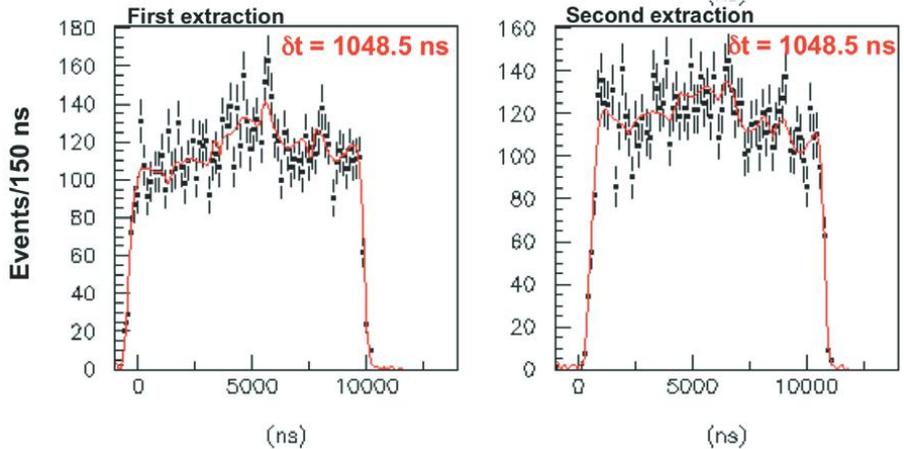


Figura 4. Confronto tra il profilo temporale dei protoni sul bersaglio al CERN (curve) e la distribuzione temporale delle interazioni di neutrini al Gran Sasso (simboli con barre di errore). A sinistra la prima estrazione di durata 10.5 ms, a destra la seconda estrazione che avviene 50 ms dopo la prima, con la stessa durata.

Sono possibili controlli basati sulla misura del profilo temporale dei muoni al CERN e più in generale i ricercatori di OPERA e i fisici del CERN responsabili del progetto CNGS cercheranno di ottenere una migliore comprensione della struttura temporale del fascio di neutrini alla sorgente.

Ma chiaramente c'è bisogno di una verifica indipendente del risultato (2) da parte di altri esperimenti. Esaminiamo innanzitutto i risultati già disponibili, che sono due: uno ottenuto dall'esperimento MINOS nel 2007 con una tecnica simile ma con minore precisione, l'altro relativo alla osservazione di neutrini e di fotoni provenienti dal collasso della Supernova SN1987A.

Il risultato di MINOS [7], ottenuto paragonando i tempi di 1.6×10^6 interazioni di ν_μ nel rivelatore vicino con 473 interazioni di ν_μ nel rivelatore lontano posto a 734 km dal FermiLab, è il seguente:

$$(\nu - c)/c = (5.1 \pm 2.9 \text{ (stat.+syst.)}) \times 10^{-5} . \quad (3)$$

Questo risultato è compatibile entro 1.8 deviazioni standard con l'ipotesi $\nu = c$, ma anche con il risultato di OPERA. Notiamo che per un neutrino di energia 1 GeV e massa $2 \text{ eV}/c^2$ la deviazione di ν rispetto a c secondo la Relatività Ristretta è:

$$(\nu - c)/c = -2.0 \times 10^{-18} . \quad (4)$$

quindi del tutto trascurabile rispetto all'anomalia trovata da OPERA.

Il 23 febbraio 1987 tre esperimenti hanno osservato i neutrini provenienti dal collasso della supernova SN1987A nella Grande Nube di Magellano, a 168.000 anni luce dalla Terra. L'arrivo dei fotoni osservato con l'aumento di luminosità si colloca in un intervallo di ± 3 ore rispetto all'arrivo dei neutrini. Anche tenendo conto di un ritardo di circa un'ora tra l'emissione dei neutrini e l'aumento di luminosità, la differenza di velocità fra neutrini e fotoni può essere al massimo [8]:

$$|(\nu - c)/c| < 2 \times 10^{-9} . \quad (5)$$

Questo limite sembra in contraddizione con il risultato (2) di OPERA, ma dobbiamo ricordare che nel caso della supernova sono stati rivelati solo antineutrini elettronici di energia compresa tra 10 e 20 MeV. A questo punto risulta cruciale stabilire la dipendenza dall'energia – ed eventualmente dal tipo di neutrino – dell'anomalia riportata da OPERA.

