

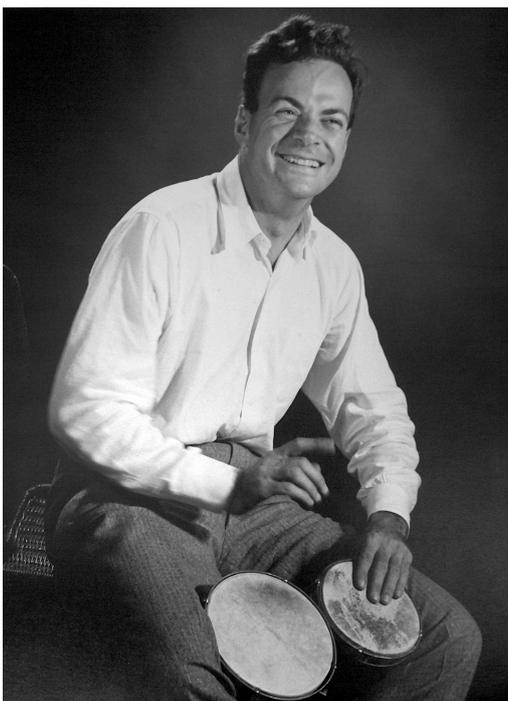
“... una rappresentazione della semplicità della natura”
Richard Feynman. Dall'elettromagnetismo classico alla QED

Giulio Peruzzi

Dipartimento di Fisica e Astronomia
Università di Padova

Laboratori Nazionali di Frascati, 7 ottobre 2015
Incontri di Fisica 2015

Prologo



Ho *un amico artista* che, a volte, assume un punto di vista con cui non sono d'accordo. Sollevando *un fiore* dice: “osserva quanto è bello” e io sono d'accordo. E poi dice: “vedi, *io come artista posso scorgere la bellezza* del fiore mentre *tu, come scienziato*, scomponi tutto questo in parti e lo fai diventare banale”.

Credo di saper apprezzare la bellezza di un fiore, pur non essendo esteticamente raffinato quanto lui. Ma posso vedere molte più cose del fiore di quante ne veda lui. *La bellezza non esiste solo a un centimetro di distanza*, esiste anche una bellezza a una dimensione inferiore, nella struttura interna.

Indice degli argomenti

- 1 Infanzia e adolescenza
- 2 La formazione universitaria: MIT e Princeton
 - QED: un po' di storia
 - I lavori con Wheeler e la tesi di PhD
- 3 La guerra e il progetto Manhattan
- 4 Feynman, Schwinger, Tomonaga: QED
 - Shelter Island Conference
- 5 Gli anni al Caltech

Infanzia e adolescenza

Richard Phillips **Feynman nasce l'11 Maggio 1918** a New York. Vivrà gran parte della sua giovinezza a **Far Rockaway**, cittadina vicina a New York, in prossimità del mare.

La madre **Lucille** è figlia di emigranti di origine **polacca**, e il padre **Melville**, commerciante, è a sua volta figlio di emigrati **ebrei d'origine lituana**. Melville è da sempre appassionato di scienza, e trasmette questa passione a Richard fin dalla più tenera età.

L'infanzia di Richard e della sorella più piccola Joan (il secondogenito, Henry, vivrà appena un mese) trascorre felice e spensierata.



La casa dei Feynman a Far Rockaway

Feynman seguirà le **scuole elementari e superiori a Far Rockaway**.

S'innamora di **Arline Greenbaum**, che conosce dall'età di tredici anni e che sposerà nel 1942. Il **rapporto con Arline**, per la sua precocità, per l'intensità e poi per la tragica fine (Arline morirà di tubercolosi linfatica nel 1945), **lo segnerà per tutta la vita**.

Per Feynman, che pure si sposerà altre due volte e avrà numerose relazioni, quello vissuto con Arline rimarrà *“un amore come non ne conosco altri”*.



Dick e Arline

La formazione universitaria: MIT e Princeton

1935 - Studi universitari al Massachusetts Institute of Technology (MIT) di Boston; titolo di BS (Bachelor in Science) nel Giugno del **1939**.

All'epoca la progressione nella vita accademica era più difficile per gli studenti di origine ebraica, ma questo non costituisce un serio impedimento per Richard, che **viene accettato nel corso di dottorato (PhD)** di **Princeton**.

A Princeton, dove Richard arriva nell'autunno 1939, c'è l'*Institute for Advanced Studies*, con **scienziati** del calibro di **Albert Einstein, John von Neumann e Hermann Weyl**; all'Università, per la fisica fondamentale di frontiera, ci sono fisici come **Eugene P. Wigner** e il giovane **John A. Wheeler**, da poco assunto come docente. Insomma è l'ambiente giusto per completare la maturazione scientifica di Feynman, che viene assegnato come assistente a Wheeler (supervisore della sua tesi di dottorato).



Einstein, Yukawa, Wheeler, Bhabha

1925-26 - Dopo 25 anni di **vecchia teoria dei quanti**, viene introdotta la **meccanica quantistica** in due formulazioni, quella matriciale (Heisenberg, Born e Jordan) e quella ondulatoria (Schrödinger), predittivamente equivalenti.

