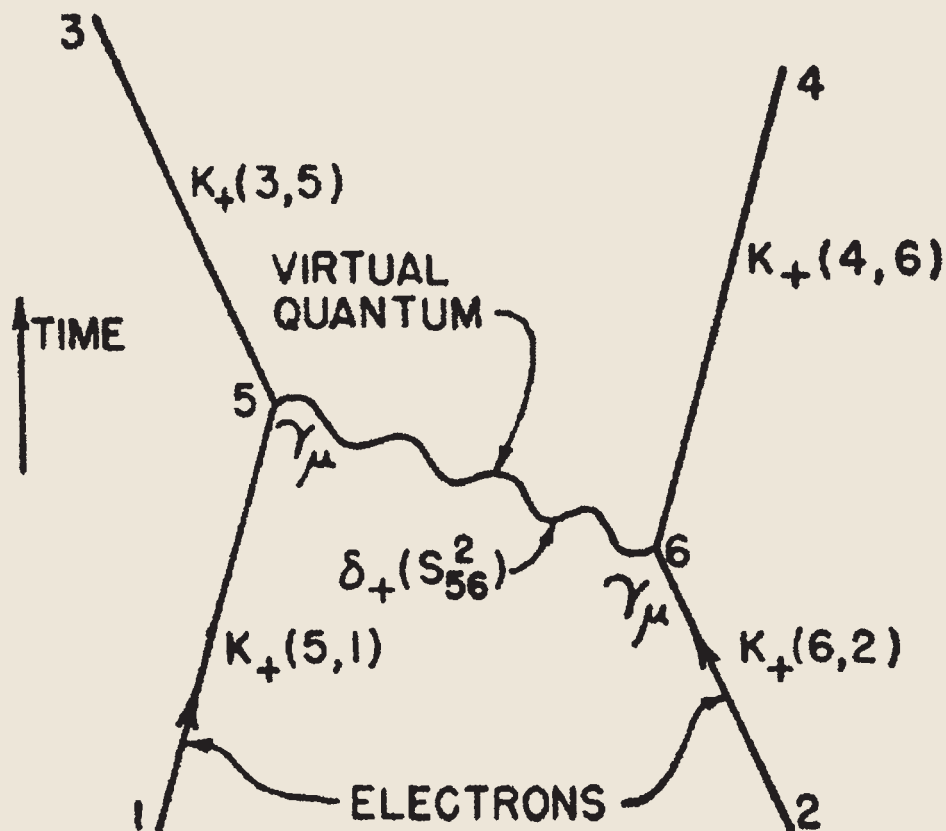




◀ Il diagramma che mostra il processo di repulsione tra due elettroni attraverso lo scambio di un fotone virtuale (non osservabile). La necessità di chiarire il significato e l'uso dei diagrammi lo obbliga a proporli con un eccesso di segni che ne possano identificare ogni singolo elemento.

Diagram showing the process of repulsion between two electrons through the exchange of a virtual (unobservable) photon. The need for clarification and use of diagrams calls for an excess of signs that can identify each individual element.

