

Pensare da Fisici

Carlo Bernardini

■ - La percezione diretta della realtà probabilmente funziona allo stesso modo per tutti. Per lo meno, il fatto che persone che hanno gli organi percettivi sani ne diano una descrizione sovrapponibile a quella di un interlocutore parimenti dotato di un linguaggio descrittivo, conforta la convinzione che la rappresentazione osservativa diretta abbia la possibilità di identificare gli stessi elementi. La registrazione di quella osservazione nella memoria è però solo un atto deliberato determinato da qualche motivo di interesse che si manifesta con diverse motivazioni e anche con diverse intensità. Le motivazioni vanno dal godimento estetico alla curiosità scientifica, con un'enorme gamma di possibilità intermedie: comunque, in assenza di queste spinte a registrare, sappiamo bene che il cervello ha una capacità di rimozione che mantiene la memoria pulita da ogni dettaglio non degno di nota. Quasi sempre, però, la "rappresentazione mentale" che si ottiene con il trasferimento in memoria di osservazioni meritevoli ritocca la realtà percepita, in funzione di una utilizzazione individuale particolare; questa utilizzazione è determinata sia dai moventi dell'attenzione con cui l'osservatore campiona gli elementi di realtà che ha osservato, sia dagli strumenti culturali di cui dispone. Cioè, la costruzione di una rappresentazione mentale è un atto eminentemente "specializzato" che mette insieme dati, strutture formali, immaginazione e, non di rado, elementi estranei che chiamerò, senza un intento di denigrazione aprioristica, ma con un invito alla diffidenza, "pregiudizi o opinioni pregresse". Vi sarà infatti una seconda fase di attività generata da quella rappresentazione mentale, che potrà avere caratteristiche assai differenti a seconda che il

soggetto sia provvisto di in linguaggio di tipo umanistico – assai diffuso grazie alla semplicità di cui gode avendo prevalentemente funzioni “evocative” di uso molto comune – o di tipo scientifico che, a causa delle sue finalità “operative”, consente di elaborare la rappresentazione mentale predisponendola e indirizzandola verso risultati estranei a ogni precedente esperienza. Dunque, è l’opportunità di produrre “scoperte” (ciò che non è già contenuto nella osservazione) che differenzia, generalmente, l’elaborazione di rappresentazioni mentali con linguaggi scientifici da quelli umanistici.

2 - Tra le tante rappresentazioni mentali fiorite nella cultura umana, una, che mi è più familiare per motivi professionali, mi sembra che sia poco conosciuta al grosso pubblico: è quella dei fisici, cioè di quella comunità che costituisce una frazione esigua della popolazione terrestre; tuttavia, i fisici fanno una popolazione sovranazionale omogenea a sé, grazie alla “universalità” dei loro strumenti d’analisi della realtà (linguaggi), e questa universalità è forse il motivo principale dell’affidabilità dei risultati che essi producono e accettano collettivamente, cioè come prodotto di un cervello collettivo. Sicché la formazione peculiare delle rappresentazioni mentali dei fisici può essere oggetto di interesse quasi al di là della fisica stessa; e forse esportabile almeno in parte in altri ambiti culturali.

Ha perciò una qualche importanza dare un’idea del modo in cui un fisico si appropria della realtà naturale allo scopo di lavorare a una analisi che abbia, al suo completamento, la struttura *operativa* di ciò che chiamiamo una “teoria”. Intanto, gli elementi di ciò che si osserva prendono saggiamente il nome di “sistemi fisici”, per riconoscerne sia la complessità strutturale che l’appartenenza ad un