Queste due formulazioni, tuttavia, sono **invarianti per il gruppo di Galileo**. I campi elettromagnetici vengono introdotti “a mano” usando le equazioni classiche di Maxwell.

Mettere insieme la nuova **meccanica quantistica** e la **relatività ristretta** sarà il problema centrale fino alla fine degli anni quaranta del XX secolo. L'**elettrodinamica quantistica (QED)** sarà il **primo esempio di teoria quantistica dei campi**. Ma già negli anni '30 cominciano ad apparire i primi embrioni di altre teorie quantistiche dei campi per le interazioni nucleari (deboli e forti).

Certamente [l'idea di rivoluzione come rottura con gli schemi del passato] sembra applicarsi alle grandi rivoluzioni nella fisica del Novecento: lo sviluppo della relatività ristretta e della meccanica quantistica.

Peraltro, lo sviluppo della teoria quantistica dei campi dal 1930 fornisce un curioso controesempio, nel quale l'essenziale elemento di progresso è stata la realizzazione, via via, che una rivoluzione non era necessaria.

Se la meccanica quantistica e la relatività sono state rivoluzioni nel senso della Rivoluzione Francese del 1789 o della Rivoluzione Russa del 1917, allora la teoria quantistica dei campi è più vicina alla Gloriosa Rivoluzione del 1688: le cose sono mutate solo quel tanto da poter rimanere le stesse.

[S. Weinberg, “The Search for Unity: Notes for a History of Quantum Field theory”, *Daedalus*, 2 (1977), pp. 17-35.]

Un passo indietro: i contributi di Einstein (1909-17)

In due lavori del 1909 Einstein rianalizza la legge di Planck per lo spettro di emissione di un corpo nero:

$$I(\nu, T) = \frac{2h}{c^2} \frac{\nu^3}{e^{h\nu/kT} - 1}.$$

Calcola le fluttuazioni di energia nella radiazione di corpo nero, e ne ricava che **per ottenere la legge di Planck bisogna considerare due cause indipendenti** delle fluttuazioni, che vanno sommate nell'espressione finale: **una riferibile alla natura corpuscolare** (che domina nel limite di alti valori di ν/T e **riproduce la legge di Wien**), e **una riferibile alla natura ondulatoria** (dominante nel limite di piccoli valori di ν/T , dove si **riproduce la legge di Rayleigh-Jeans**).

*È innegabile che c'è un vasto gruppo di dati riguardanti la radiazione che mostrano che la luce ha alcune fondamentali proprietà che possono essere comprese molto più facilmente dal punto di vista della teoria newtoniana dell'emissione che dal punto di vista della teoria ondulatoria. È mia opinione, perciò, che la prossima fase dello sviluppo della fisica teorica **ci fornirà una teoria della luce** che può essere interpretata come una specie di **fusione delle teorie ondulatorie e emissive**. [voce solitaria in quegli anni]*

Nell'ambito della **relatività ristretta** da lui proposta, la chiave di volta per reinterpretare la teoria della radiazione (e con essa la nozione di campo) è fornita dall'**equivalenza tra massa e energia**: l'**emissione** di luce da una sorgente, seguita dal suo **assorbimento** da un ricevitore con il trasferimento di massa/energia sono due caratteri che sembrano **più facilmente interpretabili nell'ambito di teorie emissive** che in quello di teorie ondulatorie.

Le equazioni di Maxwell interpretano l'emissione come produzione da parte di una carica oscillante di un'onda sferica che si espande, ma l'**assorbimento** (che le equazioni di Maxwell porterebbero a considerare come contrazione di un'onda sferica da parte di una carica) **non è certamente un processo elementare**. Le **teorie dell'emissione** in questo senso permettono di **ristabilire la simmetria sotto forma di emissione e assorbimento di particelle**.

Einstein torna sul problema nel 1916 (*Emission and absorption of radiation in quantum theory*) e nel 1917 (*On the quantum theory of radiation*, le basi teoriche del laser). La trattazione porta alla necessità di considerare quella che Einstein chiama la “radiazione aghiforme” (*needle radiation*) nell'emissione e nell'assorbimento (**introduzione del momento per la particella di luce**).

La **prima applicazione (formale)** della (nuova) meccanica quantistica **ai campi** risale a un lavoro di **Born, Heisenberg e Jordan** del **1926** (uno dei primi lavori sulla “nuova” meccanica quantistica)

Il lavoro che comunque viene usualmente indicato come **inizio della teoria quantistica dei campi** è quello di **Dirac del 1927**: *The Quantum Theory of the Emission and Absorption of Radiation*.

The Quantum Theory of the Emission and Absorption of Radiation.

By P. A. M. DIRAC, St. John's College, Cambridge, and Institute for Theoretical Physics, Copenhagen.

(Communicated by N. Bohr, For. Mem. R.S.—Received February 2, 1927.)