figura A | figure A

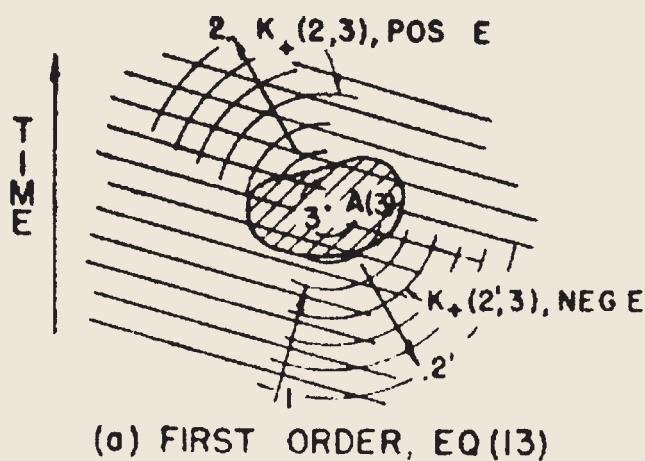
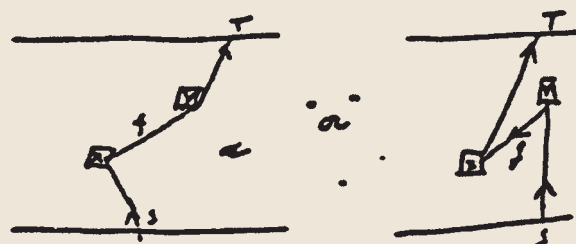
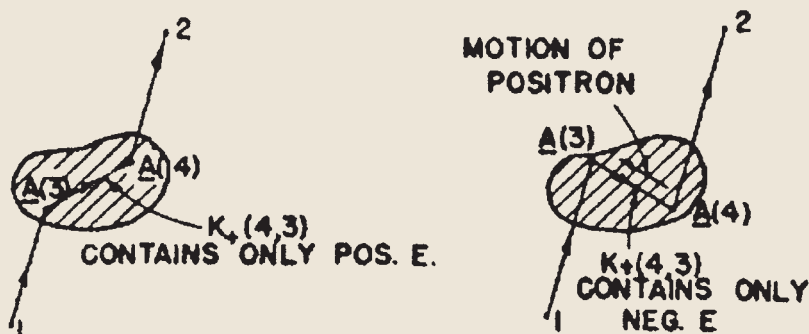


figura B | figure B



▲ Il cammino a N di un elettrone nello spazio-tempo: [fig. B] diagrammi estratti dalle note scritte a mano nel 1947 dal titolo *Theory of positron*; [fig. A] diagrammi pubblicati nel 1949 nel volume 76 di «Physical Review».

The N-shaped route an electron takes in space-time: [fig. B] diagrams from handwritten notes made in 1947 titled "Theory of positron"; [fig. A] diagrams published in 1949 in volume 76 of *Physical Review*.



*I diagrammi di Feynman comprendono e risolvono la complessità
dei fenomeni che regolano l'interazione tra le particelle elementari,
strutture procedurali e visive allo stesso tempo.*

Il senso di Feynman per i diagrammi

[Feynman's Knack
for Diagrams]

↳ GIUSEPPE LIBERTI

Feynman introdusse i suoi diagrammi per dotarsi di uno strumento che lo aiutasse a trasformare in elementi calcolabili tutti i contributi di cui si compone il processo di interazione tra le particelle cariche e il campo elettromagnetico, costruendo allo stesso tempo una procedura in grado di organizzarli e rappresentarli. Il primo e più famoso, quello che mostra la repulsione tra due elettroni attraverso lo scambio di un fotone imprigionato tra due vertici di interazione, appare in *Space-time approach to quantum electrodynamics*, un articolo pubblicato su «Physical Review» nel 1949¹ che presto sarebbe divenuto una pietra miliare nell'edificio della elettrodinamica quantistica.

Venti pagine prima, in *The theory of positrons*², Feynman aveva mostrato come fare a inseguire gli elettroni nel loro percorso a N all'interno di una regione in cui sperimentano una debole interazione, tracciando la loro propagazione avanti, indietro e poi ancora avanti nel tempo. Un elettrone che si muove indietro nel tempo altro non è che un positrone (l'anti-particella dell'elettrone, dotata di carica positiva), Feynman lo sa e propone così di rappresentare il flusso della carica con una linea orientata, una freccia il cui verso si confronta proprio col procedere del tempo (se il verso è lo stesso sono elettroni, se il verso è opposto, positroni). Questo avrebbe consentito di osservare il processo per intero, un'unica linea che cambia direzione a ogni interazione, bisognava solo mettersi nella prospettiva giusta, guardare dall'alto: «È come se un bombardiere che vola basso sopra una strada vedesse improvvisamente tre

Feynman came up with his eponymous diagrams as a tool to help transform all the constituent parts of the interaction between charged particles and electromagnetic fields into computable elements, at the same time constructing a procedure capable of organizing and representing them. The first and most famous, the one showing repulsion between two electrons through the exchange of a photon “trapped” between the two vertices of their interaction, appeared in “Space-time approach to quantum electrodynamics,” an article published in *Physical Review* in 1949¹ which soon became a milestone in the field of quantum electrodynamics.