sistema-contenitore più vasto che, per semplicità, chiameremo “ambiente”. Il sistema in osservazione può essere o no in interazione con l’ambiente; quando non lo è, lo chiamiamo “isolato” e l’ambiente assume il mero significato geografico detto “riferimento”. Già queste operazioni di ridurre l’oggetto di osservazione a un sistema più un ambiente comportano una sfrondata che chiamerò “eliminazione della ridondanza”. Nel caso di un sistema isolato, l’universo osservato si riduce a quel solo sistema, sia pure immerso in un universo percepibile all’osservatore, che perciò è un elemento dell’ambiente; il quale osservatore può esercitare la sua volontà decidendo di sollecitare il sistema oppure limitandosi a osservarne l’evoluzione temporale spontanea. In entrambi i casi, l’attenzione è concentrata sulle variabili che si manifestano con più evidenza, allo scopo di decidere quali sono quelle significative che entreranno nella sintesi mentale che forma la rappresentazione mentale oggetto del linguaggio scientifico formalizzato e in tal modo operativo. Chiamerò questa operazione di elaborazione, dall’eliminazione delle ridondanze alla costruzione dell’elaborazione formalizzata, la realizzazione di un “simulacro” di tutti i possibili sistemi del tipo di quello in considerazione. E’ dalle proprietà e dai comportamenti di questi simulacri nell’ambiente che riusciamo a ottenere quelle che si chiamano comunemente le “leggi naturali”. Il fatto che queste leggi siano appropriate all’espressione linguistica di ciò che costituisce la realtà esterna all’osservatore (ad ogni osservatore) è trasparentemente visibile nella caratteristica “indipendenza da ogni convenzione umana” della loro forma simbolica. E’ questo che fa parlare spesso un po’ pomposamente di “leggi universali”, benché da ciò nasca un potente equivoco:

universali non vuol dire valide per tutti i possibili sistemi fisici ma solo per quelli in qualche modo commensurabili a quel gruppo da cui è nata la fenomenologia di quella rappresentazione. Da lì l'ininterrotta catena di teorie di generalità crescente che, in genere, inglobano quelle precedenti come casi validi con buona approssimazione solo in ambiti più ristretti: dunque, non il superamento di leggi sbagliate ma la generalizzazione a sistemi e ambienti più larghi. La fisica detta "classica", per esempio, va bene per i problemi geologici o per l'ingegneria edile, ma non per la chimica molecolare o la cosmologia che richiedono simulacri simbolici più generali (la meccanica quantistica e la relatività generale).

L'indipendenza delle leggi dalle convenzioni umane implica l'invarianza di quelle leggi rispetto a una trasformazione delle convenzioni che fissano i processi di misura delle variabili e, quando è il caso, anche dei parametri che caratterizzano il contesto naturale. Queste trasformazioni vengono chiamate, forse in modo non felice, "simmetrie". Sono simmetrie "geometriche" quelle generate dall'invarianza per trasformazione del sistema di riferimento (traslazione e rotazione); sono simmetrie "cinematiche" quelle generate dall'invarianza rispetto alle trasformazioni tra riferimenti in moto relativo inerziale (trasformazioni di Galileo o di Lorentz – Poincaré), sono simmetrie "di scala" quelle generate da cambiamenti delle unità di misura (principio di omogeneità e similitudine). Senza il ricorso ai simulacri formalizzati della realtà queste simmetrie sarebbero assai difficili da identificare. Il lavoro più perspicuo pubblicato al riguardo è certamente l'articolo di R.M.F. Houtappel, H. Van Dam, E.P. Wigner, *The conceptual basis and use of geometric invariance*

principles, The Reviews of Modern Physics, vol. 37, 1965, pg. 595 (in seguito citato come HDW). Tutto ciò prende le mosse, nella sua attuazione generale, dal grande sviluppo della Meccanica Analitica nel XIX secolo e della teoria dei gruppi: i nomi di Joseph-Louis Lagrange, William Rowan Hamilton, Felix Klein, Sophus Lie e Amalia (Emmy) Noether sono determinanti nella costruzione dei simulacri più sintetici e operativi e delle loro proprietà, a cui nel XX secolo si aggiunsero simmetrie discrete tipiche della microfisica e simmetrie più complesse come quella di *gauge*. Ma non si può tacere che l'idea alla base di tutto si può trovare già in Galileo Galilei:

Dialogo sopra i due Massimi Sistemi del Mondo; il § è sobriamente intitolato: *In mare, sotto coverta*. Ecco cosa dice Salviati (alter ego dell'autore), nelle sue parti essenziali:

“ Riserratevi con qualche amico nella maggior stanza che sia sotto coverta di alcun gran naviglio e quivi fate di aver mosche farfalle e simili animaletti volanti; siavi anco un gan vaso d'acqua e dentrovi de' pescetti; suspendasi anco in alto qualche secchiello, che a goccia a goccia vadia versando dell'acqua in un altro vaso di angusta bocca, che sia posto a basso: e stando ferma la nave, osservate diligentemente come quelli animaletti volanti con pari velocità vanno verso tutte le parti della stanza; i pesci si vedranno andar notando indifferentemente per tutti i versi; le stille cadenti entreranno tutte nel vaso sottoposto; e voi, gettando all'amico alcuna cosa, non più

gagliardamente la dovrete gettare verso quella parte che verso questa, quando le lontananze siano eguali [...]. Osservate che avrete tutte queste cose, benché niun dubbio vi sia che mentre il vassello sta fermo non debbano succeder così, fate muover la nave con quanta si voglia velocità; chè (pur che il moto sia uniforme e non fluttuante in qua e in là) voi non riconoscerete una minima mutazione in tutti li nominati effetti, né da alcuno di quelli

potrete comprendere se la nave cammina o sta ferma [...]. E di tutta questa corrispondenza d'effetti ne è cagione l'essere il moto della nave comune a tutte le cose contenute in essa ed all'aria ancora, che perciò dissi io che si stesse sotto coverta [...].

