

Metafore elettrodinamiche: comunicare la fisica delle particelle usando i diagrammi di Feynman

Massimo Pietroni

Infn- Sezione di Padova, via Marzolo 8, I-35131 Padova, Italia (pietroni@pd.infn.it)

Viene presentato un progetto di comunicazione scientifica dei concetti di base della fisica delle particelle basato sull'uso dei diagrammi di Feynman. Questi sono rappresentazioni dei processi tra particelle elementari nate all'interno della comunità dei fisici e tuttora correntemente utilizzati come strumento di calcolo e di elaborazione teorica. Mentre l'aspetto tecnico e matematico dell'uso dei diagrammi è totalmente precluso ai non addetti ai lavori, l'aspetto iconico può essere utilizzato per comunicare concetti come: la materia e l'antimateria, la creazione, la distruzione e la trasformazione di particelle in altri tipi di particelle, il ruolo delle particelle 'virtuali' nella mediazione delle interazioni, le leggi di conservazione, le simmetrie, etc. etc. A differenza dalle metafore comunemente utilizzate per descrivere il microcosmo, tali rappresentazioni grafiche traducono in modo univoco il contenuto fisico della teoria quantistica sottostante, e quindi sono metafore perfette, non fuorvianti per costruzione. Dopo un'introduzione ai diagrammi di Feynman viene descritta la realizzazione pratica del progetto, basata sulla realizzazione di un gioco scientifico composto da oggetti tridimensionali, manipolabili, in cui le regole della rappresentazione di Feynman sono tradotte in vincoli meccanici sugli incastrabili fra i diversi elementi del gioco. Vengono poi presentati e discussi i risultati ottenuti durante dimostrazioni pubbliche del gioco con studenti delle scuole secondarie.

La metafora scientifica è il punto di contatto fra il lavoro dello scienziato e quello del comunicatore della scienza. In entrambi i casi, ci si trova di fronte al problema di formulare un linguaggio che consenta di leggere in termini familiari un mondo ancora ignoto.

Nel caso del comunicatore della scienza questa esigenza è tanto più inevitabile quanto più ci si avvicina ad ambiti scientifici ad alta astrazione e privi di un corredo di immagini la cui lettura sia facilmente accessibile, come è il caso –ad esempio- della genetica, della chimica, o della fisica delle particelle. Nel caso dello scienziato la metafora non gioca solamente un ruolo pedagogico, ma può condurre a vere e proprie scoperte scientifiche, come è stato discusso ad esempio da Arthur Miller nel suo *Insights of Genius* [Miller, 1996].

Il comunicatore della scienza e lo scienziato utilizzano quindi la metafora per due finalità essenzialmente diverse: per *descrivere* il primo, per *esplorare e sperimentare* il secondo. Il comunicatore crea immagini che dovranno essere fruite da un pubblico vasto e differenziato, e deve quindi preoccuparsi di confezionare un prodotto il più possibile ben definito e ‘user friendly’. Lo scienziato crea, per sé, una realtà-giocattolo analoga a quella che vuole esplorare. I termini dell’analogia non sono dati una volta per tutte, ma possono essere continuamente adeguati al tipo di domande che ci si pone di volta in volta. Deve essere un’analogia ridotta all’osso, che non contenga elementi di ridondanza che possano portare a conclusioni fuorvianti.

A differenza di quella del comunicatore, questa realtà non è fatta per essere solamente osservata, ma soprattutto per essere manipolata. Lo scienziato, insomma, utilizza la metafora come un vero e proprio laboratorio virtuale.

Gli esperimenti mentali, genere di cui Galileo e Einstein furono tra i più grandi maestri, rappresentano l’esempio più ovvio di metafore scientifiche. Immaginando situazioni sperimentali estreme, irraggiungibili in un laboratorio reale – come ad esempio la totale assenza di attrito nel caso di Galileo, o la possibilità di viaggiare alla velocità della luce nel caso di Einstein – lo scienziato cerca di mettere in evidenza gli aspetti veramente fondamentali di una classe di fenomeni oppure di mettere in luce una conseguenza paradossale della teoria comunemente accettata. In questo tipo di metafore gli attori sono ancora oggetti e concetti inerenti al campo che si vuole studiare, anche se le loro proprietà vengono spinti ai limiti del possibile.

I modelli meccanici ideati da James Maxwell per studiare il campo elettromagnetico appartengono a un’altra classe di metafore scientifiche. Nel lavoro del 1861, *On Physical Lines of Force*, Maxwell immagina lo spazio come un fluido nel quale ‘innumerevoli vortici’ ruotano attorno alla direzione del campo magnetico. La rotazione dei vortici è permessa dalle ‘particelle dell’elettricità’, che agiscono come le palline dei cuscinetti a sfera. Ruotando, i vortici si allargano a causa della forza

centrifuga e di conseguenza si contraggono nella direzione longitudinale. Quella che noi vediamo come attrazione tra due magneti è in realtà l'effetto della contrazione dello spazio interposto fra i due. In questo modello, Maxwell riesce a prevedere l'esistenza delle onde elettromagnetiche e, calcolandone la velocità, a riconoscere la parentela fra queste e la luce.

Maxwell non credeva che questi modelli meccanici fossero una 'teoria' del campo elettromagnetico. Non credeva alla realtà dei vortici e dei cuscinetti a sfera, ma osservava che i fenomeni elettrici e magnetici sembravano obbedire a leggi simili a quelle già note della meccanica e dell'idrodinamica. "Con il metodo da me adottato – scrisse nel suo lavoro precedente, *On Faraday's Lines of Force* – spero di rendere evidente il fatto che non sto tentando di stabilire nessuna teoria fisica di un settore fenomenologico nel quale non ho condotto nessuna osservazione sperimentale, e che il mio schema si limita a mostrare come, da una diretta applicazione delle idee e dei metodi di Faraday, la connessione da lui scoperta tra fenomeni appartenenti a classi molto diverse possa essere chiaramente illustrata a una mente matematica."

La metafora per Maxwell è quindi una somiglianza – parziale – fra le leggi di un dominio noto e quelle di un altro ancora sconosciuto, che permette di elaborare un'immagine operativa di questo e di compiere estrapolazioni su fatti non ancora sperimentati.

Il punto qualificante di questo tipo di metafore è che esse abbiano per oggetto le leggi, e non le cose: "una somiglianza tra relazioni non è una somiglianza tra le cose relazionate cui quelle relazioni si riferiscono." Quello che interessa sono le analogie relazionali, non la descrizione in termini familiari di oggetti ignoti.

In questo articolo descriveremo un progetto di comunicazione dei concetti base di fisica delle particelle elementari basato sull'uso, in chiave divulgativa dei diagrammi di Feynman, che possono essere considerati come vere e proprie metafore create dagli scienziati per il loro lavoro di ricerca.

E' noto che le metafore e le immagini tratte dall'esperienza quotidiana risultano presto o tardi inadeguate a descrivere il comportamento della materia su scale subatomiche, governato dalle anti-intuitive leggi della meccanica quantistica. L'esempio di Maxwell ci può allora aiutare a individuare il punto critico di gran parte dei tentativi che si sono fatti e si fanno in questo campo. Si cercano metafore familiari, tratte dalla comune esperienza sensoriale, per descrivere gli oggetti del microcosmo, e

cioè gli atomi, i nuclei, gli elettroni e i quark. Metafore che entrano inevitabilmente in crisi quando a questi 'corpuscoli' bisogna associare una natura 'ondulatoria'. O quando bisogna spiegare i decadimenti o la trasformazione di particelle in altre particelle. Si incontrano gli stessi problemi che incontrarono i primi fisici quantistici ad accettare fino in fondo le conseguenze della teoria che essi stessi stavano elaborando. Manca, per motivi intrinseci alla teoria, un ambito noto in cui trovare gli elementi da associare per analogia agli oggetti della fisica delle particelle. Mancano le immagini.

La lezione di Maxwell in questo senso è chiara. Lasciar perdere gli oggetti e concentrarsi sulle relazioni.

I diagrammi di Feynman formano il corredo di immagini adeguato a descrivere le relazioni fra particelle, come descritte dalle leggi della meccanica quantistica e della teoria dei campi. Come vedremo nel prossimo paragrafo, questi sono rappresentazioni delle interazioni tra particelle elementari sviluppati in ambito scientifico, come strumenti di calcolo per le probabilità dei vari processi fisici. Hanno quindi una doppia valenza: *fisico-matematica*, che consente di tradurre ogni diagramma nella formula corrispondente e viceversa, attraverso un vocabolario che non consente ambiguità, e *visivo-intuitiva*, che consente di visualizzare i vari contributi/formule relativi a un dato processo e di fare delle considerazioni fisiche su di questo ancora prima di aver calcolato le espressioni matematiche corrispondenti.

E' questo secondo aspetto quello che ci siamo proposti di sviluppare come base di un progetto di comunicazione scientifica per non addetti ai lavori. L'idea è quindi quella di provare il processo inverso a quello che si tenta di solito. Anziché forzare le nostre immagini sui concetti sviluppati dalla scienza, lasciare parlare le immagini della scienza, imparando ad ascoltare. Il tutto, tenendo sempre in mente che queste metafore, come ogni altra metafora scientifica, non sono altro che 'la punta di un modello sommerso' (M. Black, 1993), cioè che traggono la loro giustificazione, oltre che la loro efficacia, da un apparato matematico che deve però, necessariamente, restare fuori dal discorso.