Twenty pages before that, in “The theory of positrons,”² Feynman demonstrated how to follow electrons N-shaped path in contexts where they experience negligible interaction tracing their propagation forward, backward, and then forward again in time. An electron moving backward over time is nothing other than a positron (the electron's anti-particle, positively charged), Feynman knew as much, and therefore proposed the flow of charge be represented by a directional line, an arrow whose direction reflects the course of time (if the direction is the same, they're electrons—if it's the opposite, they're positrons). This would allow one to observe the entire process, through a single line that changes direction with each interaction; it was only a matter of putting it in the right perspective, looking down from above: “It is as though a bombardier flying low over a road sudden-



strade, ed è solo quando due di loro si incontrano e scompaiono di nuovo che si rende conto che egli è semplicemente passato sul lungo tornante di una singola strada».³

È questo un aspetto fondamentale per le rappresentazioni che arriveranno qualche pagina dopo: il tempo perde di senso come indicatore dello sviluppo dei fenomeni, non ci si può più limitare ad accumulare le informazioni che vengono dal passato e rivolgersi unicamente con lo sguardo al futuro; è con l'intera storia dello spazio-tempo che bisogna fare i conti. E dunque i diagrammi non sono semplici diagrammi narrativi ma strutture che comprendono e risolvono la complessità dei fenomeni (relativistici) che intendono descrivere sulla base di regole di composizione algebrica ben definite: ogni linea e ogni vertice rappresentano un'espressione matematica che combinata alle altre, secondo l'ordine stabilito dal diagramma, permette di ottenere l'informazione quantitativa su quanto spesso avvenga un processo di diffusione o di decadimento.

Rappresentare i processi fisici con un'immagine, un diagramma, è stato per Richard Feynman un tentativo di tradurre su carta quello che egli visualizzava con l'occhio della mente («è diffici-

ly sees three roads and it is only when two of them come together and disappear again that he realizes that he has simply passed over a long switchback in a single road.»³

This is a fundamental aspect of the representations published just a few pages later: time loses meaning as an indicator of the phenomena's development, one can no longer just accumulate information from the past and look solely toward the future; the entire history of space-time must be taken into consideration. These diagrams are, therefore, not simply narrative diagrams, but structures that include and resolve the complexity of the (relativistic) phenomena they aim to describe, based on the well-defined algebraic rules of composition: each line and each vertex represents a mathematical expression that, combined with others according to the order established by the diagram, allows one to obtain quantitative information about how often a given process of diffusion or decay occurs.

For Richard Feynman, representing physical processes in pictures, in diagrams, was an attempt to translate on paper what he visualized in the mind's eye ("It is hard to believe it, but I see these things not as mathematical expressions but a mixture of mathe-

▲ Richard Feynman al CERN nel 1970.

Richard Feynman at CERN in 1970.

le da credere, ma io vedo queste cose non come espressioni matematiche, ma come un tutt'uno formato da un'espressione matematica avvolta in modo vago dentro e intorno all'oggetto».⁴ Quel qualcosa di indistinto che nasceva nella condizione di «confusione attiva», quella in cui si cercano le risposte ed è tutto ancora aggrovigliato: oggetti; simboli; formule. La visualizzazione è per Feynman parte vitale del pensiero e va portata alla luce, resa evidente, e la sua rappresentazione può diventare metodo di lavoro, può essere compresa e condivisa a patto di aver fornito consistenza alle procedure e alle teorie che descrivono i processi fisici. Non tutta la fisica può però essere tradotta in diagrammi e per rendere ciò che si è pensato chiaro e corretto, per dipanare il groviglio, è necessaria l'analisi ovvero «la matematica che è linguaggio e logica allo stesso tempo ed è molto più potente di qualunque rappresentazione».⁵ Solo così è possibile «trattare direttamente con le soluzioni delle equazioni piuttosto che con le stesse equazioni»⁶ da cui esse derivano, solo così un sistema grafico diventa rappresentazione e strumento di calcolo allo stesso tempo.