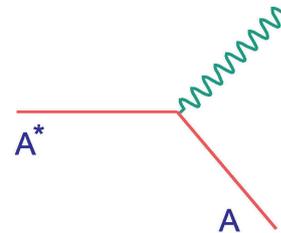
§ 1. *Introduction and Summary.*

The new quantum theory, based on the assumption that the dynamical variables do not obey the commutative law of multiplication, has by now been developed sufficiently to form a fairly complete theory of dynamics. One can treat mathematically the problem of any dynamical system composed of a number of particles with instantaneous forces acting between them, provided it is describable by a Hamiltonian function, and one can interpret the mathematics physically by a quite definite general method. On the other hand, hardly anything has been done up to the present on quantum electrodynamics. The questions of the correct treatment of a system in which the forces are propagated with the velocity of light instead of instantaneously, of the production of an electromagnetic field by a moving electron, and of the reaction of this field on the electron have not yet been touched. In addition, there is a serious difficulty in making the theory satisfy all the requirements of the restricted

L'equivalente delle formule di Einstein del 1917 era già stato trovato da **Born e Jordan**, e da **Dirac** in due articoli del **1926**: il problema era quello di verificare che il risultato fosse una conseguenza matematica della meccanica quantistica.

Nel processo di emissione spontanea si assisteva alla creazione di una particella:

(atomo eccitato) \Rightarrow (atomo + fotone)



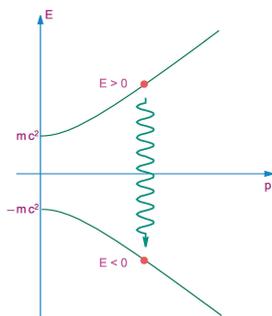
Era necessario verificare **se e come la meccanica quantistica potesse trattare in modo consistente processi di creazione e distruzione di particelle**. Il successo di Dirac nel campo della emissione spontanea di radiazione sembrava confermare il carattere universale della meccanica quantistica.

Il successo di Dirac lasciava però irrisolta la **dicotomia tra particelle materiali** (non soggette al processo di creazione-distruzione) e **campo elettromagnetico quantizzato** (i cui quanti, i fotoni, potevano essere liberamente creati e distrutti). In pochi anni questa concezione dualistica sarebbe profondamente mutata.

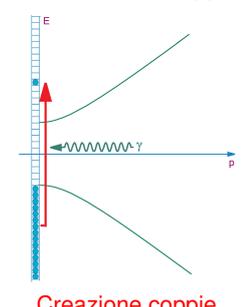
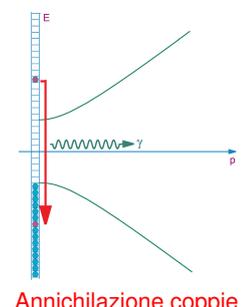
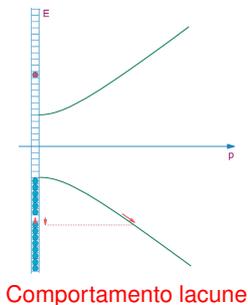
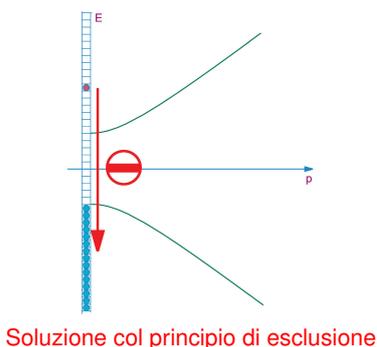
Vediamo allora, per sommi capi, i principali passi che portano a rivedere l'immagine fisica della natura.

Negli articoli di **Jordan-Wigner (1928)**, **Heisenberg-Pauli (1929-1930)**, e (per certi versi) **Fermi (1929)** si mostra (in linea con l'intuizione di de Broglie) che le **particelle materiali** possono essere interpretate come **quanti di opportuni campi**, proprio allo stesso modo in cui i fotoni sono i quanti del campo elettromagnetico.

1928 - Due articoli di Dirac su una nuova equazione quantorelativistica dell'elettrone.



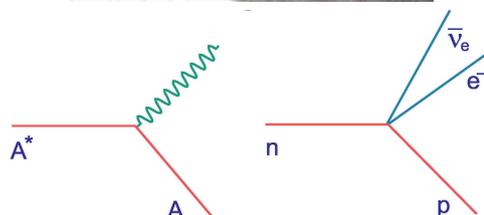
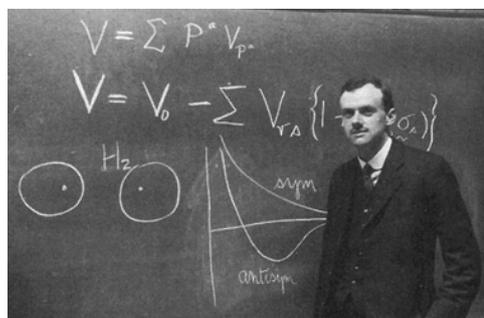
Instabilità della materia: $E = \pm \sqrt{(mc^2)^2 + (|\vec{p}|c)^2}$



L'interpretazione dell'equazione di Dirac come equazione di campo quantistico richiederà qualche anno.