Trasportando i diagrammi di Feynman dagli ambienti scientifici a quelli scolastici ed espositivi abbiamo, allo stesso tempo, dato loro il dono della materialità. In genere i diagrammi vengono disegnati sul piano del foglio di carta o della lavagna. Per questo progetto abbiamo invece realizzato degli oggetti tridimensionali, manipolabili, colorati, in cui le regole delle interazioni fra particelle elementari vengono tradotte in vincoli meccanici sui tipi di incastro possibili fra gli elementi del gioco. Questo è

risultato un elemento fondamentale del progetto, molto efficace per rompere la barriera che inevitabilmente si alza di fronte a un argomento così remoto come la fisica delle particelle elementari.

L'articolo è organizzato come segue. Nel secondo paragrafo presenteremo i diagrammi di Feynman e ne illustreremo il significato. Nel terzo paragrafo discuteremo quali concetti propri della fisica delle particelle possano essere comunicati a un interlocutore non esperto per mezzo di questi. Nel quarto paragrafo descriveremo la realizzazione pratica del progetto sul campo, e nel quinto paragrafo presenteremo e discuteremo alcuni risultati raccolti durante le dimostrazioni presso studenti delle scuole superiori. Infine (sesto paragrafo) discuteremo alcune possibili linee di sviluppo del progetto.

Cosa sono i diagrammi di Feynman

I diagrammi di Feynman sono uno strumento di lavoro per i fisici delle particelle elementari e dello stato solido. A ogni diagramma, costruito incastrando tra loro vari pezzi secondo regole determinate, tipo Lego, corrisponde una formula matematica che descrive un dato processo fisico. Mettendo insieme uno o più diagrammi corrispondenti allo stesso processo fisico si ottiene, attraverso un procedimento matematico ben definito, il valore per la probabilità di quel particolare processo. Più diagrammi si considerano, migliore sarà l'accordo fra il valore della probabilità calcolato e quello 'vero', misurato sperimentalmente.

Il metodo dei diagrammi di Feynman presenta quindi due aspetti fondamentali;

il rigore fisico-matematico, che associa a ogni diagramma una formula ben precisa e viceversa, senza possibilità di fraintendimenti;

la rappresentazione iconica dei processi fisici, che consente di visualizzare i vari contributi a un dato processo e di fare delle considerazioni sugli stessi ancor prima di averli calcolati, come ad esempio la realizzabilità o meno in Natura di un dato processo, eventuali analogie con altri processi, l'importanza relativa tra i vari diagrammi, e via discorrendo.

Il primo punto è quello che - ai nostri scopi - rende i diagrammi di Feynman delle metafore perfette, che esprimono tutto e solo il contenuto logico-formale della teoria. Dati i pezzi e le loro regole di incastro, non si possono costruire diagrammi che

non corrispondano a soluzioni matematiche della teoria sottostante. D'altra parte, a ogni soluzione corrisponde un solo diagramma e nessun altro.

La metafora non può essere fuorviante. Per costruzione.

Ovviamente, la corrispondenza fra matematica e diagrammi non è immediata e richiede anni di università e di Ph.D. per poter essere compresa e maneggiata con disinvoltura. La scommessa di questo progetto è proprio qui: dimostrare che l'aspetto *visivo* dei diagrammi di Feynman possa essere utilizzato in chiave divulgativa, per comunicare alcuni aspetti di base della fisica delle particelle anche a chi non possiede le conoscenze fisiche e matematiche per *lavorare* coi diagrammi di Feynman. Perché questa scommessa abbia possibilità di successo il rigore fisico-matematico, pur sostenendo il tutto, deve rimanere una presenza discreta e silenziosa.

Introduciamo ora i vari elementi che compongono i diagrammi di Feynman e le regole del gioco nel caso *dell'elettrodinamica quantistica* (Qed), la teoria che descrive fotoni, elettroni, e le loro interazioni.

Lo spazio-tempo

Per prima cosa bisogna definire il campo di gioco, e quindi introdurre un asse cartesiano associato al tempo e uno che rappresenta una direzione spaziale. In questo modo il piano della lavagna o, nel caso del modello che abbiamo realizzato, il tavolo è diventato quello che i fisici chiamano lo 'spazio-tempo'. Ogni punto su questo piano rappresenta un 'evento', ossia un qualche cosa che avviene in un dato istante (proiezione sull'asse del tempo) in un dato luogo (proiezione sull'asse dello spazio). A parte il nome, la nozione dello spazio-tempo è in genere già posseduta da chi ha conoscenze di base di cinematica, essendo lo strumento con cui si descrivono i moti.

Infatti, non pone grandi problemi di comunicazione introdurre a questo punto il concetto di 'traiettoria', come sequenza di eventi che portano, per esempio dall'evento 'qui-ora' all'evento 'là-fra un secondo'.

Per i nostri scopi, l'unica cosa da aggiungere a questi concetti di base è una considerazione sull'inversione della 'freccia del tempo'. Molto semplicemente, se invertiamo l'orientazione dell'asse dei tempi, la stessa traiettoria considerata precedentemente descrive il moto fra gli stessi punti di prima ma con ruoli invertiti, ossia non più da 'qui' a 'là' ma da 'là' a 'qui', sempre in un secondo. Insomma, non

abbiamo fatto altro che girare all'indietro la manovella del proiettore. Vedremo tra breve come questa semplice operazione abbia in realtà una sorprendente implicazione sugli elettroni.

Il fotone

Ecco il primo vero protagonista. Tradizionalmente si indica con una linea ondulata, anche se questa forma non ha un significato fisico particolare a parte quello di distinguerlo dalle altre particelle elementari che popolano lo spazio-tempo. Una linea come quella in Fig. 1 indica quindi la traiettoria di un fotone, γ , che si sposta da x_1 a x_2 nel tempo t_2-t_1 , o detto altrimenti, che unisce gli eventi (x_1, t_1) e (x_2, t_2) . E' il processo fisico più semplice che si possa immaginare. La Fig. 1 è il nostro primo diagramma di Feynmann! Possiamo a questo punto complicare il processo, e di conseguenza il diagramma corrispondente, aggiungendo un secondo fotone. Ecco così descritto il processo in cui due fotoni si propagano nello spazio-tempo. Immaginando di prolungarli e di guardare solo nel passato (a sinistra del diagramma) e nel futuro (a destra) diremo che c'erano due fotoni all'inizio e ce ne sono ancora due alla fine, in simboli, $\gamma\gamma \rightarrow \gamma\gamma$. E così via, aggiungendo fotoni.

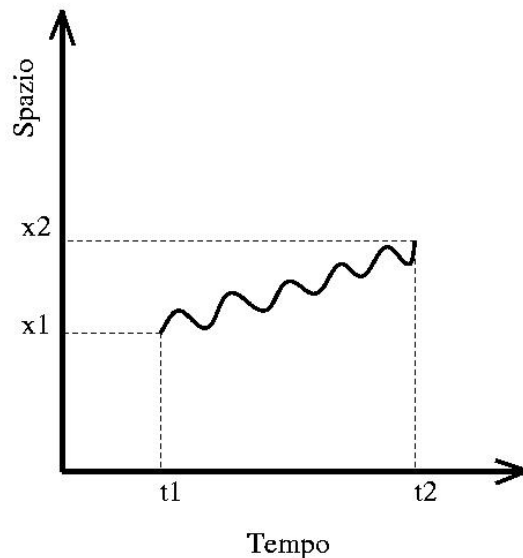


Fig. 1 *Un fotone nello spazio-tempo*

L'elettrone

Come il fotone, l'elettrone è rappresentato da una linea che vive nello spazio-tempo. A differenza di quello, questo viene rappresentato con una linea orientata, una freccia con testa e coda. E' importante osservare l'orientazione della freccia dell'elettrone rispetto alla freccia del tempo. Se queste vanno nello stesso verso, allora, analogamente a quanto abbiamo visto per il fotone, abbiamo un elettrone che si propaga da (x_1, t_1) a (x_2, t_2) . Se invece, pur collegando gli stessi punti estremi la freccia va nel verso opposto a quello del tempo, la linea corrisponde a un 'anti-elettrone' o 'positrone', che viaggia sempre tra (x_1, t_1) e (x_2, t_2) . Lo stesso pezzo descrive così sia la materia (l'elettrone, e^-) che l'antimateria (anti-elettrone, e^+). Sono due facce della stessa medaglia o, in termini più matematici, due soluzioni collegate tra loro dall'inversione del segno del tempo. Il concetto di anti-materia è - sorprendentemente - piuttosto diffuso fra gli studenti degli ultimi anni delle scuole secondarie superiori, almeno nei suoi elementi fondamentali (un elettrone con carica positiva e un protone con carica negativa). Collegando questi con alcune reminiscenze fantascientifiche (Star Trek, le catastrofiche esplosioni che si verificano in caso di contatto tra mondo ed anti-mondo) ci è stato quasi sempre possibile introdurre l'anti-elettrone senza che ciò provocasse eccessivo smarrimento nei nostri interlocutori.

Come per i fotoni, possiamo ora disegnare diagrammi che corrispondono, per esempio, al processo $e^- e^- \rightarrow e^- e^-$, oppure $e^- e^+ \rightarrow e^- e^+$, o ancora $\gamma e^- e^+ \rightarrow \gamma e^- e^+$, e via di questo passo.

Se la storia finisse qui, il mondo sarebbe estremamente banale. Fotoni ed elettroni viaggerebbero indisturbati per il cosmo, senza vedersi. La presenza di un elettrone non potrebbe influenzare in alcun modo il moto di un fotone, e viceversa. Gli oggetti sarebbero tutti perfettamente trasparenti, dato che non potrebbero in alcun modo fermare la luce e nemmeno riflettere i colori. A dire il vero, gli oggetti non esisterebbero nemmeno, dato che i costituenti della materia, protoni ed elettroni, non avrebbero alcun modo di 'parlarsi' e quindi di formare atomi, molecole, e strutture complesse. Le onde radio si propagherebbero senza che nessun'antenna le potesse rivelare e tantomeno emettere.