Interviene a questo punto il dotto amico Sagredo, con una perspicua osservazione che fa ben capire la genialità dell'argomento che trasforma osservazioni comunissime in una conclusione sbalorditiva (e questo è il punto in cui scopro il senso profondo del comunicare!):

Queste osservazioni, ancorché navigando non mi sia caduto in mente di farle a posta, tuttavia son più che sicuro che succederanno nella maniera raccontata: in conferma di che mi ricordo essermi cento volte trovato, essendo nella mia camera, a domandar se la nave camminava o stava ferma e talvolta, essendo sopra fantasia, ho creduto che ella andasse per un verso, mentre il moto era al contrario. [...]

2 - Tutto ciò si condensa in un linguaggio speciale, spesso strettamente simbolico ma generalmente operativo, che lavora appunto sui simulacri e sulle loro proprietà riconoscibili attraverso opportuni modi di “interrogarli”, cioè di metterli alla prova eseguendo su di essi operazioni di trasformazione e calcolo. Per molti decenni, la fisica ha sviluppato un modo di pensare basato su una semplificazione potentissima che chiamerò “atomizzazione formale”: questa atomizzazione consiste sostanzialmente nell’immaginare che ogni sistema sia costituito da “punti geometrici” dotati di massa (perciò, punti “materiali”) e, possibilmente, di altre proprietà localizzate nello stesso punto, come una carica elettrica, un momento magnetico, un momento angolare intrinseco (“spin”), eventualmente altro, se richiesto dalla fenomenologia osservata. Questi punti materiali erano/sono

pensati immersi in un vuoto speciale, che alberga i “campi”, cioè gli agenti delle forze che regolano ogni sorta di cambiamento nei sistemi. La grande scoperta di Galilei-Newton consiste nel comprendere che le relazioni di causa ed effetto non sono tali da far sì che le cause (forze) generino un qualsivoglia movimento (velocità) come effetto; ma che si traducono in relazioni tra una “forza” e una “accelerazione”. La parola accelerazione, assai specializzata, entra così nel vocabolario e Galilei la adopera da precursore. Un punto materiale, identificato da tre coordinate nello spazio ordinario a tre dimensioni, ha, lì dove è, una velocità “istantanea”, anch’essa dotata di tre componenti. Ma è la variazione istantanea della velocità, l’accelerazione appunto, che dipende dalle forze; sicché per ricostruire interamente il moto in un campo di forze bisognerà partire dalla conoscenza delle coordinate spaziali e delle componenti della velocità all’istante in cui inizia l’osservazione di quel punto materiale. In tutto, ci sono 6 dati di partenza che le “leggi del moto” non ci forniscono. Questi 6 dati nella loro infinità varietà, costituiscono lo spazio delle possibili “condizioni iniziali” per un punto materiale, che è lo spazio astratto in cui si troveranno tutti i possibili esiti delle leggi del moto di quel punto. Questo spazio prende il bizzarro nome di “spazio delle fasi” e il suo impiego sarà longevo.

Ma, una volta realizzata questa atomizzazione formale con il congegno ben funzionante del punto materiale, ecco che un nuovo possibile passo avanti si prospetta con una suggestiva espressione linguistica che corrisponde a una rappresentazione mentale assai potente: quando un sistema ricalca istante per istante il comportamento di uno o più punti materiali, si immagina che ciò che conta nella descrizione segua le stesse leggi di quei punti e si introduce la nozione di

“grado di libertà” per contare quali sono i veri moti liberi sottraendo così i moti obbligati da eventuali vincoli. L’introduzione di vincoli forti e infinitamente rigidi è una potente astrazione semplificativa ma non banale. Per esempio, i moti di due masse puntiformi vincolate da un segmento infinitamente rigido sono rappresentabili con 3 gradi di libertà del centro di massa più 2 possibili rotazioni attorno a due assi, ortogonali tra loro e al segmento che le congiunge. Il che porta a uno spazio delle fasi in 10 dimensioni.