Nel 1934 due articoli, di Furry e Oppenheimer, e di Pauli e Weisskopf, indicavano che una teoria di campo avrebbe incorporato in modo naturale l'idea dell'antimateria, insieme alla creazione e annichilazione di coppie particella-antiparticella.

1933-34 - Fermi propone la prima teoria dei processi nucleari per il decadimento β : $n \rightarrow p + e + \nu$.



La nuova visione delle particelle che cominciava a farsi strada **mutava anche la descrizione del meccanismo attraverso il quale si esercitavano le forze**. Queste potevano essere interpretate come **scambio di particelle**: i fotoni, nel caso delle forze elettromagnetiche, altre particelle nel caso delle forze nucleari.

Queste **particelle "virtuali"** non erano direttamente osservabili mentre venivano scambiate: avrebbero violato la conservazione dell'energia (per es. $e \rightarrow e + \gamma$). Ma la loro possibilità rientrava nell'ambito del **principio di indeterminazione** ($\Delta E \Delta t \geq h$).

Per questa strada **Yukawa arriva nel 1935** a predire l'esistenza di nuove particelle mediatrici delle interazioni nucleari. Se il range è legato alla massa m delle particelle nella forma $\frac{e^{-(rMc/\hbar)}}{r}$, allora il fotone con $m = 0$ ha range infinito (la forza va come $1/r^2$), mentre **le forze nucleari tra protoni e neutroni** (range $\sim 10^{-13}$ cm) saranno mediate da **particelle la cui massa è qualche centinaio di volte quella dell'elettrone**.

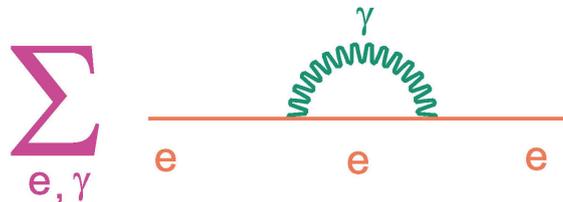
La fine degli anni venti e i primi anni trenta sono sicuramente segnati dai primi successi della teoria quantistica dei campi (in particolare l'QED: 1928, **Klein-Nishina**, effetto Compton; 1929, **Møller**, urto $e^- - e^-$; 1934, **Bethe-Heitler** perdita energia di e^- per frenamento; 1935, **Bhabha**, urto $e^- - e^+$).

Ma allo stesso tempo sono **testimoni delle prime profonde inconsistenze nel nuovo quadro teorico**. Queste inconsistenze si manifestano nell'insorgenza di valori infiniti per grandezze che sperimentalmente si osservano avere valori finiti.

In una lettera di **Heisenberg a Pauli del 1935** si legge: *Rispetto all'QED siamo ancora a uno stadio simile a quello in cui ci trovavamo nel 1922 rispetto alla meccanica quantistica. Sappiamo che è tutto sbagliato. Ma per trovare la direzione nella quale dovremmo allontanarci da ciò che oggi è il quadro dominante dovremmo conoscere le conseguenze del formalismo prevalente molto meglio di quanto sappiamo.*

Queste inconsistenze, come molti in quegli anni notarono, hanno alcuni punti di contatto con la divergenza della massa (e.m.) di e^- nell'elettrodinamica classica dovuta all'autointerazione della carica su sé stessa, $E_{e.m.} = mc^2 = e^2/4\pi a$.

Oppenheimer nel 1930 tenta di calcolare l'influenza prodotta sull'energia di un elettrone atomico dalla auto-interazione con il campo elettromagnetico (quantizzato) da lui prodotto. Come lo scambio di fotoni virtuali tra due elettroni produce un'energia di interazione tra loro, allo stesso modo l'emissione e il riassorbimento di fotoni da parte dello stesso elettrone produce un'auto-energia che dovrebbe produrre uno spostamento nei livelli atomici. Oppenheimer si accorge che con gli strumenti a disposizione il calcolo dà come risultato uno spostamento infinito (per $a \rightarrow 0$ diverge come $1/a^2$).



Bisogna quindi abbandonare la strada intrapresa?

Varie proposte alternative alla teoria quantistica dei campi vengono percorse in questi anni (tra queste: Heisenberg 1938, Wheeler 1937 e Heisenberg 1943). Alcuni pensano che lo sbaglio risieda nella formulazione matematica della teoria classica che si vuole quantizzare (l'elettrodinamica).

1938 - Dirac: *Classical theory of radiating electrons*. Esso si muove nella linea dell'azione mediata da campo. Il campo è descritto dalle equazioni di Maxwell ovunque, e il problema della singolarità puntiforme (energia infinita) che rappresenta l'elettrone viene risolto con un procedimento di sottrazione degli infiniti, simile, come dichiara Dirac stesso, a quello usato nella teoria del positrone.

1941-49: Feynman e Wheeler si pongono lo stesso problema di Dirac, ma con un approccio completamente diverso.