Chiaramente al nostro gioco manca ancora qualcosa di fondamentale per poter descrivere i fenomeni a cui tutti siamo abituati. Questo qualcosa è l'interazione.

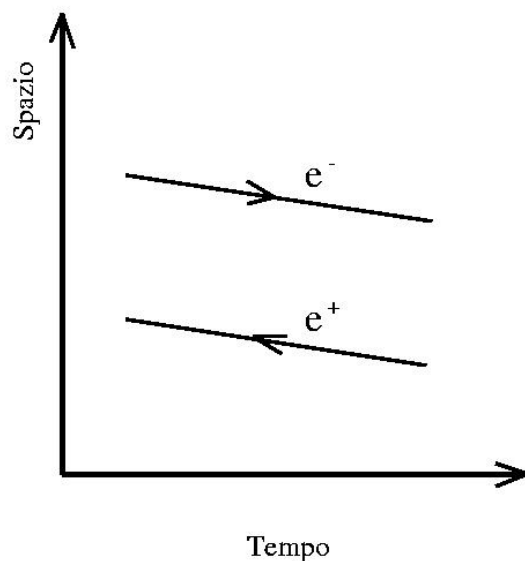


Fig. 2 *Un elettrone ed un anti-elettrone*

L'interazione

L'interazione fondamentale dell'elettrodinamica quantistica è l'incrocio di tre linee rappresentato in Fig. 3. Nel vertice si incontrano un fotone, un elettrone entrante e uno uscente. E' importantissimo tenere bene a mente che questa è l'unica configurazione ammessa. Per esempio, non esiste un'altra interazione in cui - oltre al fotone - ci sono due elettroni entrambi entranti o entrambi uscenti, o a cui sono collegate più di tre linee. Come vedremo, questo fatto avrà conseguenze importanti sul tipo di processi realizzabili in natura.

Se leggiamo l'interazione come un nuovo diagramma di Feynman, sempre concentrando solo su quello che c'è all'inizio (a sinistra) e alla fine (a destra), allora vediamo che può rappresentare diversi processi fisici. In Fig. 3, ci sono ad esempio un fotone ed un elettrone all'inizio e solo un elettrone alla fine, in simboli $\gamma e^- \rightarrow e^-$. La prima differenza con i processi che abbiamo visto precedentemente salta immediatamente all'occhio. Là avevamo sempre le stesse particelle all'inizio e alla fine, qui no. Il fotone iniziale è scomparso. In termini fisici, si dice che è stato 'assorbito' dall'elettrone. L'interazione permette quindi la 'trasformazione' delle particelle iniziali in qualcos'altro, modificandone il moto o addirittura facendole scomparire, apparire o cambiare natura. L'assorbimento è un processo fisico assai comune, che consente per esempio di captare le onde radio, assorbendone i fotoni da parte degli elettroni di

un'antenna, oppure di proteggersi dalla luce del sole per mezzo di uno schermo o di lenti che assorbono la radiazione elettromagnetica.

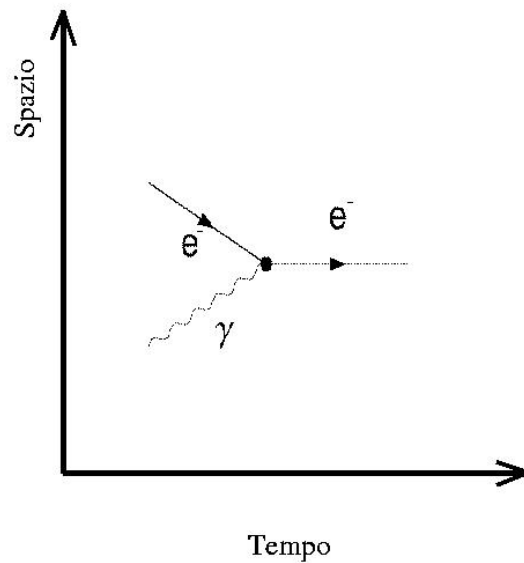


Fig. 3 *L'interazione fondamentale, letta come assorbimento di un fotone da un elettrone*

Se adesso manteniamo lo stesso incrocio-interazione e spostiamo in avanti il fotone, come in Fig. 4 otteniamo il processo $e^- \rightarrow e^- \gamma$, ossia l'emissione di un fotone da parte dell'elettrone iniziale. Processo alla base, ad esempio, dei colori emessi dai vari oggetti o dell'emissione delle onde radio dagli elettroni in moto dentro un'antenna. Ruotando i due diagrammi precedenti di centottanta gradi (o, analogamente, invertendo il verso dell'asse del tempo) otteniamo rispettivamente $e^+ \rightarrow e^+ \gamma$ ed $\gamma e^+ \rightarrow e^+$, ossia l'emissione e l'assorbimento di un fotone da un anti-elettrone, anzichè da un elettrone.

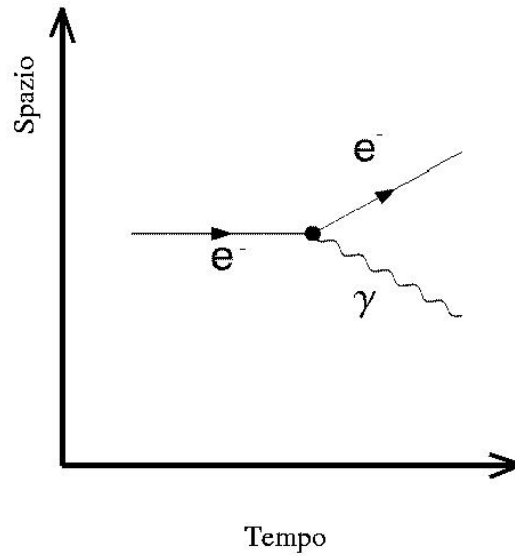


Fig. 4 *L'emissione di un fotone da parte di un elettrone*

La gamma di processi descritti dall'interazione fondamentale non si esaurisce qui. Ruotando le gambe come in Fig. 5 abbiamo $e^+ e^- \rightarrow \gamma$, l'elettrone e l'anti-elettrone, vengono a contatto e spariscono creando un fotone. E' fenomeno - ben noto a chi segue un pò di fantascienza- dell'annichilazione tra materia e anti-materia. La materia e l'anti-materia iniziali vengono completamente convertite in energia elettromagnetica, secondo la nota formula $E = m c^2$. Ruotando il tutto di centottanta gradi si ottiene il processo inverso, $\gamma \rightarrow e^+ e^-$, in cui viene creata materia e anti-materia dall'energia elettromagnetica (fotone).

L'interazione-vertice è il mattone fondamentale della Qed. Ogni processo, dal più semplice ai più complessi, non è altro che una composizione di più processi elementari del tipo che abbiamo appena descritto. Vediamone alcuni.

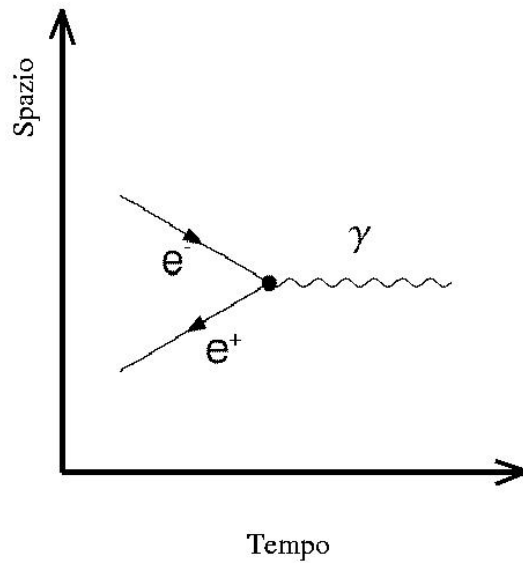


Fig. 5 *L'annichilazione fra un elettrone e un anti-elettrone*

Processi composti e particelle virtuali

La Fig. 6 mostra una possibile realizzazione del processo $e^- e^- \rightarrow e^- e^-$. I due elettroni provengono dal passato remoto e proseguono indisturbati il loro percorso fino al futuro remoto senza 'vedersi', cioè senza che l'uno influenzi in alcun modo il moto dell'altro. Come si spiega allora il comportamento ben noto secondo cui 'due cariche dello stesso segno si respingono'? E' evidente che quel diagramma non può rappresentare l'unico modo in cui si realizza il processo .

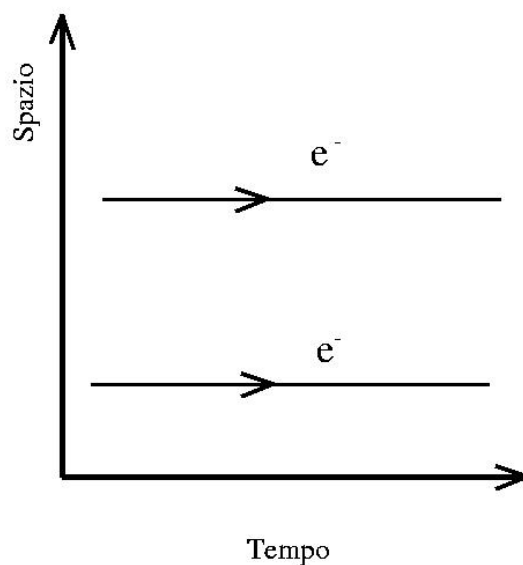


Fig. 6 *Due elettroni viaggiano senza 'vedersi'*

La risposta è il diagramma in Fig. 7. Anche in questo caso abbiamo due elettroni sia all'inizio che alla fine, ma in mezzo succede qualcosa di importante. I due si 'parlano'. Uno dei due emette un fotone e questo viaggia fino a raggiungere l'altro, da cui viene assorbito. Lo scambio continuo di fotoni secondo questo schema è il meccanismo che permette alle due particelle di interagire. I fotoni si comportano come dei messaggeri che portano informazioni come la posizione o la velocità dell'elettrone emittente al ricevente e che hanno come conseguenza –in questo caso- la repulsione tra i due.