Cosa ci possiamo aspettare dagli altri esperimenti? L'esperimento MINOS prevede di aggiornare il suo risultato del 2007 con un migliore controllo degli errori sistematici e 10 volte più dati; il nuovo risultato dovrebbe essere pronto tra circa 6 mesi. Inoltre è in preparazione l'esperimento MINOS+ con inizio nel 2013, che dovrebbe ridurre l'errore totale sul tempo di volo a 5-10 ns.

Altri esperimenti in grado di verificare il risultato di OPERA sono Borexino e LVD al Gran Sasso e T2K in Giappone (quest'ultimo con una distanza di 295 km); questi esperimenti stanno valutando le modifiche necessarie per raggiungere la precisione richiesta.

Quali conseguenze?

I fisici teorici stanno esaminando possibili scenari che rendano conto delle osservazioni di OPERA e degli altri esperimenti. Uno dei punti discussi alla riunione "Theoretical assessment of the OPERA report and its possible implications" tenutasi al CERN il 14 ottobre scorso era il seguente: "is the $v > c$ conclusion categorically excluded from the theoretical perspective, in view of the other experimental constraints, or are there loopholes?"

Ecco alcune possibilità (scelte tra quelle meno esotiche) attualmente in discussione:

1. I neutrini sarebbero dei tachioni, con massa immaginaria $m = i\mu$ ed energia totale $E = \mu c^2 / \sqrt{(v^2/c^2 - 1)}$ e si muoverebbero sempre a velocità maggiori di c ; questo scenario, che non contraddice la Relatività Ristretta, ha comunque serie difficoltà a spiegare il risultato di OPERA, sia per il fatto che non sarebbe cinematicamente possibile [9] produrre neutrini muonici con l'energia misurata in OPERA (in media 17 GeV) e la massa tachionica richiesta ($m \gg 100 \text{ MeV}/c^2$) mediante il decadimento dei mesoni p al CERN, sia per il fatto che i neutrini superluminali perderebbero rapidamente energia emettendo coppie e^+e^- con un processo simile all'effetto Cherenkov [10] raggiungendo una energia limite di 12.5 GeV, inferiore all'energia media misurata da OPERA.
2. I neutrini avrebbero una velocità limite superiore a quella dei fotoni (mentre si sa con grande precisione che elettroni e muoni hanno la stessa velocità limite dei fotoni); questo scenario comporta (i) l'abbandono del principio di relatività con la comparsa di un sistema di riferimento privilegiato, oppure (ii) una modifica della cinematica relativistica con l'aggiunta di termini non lineari, preservando il principio di relatività; esso potrebbe essere compatibile con il risultato di OPERA e quello basato sulla supernova SN1987A, ma sembra avere difficoltà con le osservazioni sulle oscillazioni dei neutrini.

Non credo che sia già arrivato il tempo di riscrivere i testi di Relatività Ristretta (si veda per esempio l'ottimo [9]) sulla base del risultato di OPERA. Servono almeno 6 mesi per ulteriori controlli sperimentali, sperando che nel frattempo vengano meglio precisati gli scenari teorici.