Mentre Dirac era partito dalla riformulazione della teoria classica dei campi elettromagnetici, **Wheeler e Feynman cercano invece una teoria di sole cariche** che riproduca la forza che una carica esercita sulle altre senza la mediazione del campo: in altre parole, **una teoria in cui la forza si esercita “a distanza”**.

Negli stessi anni in cui Maxwell aveva elaborato la sua teoria, i fisici continentali avevano costruito una **teoria dell'azione a distanza** tra cariche. Feynman e Wheeler riprendono questo filone di ricerca [sviluppi: K. **Schwarzschild** (1903), H. **Tetrode** (1922) e A.D. **Fokker** (1929-32)], di cui hanno modo di **discutere anche con Einstein**, e trovano una formulazione dell'**elettrodinamica classica dell'azione a distanza equivalente alla teoria dei campi elettromagnetici** di Maxwell e Lorentz. Il passo successivo doveva essere quello della quantizzazione, ma **né Feynman né Wheeler riusciranno mai a realizzarlo**, rassegnandosi così a pubblicare, tra il 1945 e il 1949, solo i risultati ottenuti nella teoria classica.

Superati con successo gli esami di qualificazione nell'autunno del **1940, Feynman inizia la tesi di dottorato**. Il lavoro sulla teoria classica dell'azione a distanza non può essere utilizzato a tale scopo, perché svolto in collaborazione con il suo relatore, ma costituisce il punto di partenza dell'argomento della sua dissertazione: **la quantizzazione della teoria di cariche interagenti a distanza**.

Nella **Nobel Lecture del 1965**, dove ripercorre le tappe che lo portano dalla teoria concepita insieme a Wheeler al nuovo approccio degli integrali di cammino e infine alla sua versione della QED, Feynman ricorda, innanzitutto, **l'importanza per l'elaborazione della tesi delle seguenti due lezioni metodologiche**, ricavate dal lavoro fatto in precedenza con Wheeler.

La prima riguarda il **significato di semplicità della natura** secondo Feynman.

*Vorrei un attimo fermarmi a questo punto e fare una osservazione. **Il fatto che l'elettrodinamica possa essere scritta in così tanti modi**—le equazioni differenziali di Maxwell, vari principi di minimo con i campi, principi di minimo senza campi, tutti modi di tipo diverso—era qualcosa che sapevo ma che non ho mai capito.*

*Mi è sempre sembrato strano che **le leggi fondamentali della fisica, una volta scoperte, possano apparire in così tante diverse forme che a prima vista non sembrano identiche**, ma che **con un pò di gioco matematico** si riesca a mostrarne le relazioni. Un esempio di questo è l'equazione di Schrödinger e la formulazione di Heisenberg della meccanica quantistica.*

*Non so perché sia così—rimane un mistero, ma era qualcosa che avevo imparato dall'esperienza. **C'è sempre un altro modo di dire la stessa cosa che non assomiglia affatto al modo in cui l'hai detta prima**. Di questo fatto non conosco la ragione. **Penso sia in qualche modo una rappresentazione della semplicità della natura.***

*Una cosa come la legge dell'inverso del quadrato è proprio giusto quella che deve essere rappresentata dalla soluzione dell'equazione di Poisson, che per questo è un modo assai diverso di dire la stessa cosa che non assomiglia affatto al modo in cui l'hai detta prima. Non so cosa significhi il fatto che la natura scelga queste forme curiose, ma forse questo è un modo per definire la semplicità. **Forse una cosa è semplice se si può descriverla pienamente in molti modi diversi senza sapere immediatamente che si sta descrivendo la stessa cosa.***

Richard P. Feynman, "The Development of the Space-Time View of Quantum Electrodynamics", *Science*, vol. 153 (1966), pp. 699-708, p. 702

La **seconda lezione** è di carattere più specifico: l'acquisizione di un nuovo metodo - **"il punto di vista spazio-temporale globale"** - per la descrizione fisica, in alternativa a quello che Feynman chiama "metodo Hamiltoniano" o "metodo differenziale nel tempo".

L'idea di partenza del nuovo approccio di Feynman proviene dal **principio di minimo dell'azione**, introdotto per la prima volta nel Seicento da **Pierre Fermat** per riformulare le leggi dell'ottica geometrica. Secondo Fermat in ogni mezzo **i raggi luminosi viaggiano da un punto a un altro in modo da rendere minimo il tempo di percorrenza**. Nei secoli successivi si dimostrò che **esiste un principio di minimo per ogni sistema meccanico**, espresso nei termini di una quantità S , chiamata azione, che dipende dalla traiettoria complessiva del sistema in un intervallo di tempo.

Il principio di minimo dell'azione, già utilizzato nel lavoro con Wheeler, **porterà Feynman al metodo degli integrali di cammino** (*path integrals*) per la quantizzazione.

Invece di utilizzare le equazioni differenziali del moto per dare una descrizione dettagliata nel tempo (cioè completa per ogni istante di tempo) del comportamento del sistema fisico studiato, **l'attenzione è spostata all'intero cammino (path) fatto dal sistema in un definito intervallo di tempo**.