E' importante notare che nel diagramma ci sono particelle che giocano due ruoli differenti. Alcune, gli elettroni in questo caso, hanno una estremità libera, il che indica che si tratta di particelle che hanno vissuto o vivranno un tempo infinito. Altre, in questo caso il fotone, hanno entrambe le estremità che terminano in un vertice, e quindi vivono solo un tempo limitato. Le prime si chiamano solitamente particelle 'reali', le seconde invece 'virtuali', dato che vivono un tempo troppo breve per poter essere rivelate direttamente. Non per questo le particelle virtuali sono irrilevanti, come abbiamo visto. Al contrario esse giocano il ruolo fondamentale di 'mediare' le interazioni fra le particelle reali.

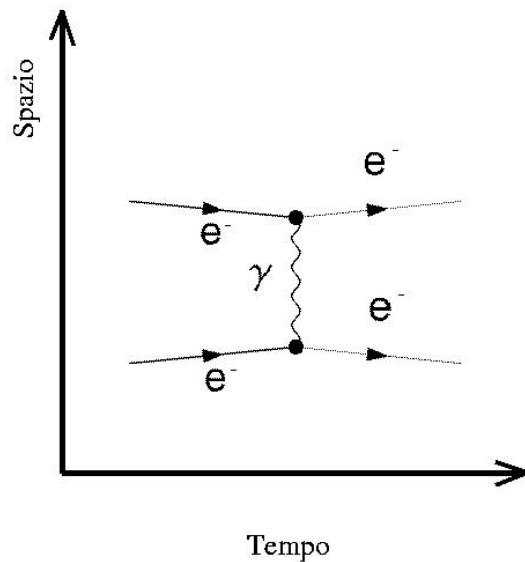


Fig. 7 Lo scambio di un fotone virtuale: I due elettroni 'si vedono'!

Accanto al diagramma in Fig. 7 ce ne sono infiniti altri che hanno due elettroni all'inizio e due alla fine, ad esempio quelli in Figg. 8 e 9. Come abbiamo detto, a ogni diagramma corrisponde una quantità matematica. In linea di principio, per calcolare

esattamente come si comportano due elettroni in determinate condizioni sarebbe necessario sommare tutte le quantità relative a tutti i diagrammi possibili con due elettroni all'inizio, un compito praticamente impossibile nella maggior parte dei casi. Fortunatamente ci viene in aiuto una proprietà della Qed. Tra tutti i diagrammi che hanno le stesse particelle all'inizio e alla fine i più importanti - ossia quelli che contribuiscono maggiormente alla somma totale - sono quelli che contengono meno vertici, ossia i più semplici. In pratica quindi, per capire se un diagramma è più o meno rilevante rispetto ad un altro si contano i vertici, e si cerca quello che ne ha di meno.

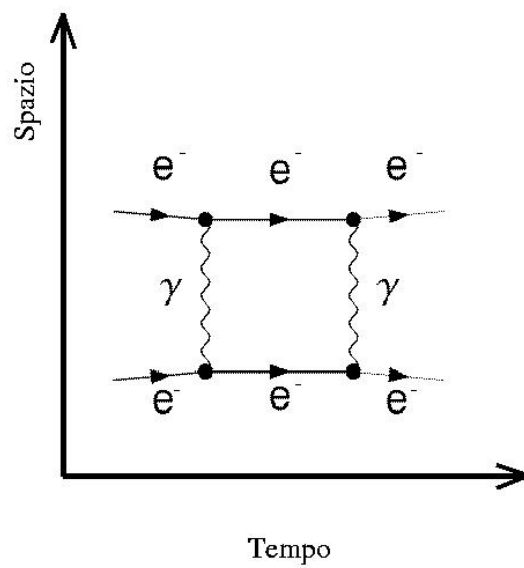


Fig. 8 *Un altro modo di interazione fra due elettroni ...*

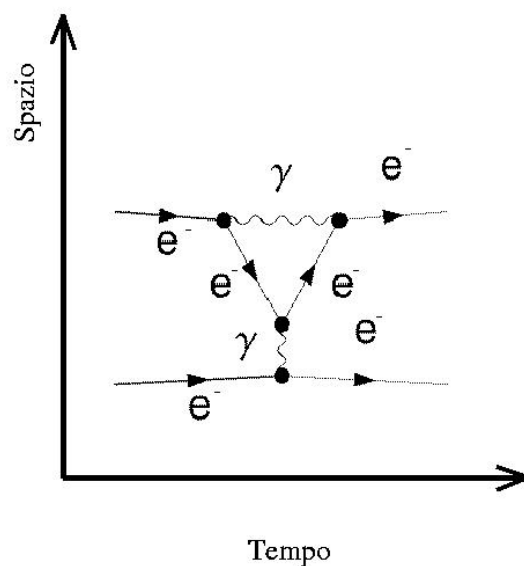


Fig. 9 *... e un altro ancora*

Cosa si può comunicare coi diagrammi di Feynman

Ecco la domanda cruciale di questo lavoro. Abbiamo detto che i diagrammi di Feynman, dalla loro invenzione a oggi e chissà per quanto tempo ancora, sono sempre rimasti in cima alla cassetta degli attrezzi dei fisici delle particelle. Permettono di eseguire i conti in modo sistematico e rapido e, fatto altrettanto apprezzato, permettono di fare molte considerazioni su un dato processo fisico ancora prima di aver effettivamente eseguito il conto. La loro utilità per i fisici di professione è fuori discussione, così come lo è il fatto che questa sia dovuta in massima parte proprio alla visualizzazione rigorosa, sistematica, e al tempo stesso intuitiva, che essi offrono.

In che misura queste proprietà possono essere utilizzate in chiave ‘divulgativa’? Quali messaggi possono trasmettere dal mondo delle particelle elementari a quello delle persone che non siano fisici delle particelle (e non abbiano nè il tempo nè l’intenzione di diventarli)? Per rispondere a questa domanda è necessario innanzitutto individuare gli elementi che rendono il mondo delle particelle elementari radicalmente diverso rispetto al mondo fisico ‘classico’. Sono proprio questi, infatti, gli aspetti che richiedono lo sviluppo di metafore radicalmente nuove, che non siano semplici rielaborazioni dell’esperienza quotidiana.

In un saggio pubblicato sul numero speciale della *Reviews of Modern Physics* in commemorazione del centenario della *American Physical Society* Frank Wilczek, uno dei maggiori fisici delle particelle viventi, si pone esattamente lo stesso problema (F. Wilczek, 1999). Seguiamo quindi il filo delle sue risposte, ovviamente dal nostro punto di vista di aspiranti comunicatori muniti di diagrammi di Feynman.

Particelle identiche

Il primo aspetto peculiare del mondo microscopico è, per Wilczek, **l’esistenza di copie diverse, ma indistinguibili, di particelle elementari**. Due elettroni, presi in due luoghi qualsiasi dell’universo, indipendentemente dalla loro origine e dalla loro storia, hanno esattamente le stesse proprietà, vale a dire la stessa massa, la stessa carica elettrica e lo stesso spin. Nell’ambito delle teorie quantistiche dei campi, di cui la QED è l’esempio di maggior successo, questo fatto fondamentale si spiega attribuendo al campo, e non alle particelle, la realtà primaria. I diversi elettroni sono ‘eccitazioni’ di

una stessa realtà fondamentale, il campo elettronico, che pervade tutto l'universo. Lo stesso vale per i fotoni, i quark, e le altre particelle.

L'esistenza di particelle diverse ma 'identiche', cioè indistinguibili anche in via di principio, è un fatto totalmente alieno al mondo dell'esperienza comune. Leibniz aveva addirittura fondato la sua metafisica sul 'principio dell'identità degli indiscernibili', secondo cui se due oggetti non possono essere distinti in nessun modo, allora essi devono necessariamente essere lo stesso oggetto. La meccanica quantistica ci insegna invece che le particelle elementari appartengono a 'classi'. Due elementi della stessa classe -cioè due particelle dello stesso tipo- non sono distinguibili in nessun modo, nemmeno in linea di principio. Anche se ciò ormai fa parte del bagaglio concettuale comune a chi ha una conoscenza basilare di chimica, non va trascurato che rappresenta comunque un salto concettuale notevolissimo rispetto all'esperienza comune per cui, a guardar bene, si può sempre trovare la differenza fra due palle da biliardo a prima vista identiche.

Maxwell, scrivendo la voce *Atomi* per l'*Encyclopedia Britannica* vi dedicò a questo argomento una lunga riflessione e concluse che "la formazione di una molecola è perciò un evento che non appartiene a quell'ordine della natura in cui noi viviamo ... non può avere a che fare con l'epoca della formazione della terra o del sistema solare ... ma con quella in cui si stabilì l'ordine esistente in natura".

Nel linguaggio dei diagrammi di Feynman a questo primo fatto fondamentale corrisponde l'indistinguibilità o, in pratica, l'intercambiabilità delle varie linee elettroniche o fotoniche. Se, una volta composto un diagramma, per esempio si scambiano tra loro due linee elettroniche, oppure si sostituisce una linea elettronica con una presa dal sacchetto di quelle ancora inutilizzate, si ottiene esattamente lo stesso diagramma. Nella applicazione pratica da noi sviluppata, in cui i diagrammi vengono costruiti assemblando tra loro pezzi di due tipi differenti (elettroni e fotoni) come nel Lego, questo fatto è quasi scontato, tanto da rischiare di passare inosservato. E' quindi necessario sottolinearlo esplicitamente facendo esempi concreti.