Un “meccano mentale” sostituisce a ciò che si osserva un sistema su cui si può lavorare: è una esplosione della concezione alla base della vecchia geometria. Molti avranno letto che i triangoli di cui parla Euclide non esistono in natura, cioè come oggetti naturali. Perché non provarci anche con i sistemi fisici? A quel punto, quando i sistemi fisici sono ridotti all’essenziale, si può tentare di studiare le leggi del loro comportamento; e un modo raffinatissimo per farlo consiste nell’immaginarsi i cosiddetti “esperimenti pensati” (*gedankenexperimenten*). Ne ho già citato uno, quello di Galilei che nega il significato assoluto della velocità con gli esperimenti “citati”, che si potrebbero fare a bordo di una nave ma non c’è bisogno di fare. Ma ve ne mostro un altro, un semplice disegno di Isaac Newton che permette di passare con continuità dalla caduta dei gravi al moto dei pianeti: è geniale.

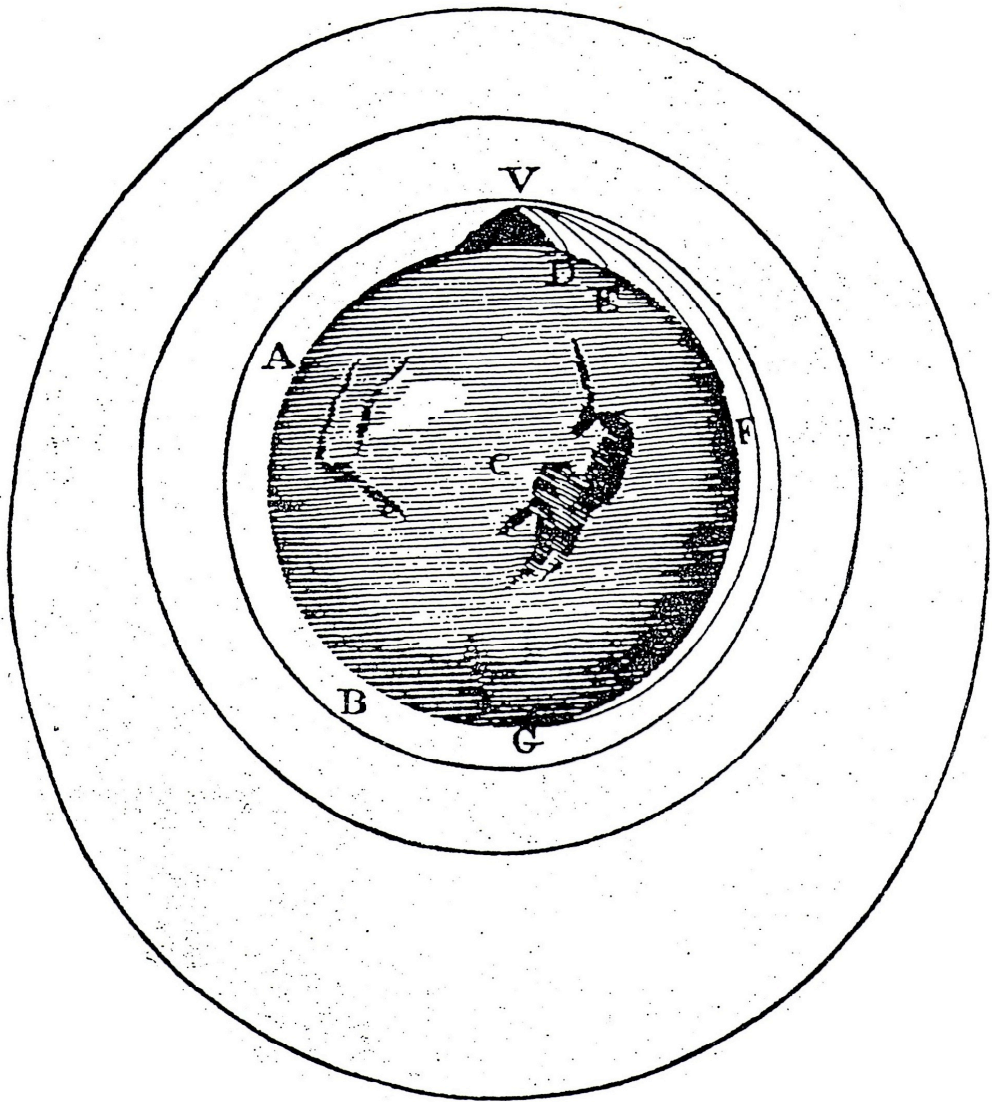
Il disegno mostra come la traiettoria di caduta di un grave dalla vetta V di una montagna immaginaria (esagerata per comodità di visualizzazione) si muta nella “caduta” in orbita di un pianeta grazie a una conveniente velocità iniziale minima di “lancio”, superiore però a una velocità “di soglia” che non a caso, prenderà il nome di “velocità di fuga”. Dopo