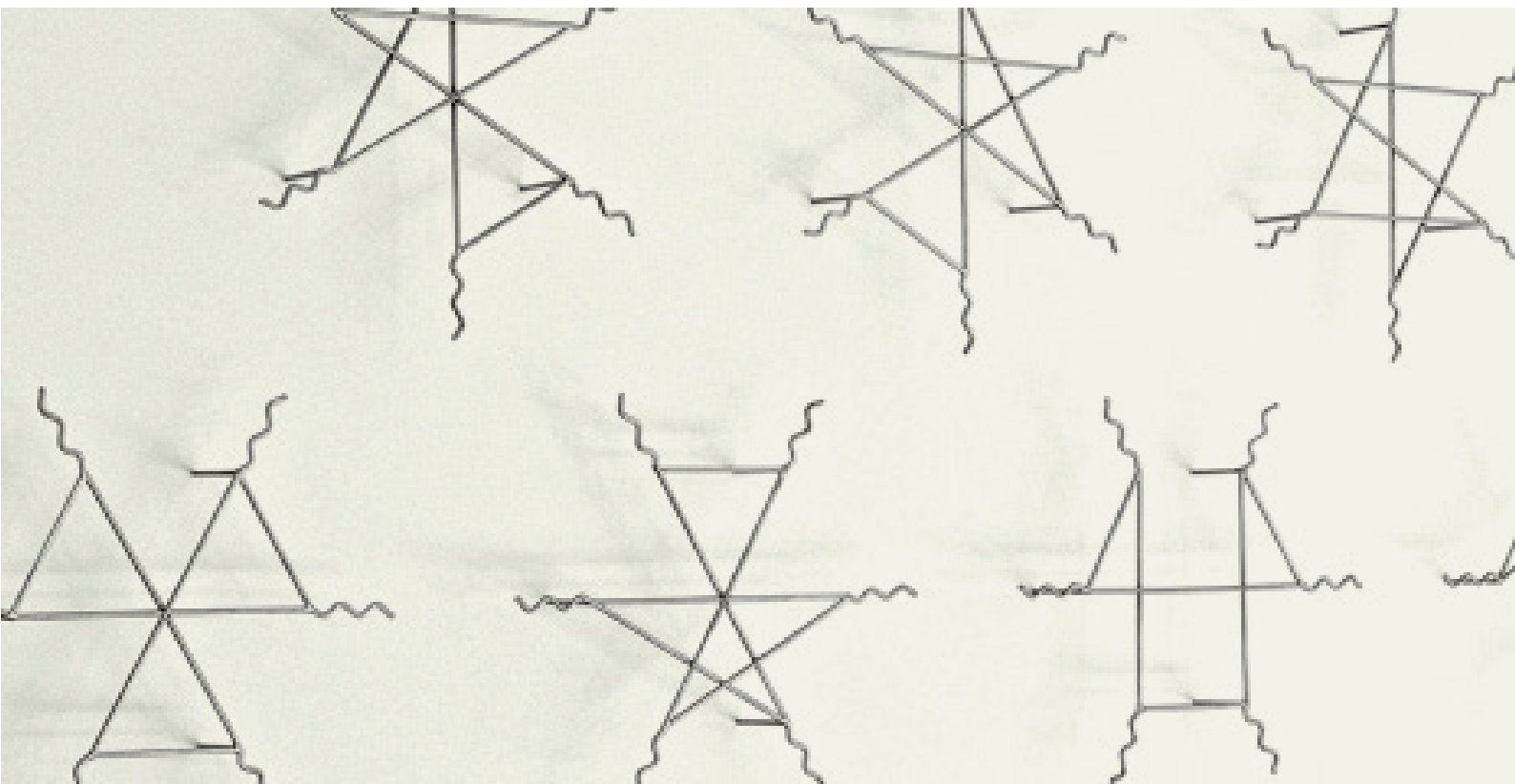
I diagrammi di Feynman occupano, nella storia della fisica e probabilmente in quella della scrittura, un posto speciale. Per molti fisici scarabocchiarli è ormai l'attività principale, una pratica utile per impostare i problemi prima ancora che per tradurli in espressioni matematiche e per poter comunicare rapidamente le idee ai colleghi;