Materia e anti-materia

Il secondo aspetto peculiare del mondo delle particelle elementari è **l'esistenza delle anti-particelle e quindi dell'anti-materia**. Questa venne introdotta in un primo tempo da Dirac per interpretare in modo sensato l'equazione per l'elettrone. In seguito, con la formulazione della teoria dei campi quantistici, ottenne una sistemazione del tutto

soddisfacente dal punto di vista teorico e una dignità esattamente analoga a quella della materia ordinaria. Dal punto di vista matematico, elettrone e anti-elettrone sono due soluzioni intimamente legate tra loro. Se si parte dalla soluzione per l'elettrone e si cambia il segno della carica elettrica, si cambia la destra in sinistra, e si inverte il verso del tempo, si ottiene l'anti-elettrone. E viceversa. L'insieme delle tre operazioni si indica solitamente con CPT.

La forte parentela tra materia e anti-materia è totalmente nascosta all'esperienza comune, a causa del fatto ovvio - anche se compreso in modo tutt'altro che soddisfacente - che nel mondo in cui viviamo non c'è traccia di anti-materia. Nel linguaggio dei diagrammi di Feynman, invece, la parentela tra elettroni e anti-elettroni è manifesta nell'uso della stessa linea per descrivere entrambi. Ricordiamo che la linea in questione è una freccia che, se orientata nella stessa direzione del tempo rappresenta un elettrone, se orientata in senso opposto rappresenta un anti-elettrone. Il cambiamento di orientazione rispetto all'asse del tempo corrisponde all'operazione CPT descritta precedentemente.

Per quanto riguarda invece il fotone, le due possibili orientazioni rispetto alla freccia del tempo sono indistinguibili (non c'è alcuna freccia sulla linea fotonica) il che corrisponde al fatto fisico che fotone e anti-fotone sono la stessa particella.

Fino ad ora, abbiamo considerato due aspetti del mondo microscopico, l'esistenza di particelle identiche e quella dell'anti-materia, che non coinvolgono in alcun modo le interazioni. Quando queste entrano in gioco, emergono altri comportamenti peculiari.

Particelle si creano e si distruggono

Il primo tra questi è rappresentato dai **fenomeni di creazione e distruzione di particelle elementari**. I quattro processi base della Qed descritti in precedenza, cioè l'emissione e l'assorbimento di un fotone e la creazione o l'annichilazione di una coppia elettrone anti-elettrone, coinvolgono tutti la creazione o la distruzione di un fotone (i primi due) o di un elettrone e un anti-elettrone (gli ultimi due). Come abbiamo visto, tutti questi sono descritti dallo stesso vertice-interazione, il che rende evidente l'identificazione fra interazione e creazione-distruzione di particelle. Nel caso del Modello Standard il ruolo trasformatore dell'interazione è ancora più radicale. Infatti in Qed l'elettrone che emette un fotone rimane sempre un elettrone e il protone rimane un

protone. Invece nel Modello Standard l'elettrone che emette un bosone W (analogo al fotone) si trasforma in un neutrino, e il protone si trasforma in un neutrone.

Usando i diagrammi, già al livello più semplice della sola interazione fondamentale, tutto questo è ben chiaro e facilmente comunicabile. Basta fare osservare come il numero delle particelle iniziali sia diverso da quello delle particelle finali in ognuno dei quattro processi base.

Particelle virtuali come messaggeri dell'interazione

Lo scambio di particelle virtuali è il meccanismo con cui si spiegano le interazioni fra particelle, secondo lo schema che abbiamo visto in Fig. 7. Nell'elettromagnetismo di Maxwell, le forze elettriche e magnetiche fra due particelle cariche vengono attribuite all'influenza su una delle due particelle del campo elettromagnetico generato dall'altra. Nella teoria dei campi quantistici campi e particelle coincidono e quindi l'effetto del campo elettromagnetico viene reinterpretato come lo scambio di fotoni virtuali, emessi da una delle due particelle (reali) ed assorbiti dall'altra. Diversamente dal caso dell'elettromagnetismo però, nella teoria dei campi anche un elettrone può agire come particella virtuale, mettendo in interazione un fotone e un elettrone reali. Lo stesso schema funziona per i pioni, che mediano l'interazione nucleare fra neutroni e protoni, per le particelle W e Z, che mediano le interazioni deboli, e per i gluoni, che mediano le interazioni fra quark. A loro volta, anche neutroni, protoni, quark, neutrini, etc. etc., possono mediare interazioni.

Il concetto di particella virtuale come mediatrice dell'interazione, che come abbiamo visto appare in tutti gli ambiti della fisica delle particelle, si spiega facilmente mostrando diagrammi come quelli in Fig. 7, 8, e 9, e facendo osservare la differenza fra le linee con una estremità libera (particelle reali) e quelle con entrambe le estremità che terminano in un vertice (particelle virtuali).

Leggi di conservazione

Le creazioni e le distruzioni di particelle, indotte dalle interazioni, fanno sì che il numero totale delle particelle in gioco possa variare. Ad esempio in Fig. 10 due elettroni iniziali danno luogo a sei particelle finali, e cioè tre elettroni, un anti-elettrone e due fotoni. Se però si conta la carica elettrica totale, allora questa si mantiene invariata. La somma dà due cariche elettriche negative sia all'inizio che alla fine. In termini tecnici, si dice che la carica elettrica è 'conservata' nel processo, mentre il numero totale di

particelle non lo è. Si può provare a costruire il diagramma più bizzarro, con un numero grande quanto si vuole di pezzi, ma il risultato sarà sempre lo stesso: la carica *totale* alla fine e all'inizio è la stessa. **Leggi di conservazione** di questo tipo si ritrovano anche in altre teorie e riguardano, oltre alla carica elettrica, altre quantità, come ad esempio il numero di quark meno quello degli anti-quark. Sono strumenti potentissimi, poichè permettono di dire subito che un processo che viola una di queste leggi è impossibile, ancora prima di provare a comporre il diagramma corrispondente. Ad esempio il processo $e^+ e^+ \rightarrow e^+ e^-$, che richiederebbe di passare da due cariche positive iniziali a zero finali, è impossibile. L'origine di questa legge di conservazione è, ancora una volta, il vertice fondamentale. Tutti i processi base che questo descrive conservano la carica elettrica e quindi anche ogni processo complesso deve avere la stessa proprietà, dato che è costruito a partire da quegli stessi processi elementari.

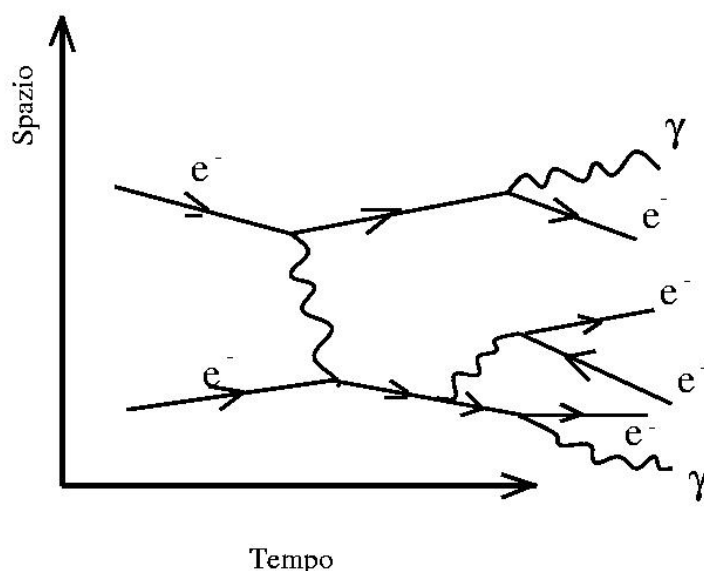


Fig. 10 *Da due elettroni, sei particelle*

Durante le dimostrazioni coi diagrammi di Feynman si può chiedere di realizzare, assieme a una serie di processi possibili, un processo che violi la legge di conservazione della carica elettrica. Nonostante nei corsi di chimica la nozione di bilanciamento delle cariche elettriche venga discussa ampiamente, nella nostra esperienza non ci è mai capitato che uno studente riconoscesse immediatamente l'impossibilità di quel processo. Praticamente tutti si cimentano in costruzioni di diagrammi sempre più arditi che però al controllo finale naufragano puntualmente. Questo provoca frustrazione, ma anche una maggiore consapevolezza del significato

della conservazione della carica. Infine, si può mostrare che se ci fosse a disposizione un nuovo tipo di interazione fondamentale, in cui ad esempio le due frecce elettroniche fossero entrambe dirette in direzione del vertice, il processo si potrebbe realizzare facilmente. In questo modo diventa più chiaro il legame strettissimo fra la struttura dell'unica interazione fondamentale presente nella Qed e le leggi di conservazione.

... e che cosa non si può comunicare

L'uso metaforico dei diagrammi di Feynman che stiamo cercando di delineare ha ovviamente dei limiti. Quali sono i concetti più importanti che restano fuori dalle nostre dimostrazioni-esercitazioni e che quindi richiedono spiegazioni supplementari da parte di chi conduce le dimostrazioni o degli insegnanti? Abbiamo già affermato che l'aspetto matematico del metodo dei diagrammi di Feynman, pur utilissimo per chi si occupa di fisica delle particelle, è dichiaratamente escluso a priori dal nostro campo di interesse. Quindi in una dimostrazione è necessario citare l'esistenza di questo versante ma è anche altrettanto necessario rassicurare immediatamente gli interlocutori sulla sua irrilevanza ai nostri scopi, per evitare di perdere all'istante qualunque contatto con chi ci ascolta. La chiarezza evita in questo caso interpretazioni equivoche e omissioni involontarie.