Bibliografia

- [1] McDONALD A.B., KLEIN J.R., WARK D.L. "Risolto il problema dei neutrini solari", *Le Scienze* 417 (Maggio 2003) 54.
- [2] <http://operaweb.Ings.infn.it/>
- [3] GUGLIELMI A., SALA P. "Dal CERN al Gran Sasso", *Le Scienze* 454 (Giugno 2006) 62.
- [4] AGAFONOVA, N. *et al.* "Observation of a first ν_e candidate in the OPERA experiment in the CNGS beam", *Physics Letters B* 691 (2010) 138, <http://arxiv.org/abs/1006.1623> (2010).
- [5] MIGLIOZZI P., TERRANOVA F. "L'ago nel pagliaio", *Le Scienze* 509 (Gennaio 2011) 50.
- [6] ADAM, T. *et al.* "Measurement of the neutrino velocity with the OPERA detector in the CNGS beam", <http://arxiv.org/abs/1109.4897> (2011).
- [7] ADAMSON, P. *et al.* "Measurement of neutrino velocity with the MINOS detectors and NuMI neutrino beam", *Physical Review D* 76 (2007) 072005, <http://arxiv.org/abs/0706.0437> (2007).
- [8] LONGO, M.J. "Tests of relativity from SN1987A", *Physical Review D* 36 (1987) 3276.
- [9] TAYLOR E.F., WHEELER J.A., *Fisica dello Spazio-Tempo*, Zanichelli, Bologna, 1996.

IL PRIMO CONGRESSO SOLVAY DEL 1911

Ricorre quest'anno il centenario dal primo Congresso Solvay che si svolse a Bruxelles dal 30 ottobre al 3 novembre del 1911.

L'iniziativa, promossa da Nernst, fu patrocinata dal magnate dell'industria chimica belga Ernest Solvay, uomo colto e interessato agli sviluppi della scienza, noto per aver trovato un nuovo modo di produrre il bicarbonato di sodio.

I congressi Solvay raccolsero molti dei più stimati fisici dell'epoca. Il primo congresso, in particolare, riunì una ventina di scienziati, molti dei quali ebbero un ruolo determinante nello sviluppo della Fisica del primo Novecento. Il titolo del convegno era: *La teoria della radiazione e i quanti*. Gli atti del congresso furono redatti da M. de Broglie e da P. Langevin e uscirono stampati nel 1912. Il volume originale degli atti (in francese) è scaricabile da <http://www.archive.org/details/lathoriedurayo00inst> e contiene le dodici relazioni tenute da H. A. Lorentz, J. H. Jeans, E. Warburg, H. Rubens, M. Planck, M. Knudsen, J. Perrin, W. Nernst, H. Kamerlingh Onnes, A. Sommerfeld, P. Langevin e A. Einstein. Ogni relazione è seguita dalla discussione scaturita tra i fisici presenti. Le relazioni sono precedute dall'allocuzione di Solvay e dai due discorsi introduttivi di Lorentz e Nernst; lo stesso Solvay chiude gli atti con l'allocuzione finale.

La maggioranza dei partecipanti al congresso riteneva che i tempi fossero maturi per introdurre il concetto di quanto. Ma c'era chi, come lo stesso Lorentz, accettava quest'idea con riserve. Tutti gli scienziati furono però d'accordo nel ritenere impossibile spiegare l'esistenza della costante di Planck all'interno dei modelli classici.

Nella sua introduzione Lorentz rammenta le gravi difficoltà sorte nello studio del moto delle particelle: "Les recherches modernes ont fait ressortir de plus en plus les graves difficultés qu'on rencontre quand on cherche à se représenter les mouvements des plus petites particules des corps pondérables et la liaison entre ces particules et les phénomènes qui se produisent dans l'éther". Al proposito egli parla di *tenebre che ci avvolgono da tutte le parti*, perché i fondamenti della Fisica classica sono messi in dubbio. Ma in questa oscurità si apre uno spiraglio: "la belle hypothèse des éléments d'énergie, émise pour la première fois par M. Planck et appliquée à de nombreux problèmes par M. Einstein, M. Nernst et d'autres, a été un précieux trait de lumière". Ed è questa ipotesi quantistica che merita di essere trattata nel congresso che sta per aprirsi. Anche perché, come osserva Nernst nella successiva introduzione, "le idee fondamentali e fruttuose di Planck e di Einstein [...] possono essere modificate ed elaborate, ma non possono essere ignorate".

Una trattazione abbastanza dettagliata dei congressi Solvay è contenuta nel volume:

Le Conseils Solvay e les débuts de la Physique moderne, Université Libre de Bruxelles, 1995.

Luigi Togliani, Mantova