l'osservazione di Galilei sull'indipendenza dell'accelerazione di gravità g dalla massa del corpo accelerato, potremo concludere tranquillamente che questa velocità di fuga v_f dipenderà solo da g e dal raggio R del pianeta attorno a cui il grave lanciato orbita come satellite:

$$v_f \sim \sqrt{gR}$$

e manca solo un coefficiente numerico adimensionale, il che però non ci impedisce di dire che le velocità di fuga “scalano” come le radici quadrate dei prodotti gR relativi a ciascun pianeta.

Fig 1 – Il celebre disegno di Newton: satellite in orbita.



Con questi esperimenti pensati si compie un percorso di riconciliazione culturale eccezionale: in fondo, un romanzo altro non è che un “esperimento pensato” su un ambiente o su una comunità di persone o su una interpretazione storica. I simulacri, in un romanzo, sono più ricchi, casuali e complessi di quelli di un sistema fisico; ma, forse anche per questo, non sono formalizzabili. Il romanzo, il racconto, si chiude in sé e tende a diventare un *unicum* in un campionario di vicende e di stili di scrittura che prenderà il nome di “letteratura”.

Ma veniamo ora a una rappresentazione mentale modernissima e alla creazione mentale di un simulacro che è simile ad un “esperimento pensato” che però non si basa su esperienze comuni. Si tratta dei celebri “diagrammi di Feynman”. Il problema nasce da un disagio persistente nell’immaginazione ottocentesca, che porterà in definitiva alla relatività speciale di Einstein: due corpi distanti nello spazio agiscono l’uno sull’altro con forze come quelle gravitazionali generate dalle loro masse, o magari con forze elettromagnetiche generate da cariche elettriche o momenti magnetici. Ebbene: nell’idea originale di Newton, queste forze sono pensate come “istantanee” e, quando Newton dice, con il terzo principio della dinamica, che sono forze di uguale intensità che agiscono in verso opposto, lo dice anche per corpi lontani, lì dove essi si trovano, allo stesso istante. Questo equivale a dire che l’interazione si propaga con velocità infinita. Può reggere una rappresentazione così fatta? Sta di fatto che in quella ormai vecchia dinamica classica, il terzo principio presiede a un risultato indiretto bene assodato, “la conservazione della quantità di moto – detta anche impulso – di ogni sistema isolato”. Nel bellissimo lavoro citato di HDW il problema viene preso di petto: che succede

se le interazioni si propagano nel vuoto tra un corpo e l'altro? Ma Feynman ha un magico modo di rappresentarsi la cosa: un corpo, un elettrone, per esempio, spara qualcosa (in rosso nella figura: lo chiamerò "fotone") che si porta via un po' del suo impulso e della sua energia. Perciò, quell'elettrone ("entrante") cambia il suo moto e diventa "uscente" mentre il fotone si propaga finché non raggiunge un altro elettrone che lo assorbe e cambia anch'esso il suo moto. Il processo elementare è uno "scattering" (un urto) tra due elettroni attraverso la loro interazione elettromagnetica; per descriverlo, bisogna stimare la probabilità che un elettrone spari un fotone, dare una descrizione della propagazione di quel fotone fino all'altro elettrone e poi stimare la probabilità che l'altro elettrone lo assorba. Quel fotone appare come un invisibile intermediario e perciò sarà chiamato "virtuale". È l'ingrediente essenziale della più elementare rappresentazione á la Feynman: il diagramma con scambio di un solo intermediario. Ma la rappresentazione si può complicare ad libitum introducendo scambi di quanti si voglia fotoni. Tutto va a posto: l'interazione si "propaga", l'impulso si conserva. Il terzo principio della dinamica non serve più.