Invece, sono più delicati altri aspetti, che non vengono esclusi a priori dai nostri obiettivi, sono altrettanto importanti di alcuni dei punti elencati al paragrafo precedente e però non possono essere descritti con altrettanta immediatezza semplicemente costruendo e facendo costruire diagrammi di Feynman.

Uno di questi è senza dubbio il principio di conservazione dell'energia e dell'impulso. Quando da due particelle se ne creano sei, come nell'esempio in Fig. 10, non basta controllare che esista il diagramma di Feynman corrispondente e osservare ad esempio che la carica elettrica sia conservata. Nella realtà, perchè il processo avvenga è necessario che l'energia degli elettroni iniziali sia sufficiente a creare i quattro elettroni e i due fotoni finali. La conservazione dell'impulso pone problemi ancora più sottili. Infatti, in virtù di questo principio nessuno dei processi base $e^- \rightarrow e^- \gamma$, $e^+ e^- \rightarrow \gamma, \dots$, può avere luogo singolarmente, ma soltanto in composizione con altri. Ad esempio, l'annichilazione di elettrone e anti-elettrone dà necessariamente luogo alla produzione di almeno due fotoni, $e^+ e^- \rightarrow \gamma\gamma$. Le conseguenze di questi principi fondamentali non sono affatto evidenti ragionando solo sui diagrammi di Feynman, e quindi è molto

importante la presenza di una persona ‘esperta’ per condurre la discussione nel caso in cui ci si avvicini a queste problematiche.

La motivazione originaria di Feynman per l’invenzione del metodo dei diagrammi fu il problema degli infiniti e della rinormalizzazione, ossia il metodo per ottenere risultati finiti, confrontabili con le misure sperimentali. I diagrammi che danno luogo a risultati infiniti sono quelli che contengono ‘loop’, percorsi che si chiudono su se stessi, come quelli di Fig. 8 e 9. Ovviamente, se non si dice nulla su come ‘calcolare’ effettivamente un diagramma non c’è alcun modo di spiegare la connessione fra loop e infiniti e ancora meno come questi infiniti possano essere eliminati.

Il progetto sul campo

La trasposizione dei diagrammi di Feynman dal piano del foglio di carta o della lavagna al mondo tridimensionale degli oggetti fisici è uno degli aspetti caratteristici del nostro esperimento divulgativo e probabilmente uno dei principali punti di forza di tutto il progetto. Avere un ancoraggio fisico, sotto forma di pezzi di plastica e di metallo manipolabili, si rivela una risorsa preziosa per rianimare una platea sconcertata dall’annuncio che nelle due ore seguenti si farà dell’Elettrodinamica Quantistica. E’ molto importante dichiarare fin dal principio che l’attività che viene proposta rientra in un ambito costruttivo-manuale più che nozionistico-astratto. E che, al tempo stesso, si tratta di un gioco del tutto autoconsistente, definito dai pezzi e dalle regole, per cui non è necessaria nessuna nozione di partenza su elettroni, fotoni, e meccanica quantistica. Queste nozioni, se ci sono, possono risultare utili in un secondo momento per collocare i processi che si sono costruiti in un panorama più familiare e articolato. All’inizio però, è più importante che chi si accosta per la prima volta ai diagrammi di Feynman si senta in un certo senso deresponsabilizzato, alleggerito dal compito di dover sapere, o di dover collegare quello che vede e fa a nozioni che nella maggior parte dei casi sono vaghe e fuorvianti. Sapendo di non dover sapere, i ragazzi e le ragazze delle classi che abbiamo incontrato si sono sempre messi al lavoro senza timori reverenziali nei confronti di ‘interazioni’ e ‘fotoni virutali’, prendendoli e utilizzandoli per quelli che sono, blocchi logici di un discorso formale.

Un altro aspetto da chiarire fin dall’inizio è che le metafore in questione riguardano le interazioni e non gli oggetti. Gli oggetti con cui si lavorerà non hanno alcuna pretesa di rappresentare gli elettroni e i fotoni in modo naturalistico, ma

solamente funzionale. Il discorso può essere introdotto efficacemente ricorrendo a domande volutamente assurde come 'voi, come ve lo immaginate un elettrone?', a cui far seguire, dopo l'inevitabile silenzio accompagnato da espressioni perplesse, l'esibizione trionfante di una cannetta in plastica di color verde: 'ecco qua, oggi, per noi, questo qui è un elettrone'.

Gli oggetti

i

Per la realizzazione pratica del prototipo ci siamo rivolti alla ditta di modellistica "Bertocco" di Padova, che in passato aveva già collaborato a diversi progetti di divulgazione scientifica dell'Infn. Il punto più delicato si è rivelata la scelta del meccanismo di incastro. Si doveva realizzare un sistema che consentisse la composizione di un solo tipo di vertice, quello cioè in cui si incontrano un fotone, un elettrone entrante e uno uscente, e vietasse meccanicamente ogni altra combinazione. Abbiamo optato per una soluzione in cui il vertice contiene tre 'femmine' di tre diversi tipi di incastri (quadrato, esagonale, e circolare). L'elettrone ha un maschio esagonale in testa e quadrato in coda, e il fotone un maschio circolare sia in testa che in coda (vedi Fig. 11. Inoltre due femmine sono montate su supporti mobili che consentono di variare l'angolo fra le linee elettroniche, in modo da facilitare la realizzazione di diagrammi complessi.

La freccia dell'elettrone è una cannetta in plastica flessibile colorata di verde e infilata in un tronco di cono che dà la direzionalità.

La scelta per il fotone è invece caduta su un prodotto che si trova già in commercio per motivi completamente differenti: un condotto per liquido emulsionante per torni e altre macchine industriali. La forma a zig-zag e il colore arancione ne hanno fatto il candidato ideale per impersonare il fotone, che convenzionalmente viene indicato proprio con una linea ondulata, come abbiamo visto nelle figure al capitolo precedente.

Lo spazio-tempo è un tavolo metallico su cui si possono applicare nelle direzioni volute una freccia 'spazio' e una 'tempo' realizzate in materiale magnetico.

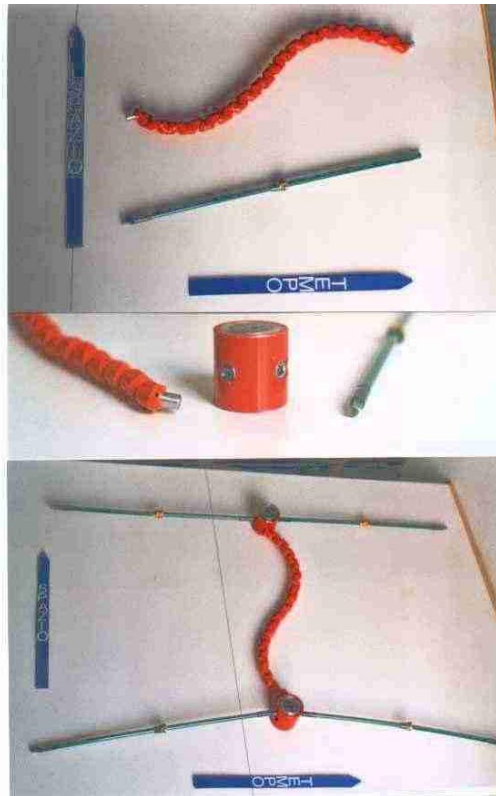


Fig. 11 *Gli oggetti realizzati*

Dimostrazioni, questionari, e risultati

Abbiamo condotto una decina di dimostrazioni rivolte a classi degli ultimi anni delle scuole secondarie (licei classici e scientifici, istituti tecnici-industriali), sia nell'ambito della "Settimana della cultura scientifica 2001" presso il dipartimento di fisica dell'Università di Parma, che all'interno delle scuole. Una dimostrazione dura tipicamente un'ora e mezza. Dopo aver accennato all'enorme campo di applicazione della Qed, alla figura di Richard Feynman e all'aspetto fisico-matematico rigoroso per cui i suoi diagrammi vengono comunemente utilizzati, vengono introdotti i vari pezzi e le regole del gioco secondo lo schema di presentazione utilizzato nel terzo paragrafo. Successivamente si formano gruppi da quattro o cinque persone distribuendo a ognuno un questionario e i pezzi necessari per lavorare. La quantità dei pezzi a disposizione limita attualmente a venti-venticinque il numero massimo di studenti per ogni dimostrazione. Ogni questionario reca nell'intestazione un processo, ad esempio elettrone e fotone che vanno in elettrone e fotone, oppure elettrone e anti-elettrone che si annichilano in due fotoni.