Incoraggiato dunque a **seguire una via alternativa a quella usuale e secondo un approccio spazio-temporale di tipo globale**, Feynman affronta il problema centrale della sua tesi: trovare una teoria quantistica che abbia come analogo classico la teoria delle cariche interagenti a distanza descritta nei termini dell'azione.

L'idea è che **una particella non segua un solo cammino** (o una sola "storia") per andare da un punto a un altro dello spazio-tempo, **ma tutti quelli possibili ognuno con una probabilità che dipende dal valore dell'azione su quel cammino**.

Con l'**integrale di cammino** Feynman ottiene una **terza via per formulare la meccanica quantistica**, diversa da quelle rispettivamente di Schrödinger e Heisenberg, ma a esse equivalente.

Feynman nella tesi **crede di aver raggiunto una quantizzazione** della teoria dell'azione a distanza, pur con grossi problemi irrisolti. Ma **negli anni successivi abbandonerà le idee-base della sua teoria con Wheeler** (in particolare l'idea che i campi siano secondari), che pure erano all'origine del suo percorso pieno di successi verso la QED.

Feynman discute la tesi a maggio, e riceve il titolo di **PhD nel giugno del 1942**. Ma lo aspettano **anni difficili**. Ad Arline viene diagnosticata la malattia che la porterà alla morte e, nonostante resistenze familiari, Feynman e Arline si sposteranno il 29 giugno del 1942.

Poco dopo, **Robert R. Wilson convince Feynman a lavorare nel progetto nucleare americano**. L'impegno durerà per circa tre anni e lo porterà a trasferirsi di lì a breve, il 28 marzo del 1943, a Los Alamos.

A Los Alamos Feynman frequenta i grandi scienziati del momento (tra cui **Oppenheimer, Bethe, von Neumann, Bohr, Fermi, Bruno Rossi**). Si distingue per le eccezionali capacità di fisico teorico, **occupandosi in particolare della parte di calcoli della divisione teorica** (dove introduce l'uso dei computers a schede perforate).

Condivide l'entusiasmo per il risultato del *Trinity Test* (16 luglio del 1945), la prima esplosione atomica della storia. **Ma le bombe esplose in Giappone il 6 e il 9 agosto del 1945 saranno per lui, come per molti altri scienziati di Los Alamos, un duro colpo.**



Finita la guerra, l'attività a Los Alamos e negli altri luoghi del Progetto Manhattan non si ferma. I laboratori per la ricerca nel campo dell'energia atomica diventano permanenti; dal governo americano vengono stanziati ingenti finanziamenti nel settore.

Nel laboratorio di Los Alamos avviene presto un ricambio delle persone: Oppenheimer rassegna le dimissioni come direttore e, tra il novembre del 1945 e il febbraio del 1946, quasi tutti i capi delle "divisioni" lasciano il laboratorio. **Feynman è uno dei primi ad andarsene nell'ottobre del 1945.** Ha accettato il posto di professore alla **Cornell University**, nella cittadina di Ithaca nello stato di New York.

A Cornell Feynman insegna con passione e, **dopo un'iniziale crisi**, completa la sua versione della QED in cinque lavori, scritti e pubblicati tra il 1947 e il 1949.

La soluzione al problema, nota come *metodo di rinormalizzazione*, venne raggiunta solo alla fine degli anni quaranta grazie specialmente ai lavori di **Tomonaga (1948)**, **Schwinger (1948)**, **Feynman (1948)** e **Dyson (1949)**.

Almeno altri due nomi vanno ricordati in questo contesto: quelli di **Bethe** e **Kramers**. Alcune congetture erano inoltre già state avanzate nel 1936 da **Weisskopf e Euler**.

Infine è **doveroso ricordare i lavori di Stueckelberg (1934-1938)** nei quali **formulava la teoria dei campi in forma manifestamente covariante**, un punto di partenza fondamentale per sviluppare i metodi di rinormalizzazione (non a caso Stueckelberg ricava anche lui, indipendentemente, una formulazione completa delle procedure di rinormalizzazione nel 1947). I suoi lavori (e le sue comunicazioni a convegni) però non furono compresi dalla comunità scientifica, e **vennero riscoperti e rivalutati solo dopo l'avvento della rinormalizzazione**.

Una **spinta decisiva** al conseguimento dei risultati della fine degli anni quaranta venne dal **congresso** sui fondamenti della meccanica quantistica tenutasi a **Shelter Island nel giugno del 1947**.