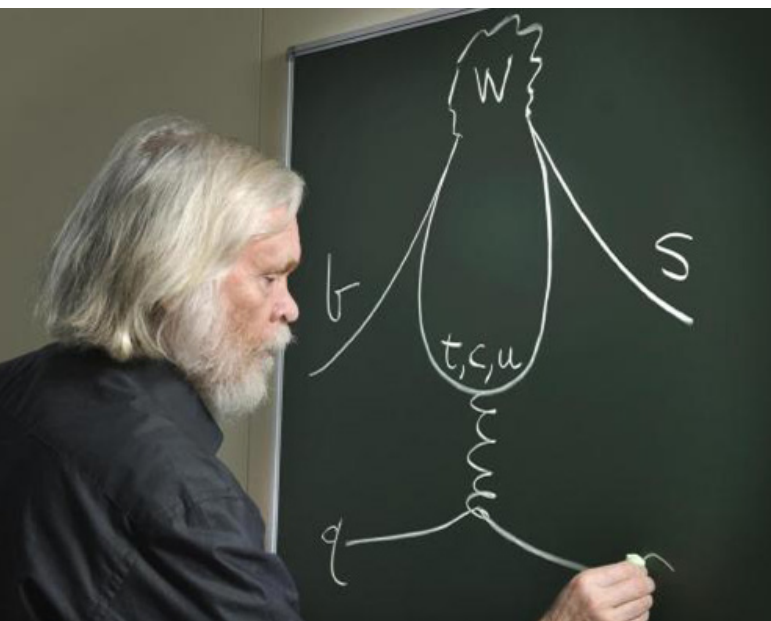
mathematical expression wrapped into and around, in a vague way, around the object.”⁴ That indistinct something born in a state of “active confusion,” in which you seek answers yet it’s all still rather tangled: objects, symbols, formulas. Visualization is, for Feynman, a vital part of the thinking process—it must be brought to light, made evident, and its representation can become part of one’s working method, can be understood and shared as long as consistency is maintained across the procedures and theories describing physical processes. Not all of physics, however, can be translated into diagrams, and in order to portray one’s thoughts clearly and correctly, to unravel the tangle, analysis is called for: “Ordinarily I try to get the pictures clearer, but in the end, the mathematics can take over and can be more efficient in communicating the idea than the picture.”⁵ That’s the only way it becomes possible to “deal directly with the solutions to the (Hamiltonian differential) equations rather than with these equations themselves”⁶; that’s the only way a graphic system can become both representation and calculation tool at the same time.

In the history of physics—and probably in the history of writing, too—Feynman diagrams occupy a special place. For many of today’s physicists, dashing off such doodles is a primary activity, a practice useful for outlining the issues before translating them into mathematical expressions, one that helps them quickly communicate ideas to colleagues; they’re a shortcut that

♥ Particolare della scultura realizzata da Edward Tufte per l'exhibit *All Possible Photons: The Conceptual and Cognitive Art of Feynman Diagrams*.

Detail of a sculpture Edward Tufte created for the exhibition *All Possible Photons: The Conceptual and Cognitive Art of Feynman Diagrams*.

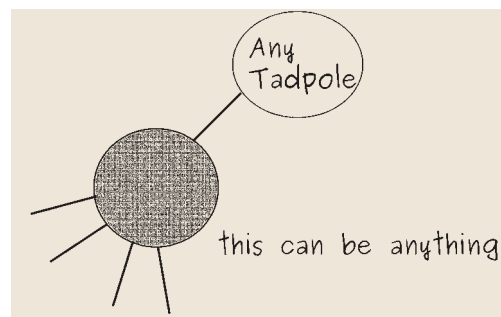




http://www.symmetrismagazine.org/article/june-2013/the-march-of-the-penguin-diagrams © 2013
Claudia Marcelloni • Claudia Marcelloni, CERN (http://www.claudiamarcelloni.com)

◀ I *penguin diagrams* di John Ellis rappresentano processi non inclusi nel Modello Standard, la teoria che descrive le interazioni tra le particelle elementari.