La prima pagina presenta il processo e le sue implicazioni per la vita quotidiana o per la ricerca in fisica. Nella seconda pagina si chiede di realizzare il processo coi diagrammi di Feynman, usando i pezzi a disposizione, e di fare alcune considerazioni sul numero di pezzi usati, sulla presenza di particelle ‘virtuali’, e sulla possibilità di ottenere lo stesso processo con un diagramma differente. Poi, partendo dal diagramma appena costruito, viene richiesto di ottenere altri processi un po’ più complessi, il che può comportare o l’aggiunta di altri pezzi o l’inversione del senso delle frecce elettroniche rispetto alla freccia del tempo. Infine, nella terza pagina, si chiede di costruire un processo impossibile, ad esempio

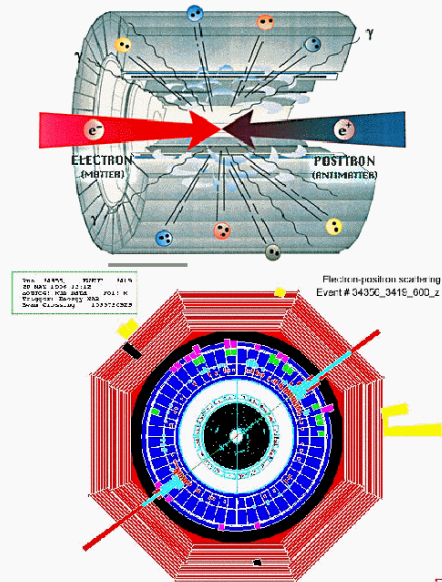
$e^+ e^- \rightarrow e^- e^-$, in modo da far toccare con mano le implicazioni delle leggi di conservazione. Una persona per gruppo viene incaricata di riportare su un foglio le risposte alle domande proposte e di disegnare i diagrammi realizzati.

Nelle Figg. 12(a), 12(b) è riportato uno dei questionari utilizzati e alcuni esempi di risposte ottenute, a cui abbiamo sovrapposto i nostri commenti (in rosso). Dato che il carattere di esperienze-pilota condotte su un numero contenuto di classi, non ci è sembrato utile impostare un’analisi statistica, ad esempio sui tempi necessari per rispondere alle domande, sul tipo di errori più frequenti e via discorrendo. Abbiamo ritenuto invece più opportuno di analizzare i questionari uno per uno cercando di cogliere sia eventuali caratteristiche comuni che singoli spunti originali. Inoltre, l’osservazione delle dinamiche che si sviluppano nei gruppi al lavoro, e l’interazione diretta con questi, forniscono informazioni che non possono essere raccolte per mezzo di un’analisi statistica.

Come regola generale, si può affermare che **la totalità dei gruppi è riuscita a realizzare il processo principale di ogni questionario**. Di solito, i gruppi a cui era toccato il processo $e^+ e^- \rightarrow e^+ e^-$ riuscivano a realizzarlo quasi all’istante, mentre gli altri incontravano qualche difficoltà in più. Ciò si spiega verosimilmente col fatto che durante la spiegazione venisse utilizzato come esempio il processo $e^- e^- \rightarrow e^- e^-$. Dal diagramma per questo, basta invertire il senso delle frecce di due elettroni per ottenere gli anti-elettroni iniziali e finali. Questa spiegazione è corroborata dal fatto che l’altro diagramma possibile per ottenere $e^+ e^- \rightarrow e^+ e^-$ con lo stesso numero di pezzi, quello in cui l’elettrone e l’anti-elettrone iniziali si annichilano in un fotone che poi crea un’altra coppia $e^+ e^-$, non figura mai tra le risposte.

$$e^+e^- \rightarrow e^+e^-$$

- E' uno dei processi più semplici della QED
- Viene studiato nei grandi acceleratori
- e^+ ed e^- entrano nel rivelatore.
- Dopo l'interazione, e^+ ed e^- escono lasciando due tracce in direzioni opposte



$$e^+e^- \rightarrow e^+e^-$$

- Hai appena trasformato una particella (e^-) nella sua antiparticella (e^+) !
- Riesci a ripetere il miracolo, e a ottenere $e^-e^- \rightarrow e^-e^-$?
- E $e^-e^+ \rightarrow e^-e^+$? Riesci a fare anche questo? Perché?
- Prova a sommare la carica elettrica delle particelle nei vari casi. Cosa noti?

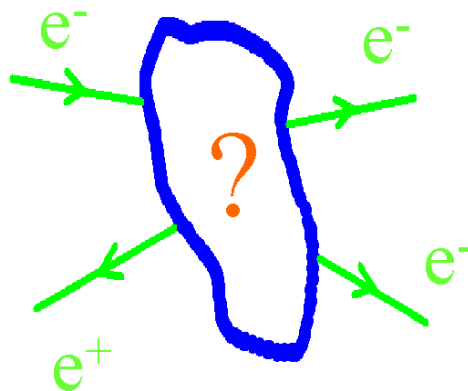
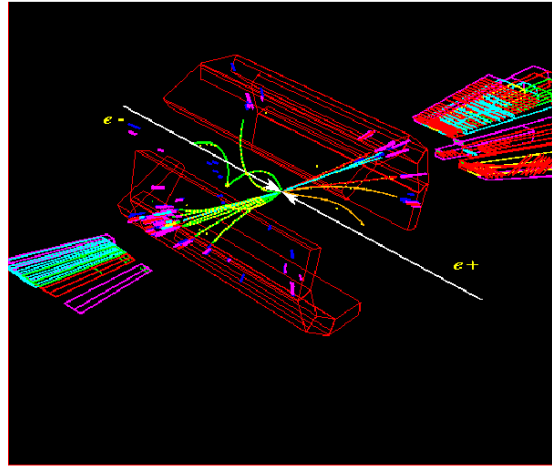


Fig. 12(a) Un questionario: prima parte

$e^+e^- \rightarrow e^+e^-$

- Prova a realizzarlo coi diagrammi di Feynman. Quanti pezzi hai usato?
- Ci sono particelle senza estremità libere?
- Senza staccare i pezzi, è possibile realizzare $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$. Ci riesci?



$e^+e^- \rightarrow e^+e^-$

- ① Abbiamo usato 7 pezzi
- ② No, si sono pezzi S^2 , il forte
- ③ S^2 , risultato di 180° e 360° dopo e^- , formando e^-
- ④ S^2 stesso e allora $e^-e^- \rightarrow e^-e^-$ risultato di 180° e 360° e e^-e^-
- ⑤ No perché in un'interazione si può sempre $0, 2, 4, \dots$ e^-
- ⑥ $e^-e^- \rightarrow e^-e^-$ le norme delle cariche elettriche sono
 $e^-e^- \rightarrow e^-e^-$ La somma e^-e^- prima e dopo $2e^-$
 $e^-e^- \rightarrow e^-e^-$ La somma e^-e^- prima e dopo $2e^-$

Tutto Giusto!

Fig. 12(b) Un questionario: seconda parte

Gli altri due processi proposti, $e^- \gamma \rightarrow e^- \gamma$ ed $e^+ e^- \rightarrow \gamma \gamma$, non si possono invece ottenere banalmente da $e^- e^- \rightarrow e^- e^-$. In particolare, in tutti e due è un elettrone virtuale a mediare l'interazione, eventualità che non veniva mostrata e nemmeno menzionata nell'esempio introduttivo, in cui è il fotone a mediare l'interazione. **L'iniziale ritardo di questi gruppi si spiega quindi con la necessità di estendere il concetto di particella virtuale dai fotoni agli elettroni.**

Sui processi un po' più complessi invece le risposte sono state molto più difformi. Quasi tutti i gruppi hanno dato risposte su questa parte dei questionari. Le domande che richiedevano una semplice rotazione di frecce elettroniche senza staccare i pezzi hanno avuto praticamente il 100% di risposte esatte. Quelle invece per cui era necessario aggiungere pezzi hanno richiesto più lavoro. Pochi gruppi non hanno risposto, diversi hanno risposto quasi alla fine del tempo a disposizione. In molti casi, la risposta data non era quella corrispondente al numero minimo di pezzi necessari per realizzare il processo richiesto (alcuni gruppi hanno mostrato più modi possibili per ottenere risposte corrette). La cosa più notevole è però che praticamente nessun gruppo abbia dato risposte sbagliate. **Le regole di Feynman, una volta tradotte nelle regole meccaniche di incastro tra linee e vertici, non consentono di raggiungere conclusioni sbagliate!**

La parte finale dei questionari si basava sulla **legge di conservazione della carica elettrica, ed è quella che ha presentato le maggiori difficoltà**. In alcuni casi si doveva realizzare un processo impossibile. Dopo essersi resi conto che con la quantità di pezzi utilizzati fino a quel momento non si riusciva a ottenerlo, i gruppi si lanciavano spesso in razzie di elettroni, vertici e fotoni presso gli altri gruppi, sperando che aumentando il numero di elementi fosse possibile azzeccare l'incastro giusto. All'incirca una metà dei gruppi hanno concluso autonomamente che, per quanti sforzi si facessero, era impossibile costruire un diagramma valido. Altre domande, volutamente vaghe, chiedevano di trovare una regola generale, ad esempio sullo sviluppo di uno sciame elettromagnetico iniziato da un fotone. In questo caso, si vedevano sciame sempre più grandi crescere sui banchi, ma pochi sono arrivati alla conclusione che, per quanto grande, il numero di elettroni prodotti è sempre uguale a quello degli anti-elettroni.

Questo non rappresenta necessariamente un risultato negativo, al contrario. In primo luogo perchè, non potendola costruire esplicitamente, nessuno ha mai affermato di aver trovato una soluzione a una delle domande impossibili. Poi perchè il passaggio dalla frustrazione al 'ah già!' quando gli si spiegava che la struttura del vertice

implicava la conservazione della carica elettrica, ha probabilmente rappresentato per molti un'esperienza conoscitiva più intensa dei facili successi ottenuti nella costruzione dei diagrammi precedenti.