Per quanto mi riguarda, io non credo molto che un bravo pittore o disegnatore riesca ad essere un miglior fisico di quanto non lo fossero Galilei, Newton o Feynman. Devo ammettere che uno dei miei maestri, Bruno Touschek, essendo un ottimo disegnatore, aveva spesso intuizioni migliori di quelle di molti altri fisici che ho conosciuto. Ma la mia tesi, forse azzardata, è che le stesse "emozioni", con in più solidissime istruzioni per l'uso, si possono provare direttamente traducendo un simulacro ben fatto in formule, cioè in simboli e nessi tra simboli. Certo, il gioco può

prendere addirittura la mano: ci si può “innamorare” di una struttura elegante che pensiamo sia figlia della nostra intelligenza; può perciò accaderci di difenderla contro chi la usa a modo suo: ma anche questa competizione può portare i suoi frutti. Con questo mi fermo. Ma mi rivolgo a chi ancora studia e cerca di capire: la fisica è tutt'altro che un freezer delle emozioni intellettuali: al contrario! E' uno dei punti più caldi. Provare per credere...

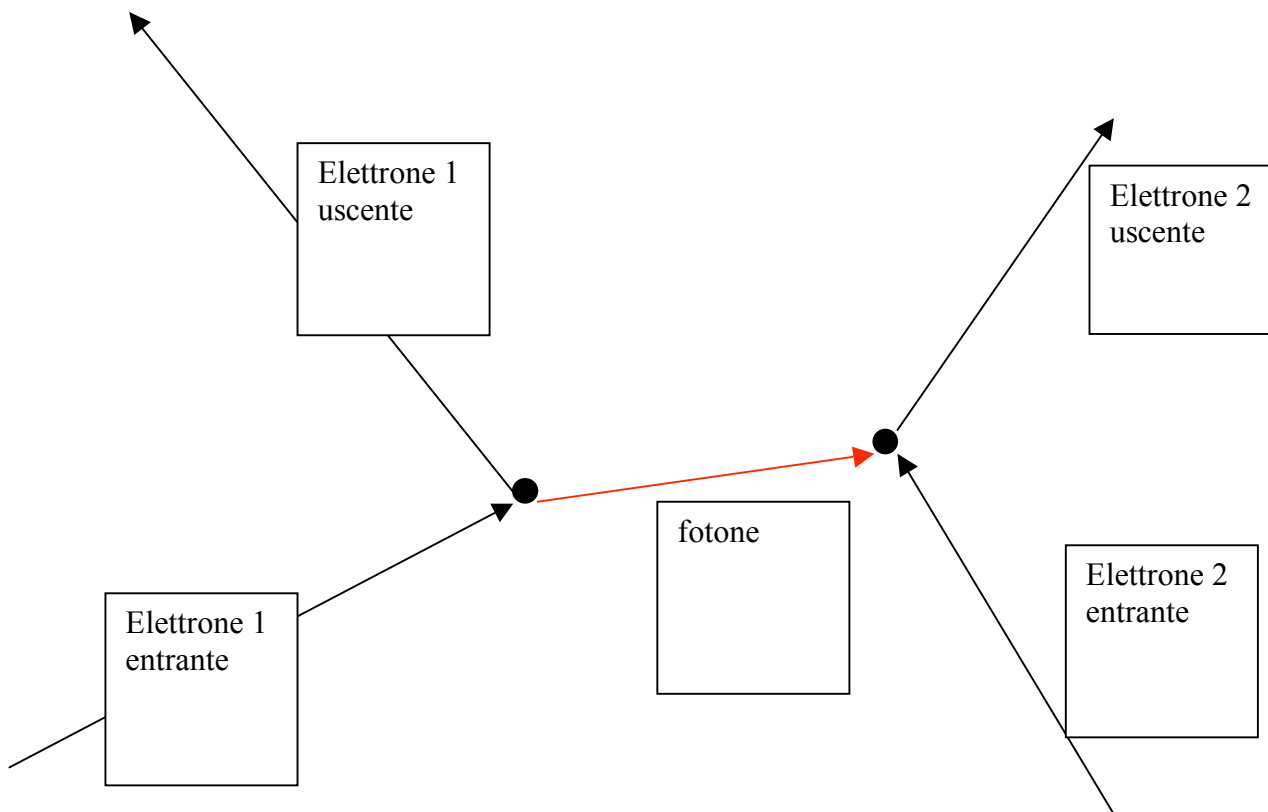


Fig 2 – Diagramma di Feynman per lo scattering di due cariche elettriche (p.es.: elettroni) con scambio di un fotone (in rosso nella figura)