John Ellis' "penguin diagrams" represent processes not included in the Standard Model, the theory describing interactions between elementary particles.



una scorciatoia che evita l'ingombrante formalismo e i lunghi e complessi calcoli della teoria quantistica dei campi. Questa loro singolarità non si potrebbe comprendere se non si capisse quanto speciale è stato il loro autore: «la mente più originale della sua generazione» per Freeman Dyson; «il fisico teorico più creativo del suo tempo e un vero genio» secondo Sidney Drell, ex presidente della American Physical Society; uno che «ha toccato con la sua creatività unica quasi ogni campo della fisica». ⁷ I diagrammi sono il frutto della sua capacità di portare a sistema, di rendere universale, un modo personale di guardare, scomporre e ricostruire i meccanismi che regolano le interazioni tra le particelle elementari, un regalo per il quale i fisici non lo ringrazieranno mai abbastanza.

helps avoids the cumbersome formalism and long, complex calculations typical of quantum field theory. Their uniqueness cannot be understood without first understanding how special their author was: for Freeman Dyson he was "the most original mind of his generation"; according to Sidney Drell, former president of the American Physical Society, he was "the most creative theoretical physicist of his time and a true genius," someone who "has touched with his unique creativity just about every field of physics." ⁷ The diagrams are the result of his ability to systematize and universalize a highly personal way of looking, by disassembling and reconstructing the mechanisms that regulate interactions between elementary particles—a gift for which physicists will never be able to thank him enough.

▲ Il *tadpole diagram*, una parte di diagramma collegata al resto da una e una sola linea. Il termine *tadpole* venne coniato da Sydney Coleman nel 1977 e accettato dagli editor di «Physical Review» dopo aver rifiutato *lollypop* e *spermion* (Notes from Sidney Coleman's Physics 253a, arXiv:1110.5013).

The "tadpole diagram," part of a diagram connected to the rest by one sole line. The term *tadpole* was coined by Sydney Coleman in 1977 and accepted by the editors of *Physical Review* after they'd rejected *lollypop* and *spermion* (Notes from Sidney Coleman's Physics 253a, arXiv:1110.5013).

1. R.P. Feynman, *Space-Time Approach to Quantum Electrodynamics*, «Phys. Rev.», 76, 1949, pp. 769-789.
2. R.P. Feynman, *The Theory of Positrons*, «Phys. Rev.», 76, 1949, pp. 749-759.
3. *Ibid.*, p. 749.
4. S.S. Schweber, *Feynman and the visualization of space-time processes*, «Reviews of Modern Physics», 58, 1986, p. 504.
5. *Ibid.*, p. 505.
6. Feynman, *The Theory of Positrons*, cit., p. 749.
7. James Gleick, "Richard Feynman Dead at 69; Leading Theoretical Physicist," «The New York Times», 17 febbraio 1988.

LETTURE CONSIGLIATE

David Kaiser, *Drawing Theories Apart: The Dispersion of Feynman Diagrams in Postwar Physics*, University Of Chicago Press, Chicago, 2005.

1. R. P. Feynman, "Space-Time Approach to Quantum Electrodynamics," *Phys. Rev.* 76 (1949): 769-789.
2. R. P. Feynman, "The Theory of Positrons," *Phys. Rev.* 76 (1949): 749-759.
3. *Ibid.*, p. 749.
4. S. S. Schweber, "Feynman and the visualization of space-time processes," *Reviews of Modern Physics* 58 (1986): 504.
5. *Ibid.*, p. 505.
6. Feynman, "The Theory of Positrons," p. 749.
7. James Gleick, "Richard Feynman Dead at 69; Leading Theoretical Physicist," *The New York Times*, 17 February 1988.

FURTHER READING

David Kaiser, *Drawing Theories Apart: The Dispersion of Feynman Diagrams in Postwar Physics* (Chicago: University of Chicago Press, 2005).

➤ Diagramma tracciato da Frank Wilczek, premio Nobel per la fisica nel 2004, che rappresenta uno dei meccanismi principali di produzione e decadimento del bosone di Higgs (F. Wilczek, «Triumph, Window, Clue, and Inspiration», 2013).

Diagram outlined by Frank Wilczek, winner of the Nobel Prize in physics in 2004, representing one of the main production and decay mechanisms of the Higgs boson (F. Wilczek, "Triumph, Window, Clue, and Inspiration," 2013).