In alcune occasioni abbiamo utilizzato un altro tipo di questionario, il cui scopo era quello di confrontare le 'performances' di chi lavorava con la versione meccanica dei diagrammi con quelle di chi invece aveva a disposizione solo carta e penna. Nel nuovo questionario si ricordavano le regole di Feynman e poi si forniva una lista di cinque processi da realizzare, di cui due impossibili. Il risultato, con tutte le riserve del caso circa una sua validità statistica, è molto confortante. I gruppi che lavoravano solo con carta e penna davano facilmente risposte sbagliate, in cui il diagramma proposto o si riferisce a un processo diverso da quello richiesto, oppure contiene un vertice diverso da quello della QED, con ad esempio tre elettroni afferenti. In particolare, non ci si rende conto se il processo proposto è impossibile, proprio perchè non ci si è accorti di aver usato un vertice inesistente. Le risposte di chi utilizzava i pezzi meccanici sono invece in linea con quelle dell'altro questionario, cioè, che ci si accorga o meno dell'impossibilità di un dato processo, non si realizzano diagrammi sbagliati.

Cosa resta a distanza di tempo?

In un caso, è stato possibile verificare a distanza di tempo l'efficacia del progetto. Quaranta giorni dopo aver partecipato a una dimostrazione, a ventuno studenti di una classe del terzo anno di liceo scientifico è stato sottoposto un test contenente dieci domande simili a quelle contenute nei questionari delle pagine precedenti. Gli studenti dovevano rispondere utilizzando solo carta e penna, senza avere a disposizione i modelli dei diagrammi di Feynman.

Come si vede, se si eccettua l'ultima, tutte le domande hanno ottenuto più del sessanta per cento di risposte esatte. Le domande più critiche sono quelle che riguardano la costruzione di diagrammi complessi (penultima e terzultima riga), comunque la percentuale di successi è sorprendentemente elevata anche in questi casi, se si tiene in considerazione che i soggetti non avevano a disposizione gli oggetti tridimensionali e quindi potevano incorrere più facilmente in errore.

Le percentuali di risposte esatte (E), incomplete o parzialmente corrette (P), sbagliate (S), e non affrontate (n.a.) per ogni domanda sono riportate nella tabella.

Domande	E	P	S	n.a.
Orienta l'asse dei tempi in modo che l'oggetto A sia un positrone e l'oggetto B un elettrone: A: → B: ←	76	0	19	5
Disegna un diagramma che rappresenti l'interazione $e^+ e^- \rightarrow e^+ e^-$	81	14	5	0
Costruisci se possibile il diagramma che può rappresentare $\gamma e^- \rightarrow \gamma e^+$	71	0	24	5
Se il processo non è possibile spiega perché	62	14	24	0
Disegna il diagramma che rappresenta l'interazione $e^- e^- \rightarrow e^- e^-$	66	10	10	14
Puoi con lo stesso diagramma rappresentare $e^+ e^+ \rightarrow e^+ e^+$?	86	14	0	0
Che operazione occorre compiere?	76	10	14	0
Rappresenta il processo $\gamma e^- \rightarrow e^+ e^- e^-$	62	14	14	10
Rappresenta il processo $e^+ e^- \rightarrow \gamma \gamma$	67	0	19	14
Commenta tale processo	24	24	24	28

Percentuali di risposte esatte (E), incomplete o parzialmente corrette (P), sbagliate (S), e non affrontate (n.a.) per ogni domanda

Il processo $\gamma e^- \rightarrow \gamma e^+$ è stato riconosciuto impossibile da quindici studenti su ventuno. Se ricordiamo che nei precedenti esperimenti con persone dotate solo di carta e penna la probabilità di non riconoscere un processo impossibile era molto più elevata, possiamo concludere che, verosimilmente, gli studenti si siano ricordati della legge di conservazione della carica elettrica `scoperta' durante la dimostrazione, e non abbiano nemmeno tentato di costruire il diagramma corrispondente.

In complesso, l'ottanta per cento dei soggetti ha dato più di cinque risposte esatte, il che, con tutte le dovute cautele circa la significatività statistica, rappresenta un risultato al di là delle nostre più ottimistiche aspettative.

Risposte esatte	Da 0 a 1	Da 2 a 4	Da 5 a 7	Da 8 a 10
Percentuale studenti	10	10	33	47



Fig. 13 *Gli oggetti al lavoro sul campo*

Considerazioni finali

A parte le ‘spiegazioni’ dei concetti elencati nel terzo paragrafo l'esperimento è stato interessante anche per le domande che ha suscitato. Alcune di queste sono state estremamente gratificanti perché non previste, e soprattutto perché dimostravano che eravamo riusciti a stimolare delle curiosità a un inaspettato livello di profondità.

‘Ma il fotone virtuale a che velocità viaggia?’ ‘Non dovrebbe andare alla velocità della luce?’ ‘Ma come fa il fotone a essere una particella, dato che Einstein ha detto che niente può viaggiare alla velocità della luce?’ ‘Ma come faccio a sapere se le particelle virtuali esistono veramente?’ ‘Posso vedere il fotone come ‘contenente’ elettrone ed anti-elettrone?’

In presenza di insegnanti sensibili e motivati, come lo sono diversi fra quelli che abbiamo avuto la fortuna di incontrare nel corso di questo progetto, i diagrammi di Feynman, pur non rientrando nel programma di studi ufficiale, possono rappresentare delle buone scintille per accendere discussioni e approfondimenti ad ampio spettro.

E per finire, una speranza-provocazione. Il senso estetico è una delle principali guide per i fisici nella formulazione o nell'accettazione delle teorie. Si lega a qualità

come semplicità, economia, simmetria. E' possibile convogliare, oltre ai concetti discussi nel capitolo precedente, anche un gusto estetico? Esempio, la bellezza della QED è dovuta al fatto che c'è solo un vertice base, e che a partire da questo si riproducono tutti i processi elettrodinamici. Immaginiamo di avere invece una teoria che per spiegare gli stessi fenomeni avesse bisogno di altri vertici. Ad esempio un vertice per l'assorbimento e uno, diverso, per la creazione di coppie elettrone anti-elettrone, una situazione che un fisico teorico riterrebbe estremamente anti economica e quindi 'antiestetica'. Quale sarebbe la scelta di un non-fisico a cui fosse richiesto di dare un parere estetico sulle due situazioni?

Sviluppi futuri

Immaginare una diffusione del gioco da noi sviluppato su scala più grande di quella delle dimostrazioni 'porta a porta' fin qui sperimentate richiede di affrontare due questioni preliminari: bisogna individuare delle soluzioni costruttive più economiche e pensare a modi diversi per introdurre l'argomento del gioco e le regole di base, eliminando la presenza fisica del sottoscritto o chi per lui. Restando in ambito scolastico, la soluzione ovvia alla seconda questione sarebbe quella di un breve corso di addestramento per insegnanti particolarmente motivati. Rimane però, anche in questo caso, il problema del costo degli oggetti, che allo stato attuale è notevolmente elevato principalmente a causa del lungo tempo di lavorazione richiesto per la preparazione dei cilindri che rappresentano le interazioni.

Attualmente stiamo pensando a soluzioni radicalmente differenti, che consentano di produrre a costi contenuti un gran numero di pezzi di dimensioni molto più ridotte rispetto a quelle del prototipo. Gli oggetti così realizzati potrebbero essere per esempio allegati a riviste scientifiche oppure venduti o dati in omaggio come gadgets nei musei della scienza o in occasione di mostre scientifiche. La figura chiave del 'presentatore' verrebbe in questo caso sostituita dal personaggio di un fumetto, anche questo in via di creazione. Il fumetto e il kit per formare i diagrammi verrebbero forniti insieme a un libricino contenente i questionari sotto forma di quiz, oltre a immagini e informazioni sulle innumerevoli manifestazioni della QED e sulla fisica delle particelle.

La seconda linea di sviluppo, non antagonista ma anzi sinergica alla precedente, avrebbe a che vedere con l'estensione del metodo dei diagrammi di Feynman alla teoria che generalizza la QED, il Modello Standard. Dopo aver parlato di elettroni, anti-

elettroni, e fotoni, è necessario infatti ricordare che il mondo della fisica delle particelle è in realtà assai più vasto, e contiene neutrini, muoni, quark, e via discorrendo. Per ragioni pratiche è impossibile pensare di realizzare un gioco che contenga tutti questi elementi. Il computer, unitamente alla Rete, può però fornire una soluzione molto interessante. Esistono programmi, sviluppati per fini professionali, che generano tutti i diagrammi di Feynman del Modello Standard una volta assegnato il tipo di processo e il numero massimo di vertici che si vogliono utilizzare. Si può allora immaginare di costruire un sito Internet -cui indirizzare coloro che siano già stati esposti alla versione manipolabile dei diagrammi- che interfacci un utente non esperto con uno di questi programmi. Il contesto più naturale in cui inserire questa applicazione sarebbe un sito di divulgazione generale della fisica delle particelle. In questo ambito, ogni processo potrebbe essere collegato a un testo di spiegazione e a immagini dell'evento corrispondente come viene visto, per esempio, in un acceleratore di particelle.

Ringraziamenti

E' un piacere ringraziare il Prof. Alessandro Pascolini per le numerose discussioni e il continuo sostegno al progetto. Le dimostrazioni in classe hanno avuto l'entusiastico sostegno di molti professori, tra cui le Professoresse Michela Castiglioni e Rosaria Evangelista, che hanno anche fornito spunti di valutazione estremamente interessanti. Ringrazio inoltre Matteo Bazzicalupo, Paco Lanciano e Pietro Greco per varie discussioni avute durante la preparazione del progetto.

Bibliografia

Black, M. (1993), *More about metaphor*, In A. Ortony (Ed.), *Metaphor and thought* (pp.19-41). Cambridge, UK: Cambridge University Press.

Miller, A.I. (1996), *Insights of Genius: imagery and creativity in science and art*, Springer-Verlag.

Wilczek, F., (1999), *Quantum Field Theory*, *Reviews of Modern Physics*, 71 (1999) S85.