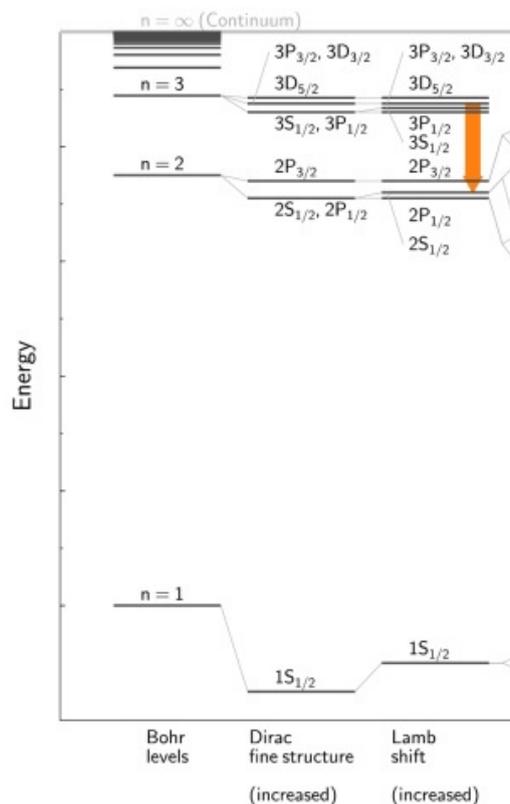
Al congresso erano presenti tra gli altri: Rabi, Pauling, Lamb, Uhlenbeck, Schwinger, Bruno Rossi, Wheeler, Bethe, Weisskopf, Kramers, Oppenheimer, Feynman.



Da sinistra, in piedi: W. Lamb, K.K. Darrow, Victor Weisskopf, George E. Uhlenbeck, Robert E. Marshak, Julian Schwinger, David Bohm. **Da sinistra, seduti:** J. Robert Oppenheimer, Abraham Pais, Richard P. Feynman, Herman Feshbach

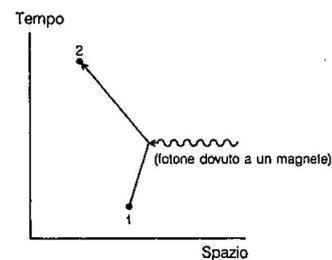
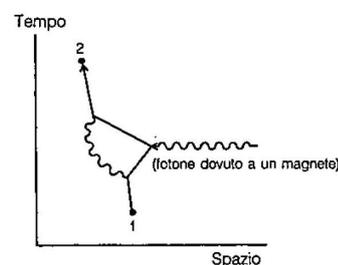
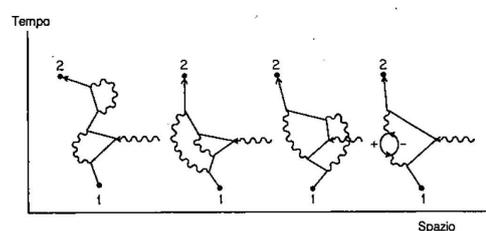
Avvenimento cruciale: la comunicazione di **Lamb** dei risultati dell'esperimento, da lui condotto insieme al suo studente Retherford, nel quale per la prima volta si aveva una chiara evidenza di quello che è oggi noto come **"Lamb shift"**.

A differenza di quanto previsto dalla teoria di Dirac (in accordo su questo con quella di Sommerfeld) **gli orbitali $s_{1/2}$ e $p_{1/2}$ non risultavano degeneri** (primi segnali in esperimenti di Williams del 1938, condotti ancora con metodi di spettroscopia ottica). Il contributo decisivo a **rimuovere la degenerazione viene proprio dall'interazione dell'elettrone con il proprio campo:** quell'effetto che Oppenheimer aveva tentato di calcolare nel 1930.



Mentre le formulazioni di Schwinger e Tomonaga seguono vie tradizionali alla quantizzazione, quella di **Feynman utilizza l'approccio "spazio temporale globale" degli integrali di cammino** e sarà alla base dei famosi **diagrammi di Feynman**.

Questi diagrammi, che rappresentano visivamente le interazioni tra le varie particelle, semplificano enormemente i calcoli e sono ancora oggi uno strumento fondamentale in fisica teorica. **L'equivalenza dei diversi approcci alla QED è opera di Freeman Dyson**, che svolge un ruolo cruciale nella definitiva formulazione della teoria.

Calcolo Dirac momento magnetico e^- Calcolo Schwinger momento magnetico e^- 

Esperimenti più accurati, calcoli di ulteriori termini

A partire dall'anno accademico 1950-51 Feynman si sposta al **California Institute of Technology (Caltech)**, dove sarà professore di fisica teorica per il resto della sua vita.



Carl Anderson (1936), Murray Gell-Mann (1969), Max Delbrück (1969), Feynman (1965), George Beadle (1958)

Tra l'agosto del 1951 e il giugno del 1952 Richard trascorre un anno sabbatico al Centro Brasiliano per la ricerca in fisica (CBPF) di **Rio de Janeiro**. È a Rio che Feynman inizia sistematicamente le sue indagini sulle **forze nucleari**.

A Caltech, tra il 1953 e il 1958, Feynman concentra le sue ricerche soprattutto su questioni all'epoca ancora irrisolte della **“fisica della materia condensata”**.

In particolare si occuperà di **superfluidità (elio liquido) e superconduttività**. In entrambi i casi, Feynman è soprattutto motivato dal desiderio di provare l'**efficacia del suo metodo degli integrali di cammino in campi diversi**.

Non perde però contatto con i **problemi della fisica dei costituenti ultimi della materia e delle loro interazioni**: (a) in modo piuttosto pionieristico, affronta il problema - ancora oggi aperto - della **quantizzazione della gravità**; (b) negli anni 1956-57, lavora alla **teoria delle interazioni deboli**, aprendo la strada, in quegli stessi anni percorsa indipendentemente da Gell-Mann, Marshak e Sudarshan, al cosiddetto Modello Standard delle particelle.

Negli anni '60 la sua fama comincia a varcare i confini del mondo della ricerca scientifica. Con le *Lectures on Physics* Feynman diventa popolare tra tutti gli insegnanti e studenti di fisica americani (e in seguito del resto del mondo). Nel novembre del 1964 tiene anche sette lezioni per il grande pubblico sul tema della natura delle leggi fisiche, che vengono registrate dalla BBC e trasmesse in televisione (e più tardi pubblicate nel libro *The Character of Physical Law*). Nel 1965, poi, il conferimento del Premio Nobel lo trasforma - suo malgrado - in un personaggio pubblico.

Ma negli anni 60, oltre a fornire fondamentali contributi didattici e a ricevere premi e onorificenze, Feynman si distingue ancora per la produzione scientifica con risultati importanti nel campo della teoria delle interazioni forti sulla quale continuerà a lavorare anche negli anni '70.

Nell'estate del 1977 Feynman avverte i sintomi della malattia (un liposarcoma allo stomaco) che lo accompagnerà per il resto della sua vita. Ma Feynman riuscirà a condurre una vita quasi normale fino all'ultimo, cioè fino a quando, il 3 febbraio del 1988, entra nell'ospedale dell'Università della California a Los Angeles, dove muore dodici giorni dopo.

Il 28 gennaio del 1986 avviene l'esplosione della navetta spaziale (*shuttle*) *Challenger*, che costa la vita alle sette persone dell'equipaggio. Pochi giorni dopo, Feynman riceve la telefonata dell'amministratore delegato della NASA, William R. Graham, che gli propone di entrare a far parte della commissione istituita dal governo americano per far luce sulle cause del disastro. Graham, che era stato suo studente molti anni prima a Caltech, aveva pensato a lui come persona indipendente e d'indiscussa autorità scientifica da includere nella commissione, diretta dal Segretario di Stato William P. Rogers e altrimenti composta da politici, militari e uomini della NASA.

L'esperienza sarà di fatto piuttosto **amara per Feynman**, che si scontrerà con il **mondo omertoso e poco limpido di certa politica**, e con modi di ragionare e comportarsi che gli sono totalmente estranei.

“Descrivere l'evidenza con molta attenzione senza riguardo al modo in cui si vorrebbe che le cose risultassero. Se si ha una teoria, cercare di spiegare in ugual misura quanto di buono e quanto di cattivo essa contiene”: questo è lo standard d'integrità e onestà che Feynman ha **imparato dal suo lavoro di scienziato**.

Uno standard che però non ritrova nel mondo della politica. Quando durante i lavori della commissione cominciano a venire alla luce gravi **manchevolezze da parte della NASA nei controlli di sicurezza** prima del lancio dello shuttle, **Feynman incontrerà molte difficoltà** nei suoi tentativi di approfondire le cause e le responsabilità, e di rendere pubblici i risultati.

Riuscirà nonostante tutto a **far emergere con i suoi metodi** quello di cui viene a conoscenza. Come per esempio quando **compie in pubblico e in presenza di giornalisti e televisioni l'esperimento con gli O-rings** (anelli di gomma) usati nello shuttle e un bicchiere d'acqua ghiacciata, per far vedere a tutti in modo semplice quello che poteva essere successo (il comportamento difettoso di quegli **O-rings** a basse temperature aveva giocato un ruolo decisivo nell'esplosione).



La morale della relazione conclusiva di Feynman è una lezione che oggi, dopo il disastro del *Columbia*, colpisce ancora di più.

“Se si vuole mantenere una serrata tabella di marcia per i lanci spaziali - scrive Feynman - spesso il lavoro d'ingegneria non può essere compiuto abbastanza velocemente da permettere di rispettare i previsti criteri di sicurezza. La conseguenza è un'alterazione di questi criteri e quindi la diminuzione della sicurezza dei voli.

Si dovrebbero proporre solo tabelle di marcia realistiche, che hanno una ragionevole possibilità di essere rispettate. Se il governo non è disposto a finanziarle, la NASA deve informarne onestamente i cittadini. Per una tecnologia di successo, la realtà deve aver la precedenza sulle relazioni pubbliche, perché la natura non può essere ingannata.”

Note bibliografiche

- Richard Feynman, *QED. La strana teoria della luce e della materia*, Adelphi, Milano 2010 (orig. 1985, prima ed. it. 1989)
- Richard Feynman, *La legge fisica*, Boringhieri, Torino 1971 (orig. 1965)
- Elena Castellani, Leonardo Castellani, *Feynman. La vita di un fisico irriverente*, “i grandi della scienza”, *Le Scienze*, 2003 (rist. 2013)