

... Ma ecco, per finire in bellezza il discorso sulle formule, la formula per eccellenza, la madre di tutte le formule della fisica: $E = mc^2$. Tutti la conoscono, tutti sanno che stabilisce una corrispondenza tra massa ed energia, tutti la associano al nome di Einstein. Quello che pochi sanno è che sul significato di tale formula, e addirittura sul modo corretto di scriverla, i fisici (e non parliamo degli autori dei libri di testo) non sono affatto d'accordo. Massa ed energia sono equivalenti, questo è pacifico, ma... che cosa vuol dire? In che senso, esattamente, «si equivalgono»? Nel senso che dove c'è massa c'è, per ciò stesso, energia e dove c'è energia c'è, per ciò stesso, massa, oppure nel senso, completamente diverso, che la massa può scomparire dando luogo a energia e l'energia può scomparire dando luogo a massa? Ma l'energia non dovrebbe conservarsi? Il fotone possiede massa in quanto possiede energia, oppure possiede energia ma ha massa zero? Se compio lavoro su una particella aumentandone l'energia cinetica ho aumentato anche la sua massa, oppure ho aumentato l'energia ma la massa è rimasta uguale? Nel primo caso la massa cresce con la velocità, ed è il concetto di 'massa relativistica'. Nel secondo caso la massa relativistica non esiste, esiste la massa e basta, la massa è un'invariante relativistica: nei diversi sistemi di riferimento una particella ha diversa velocità e diversa energia ma la massa è la stessa.

Anni fa (giugno 1989) è apparso sulla rivista *Physics today*, a firma Lev B. Okun, un fisico russo che si occupa di fisica delle particelle, un articolo che avrebbe voluto fare luce definitiva sul significato della formula di Einstein: fu, in linea di massima, molto apprezzato (è spesso citato nei manuali specializzati), ma non raccolse solo consensi. Mi sembra istruttivo ricordare l'episodio, è probabilmente il miglior esempio possibile di controversia scientifica moderna (quanto meno, nel campo della fisica).

Okun aveva condotto un sondaggio presso i colleghi fisici proponendo quattro possibili versioni della formula di Einstein:

$$(1) E_0 = mc^2 \quad (2) E = mc^2$$

$$(3) E_0 = m_0c^2 \quad (4) E = m_0c^2$$

e ponendo due domande. La prima: «Quale di queste equazioni consegue più razionalmente dalla relatività ristretta ed esprime una delle sue principali conseguenze e previsioni?». La seconda: «Quale di queste equazioni fu originariamente scritta da Einstein e fu da lui considerata una conseguenza delle relatività ristretta?».

La maggior parte dei fisici rispose scegliendo l'equazione (2) o la (3). La (2) stabilisce che non ci può essere energia senza che ci sia anche massa, perciò al crescere dell'energia cinetica (al crescere della velocità) cresce anche la massa; in particolare, i fotoni – le particelle di cui è fatta la luce e tutta la radiazione elettromagnetica – se hanno energia E hanno massa E/c^2 . La (3) stabilisce che esiste una massa di quiete (simbolo m_0), e ribadisce quindi l'idea di massa dipendente dalla velocità.

Tutto sbagliato, scrive Okun: questa terminologia (che è poi quella della stragrande maggioranza dei testi scolastici e appare, benché saltuariamente, anche nel linguaggio di alcuni grandi della fisica – vedi Landau e Feynman – quando si rivolgono a non specialisti) ha avuto qualche ragione d'essere all'inizio del secolo scorso, oggi invece appare arcaica e non è più razionalmente giustificabile. Termini come 'massa relativistica' e 'massa di quiete' sono fuorvianti, il simbolo m_0 è da proscrivere: c'è una sola massa in fisica, m , che non dipende dal sistema di riferimento (dalla velocità). Delle quattro formulazioni proposte, quella giusta è la prima, $E_0 = mc^2$: la massa di un oggetto è una misura della sua 'energia di

quiete', l'energia E_0 che l'oggetto possiede quando è fermo. Massa ed energia di quiete sono nomi diversi per designare la stessa cosa. Quanto al fotone, la cui velocità è c in qualsiasi riferimento inerziale, non ha mai velocità zero, perciò non possiede energia di quiete e non possiede massa.

Segue nell'articolo, a supporto di tali affermazioni, una magistrale trattazione della questione. E non manca un cenno alle resistenze che il mondo della scuola e dell'editoria scolastica continua ad opporre al superamento dell'idea, così popolare e suggestiva, di massa che cresce con la velocità^[1].

Ma resistenze arrivarono anche dal mondo scientifico. Nello stesso numero di *Physics today* compaiono alcune lettere di commento all'articolo di Okun. Quasi tutte approvano limitandosi a qualche osservazione e a qualche suggerimento: un fisico della Stetson University, per esempio, dice che se scriviamo, come Okun raccomanda, $E_0 = mc^2$ si corre il rischio di perpetuare l'equivoco sulla massa, perché, considerato che E_0 è l'energia di quiete, m potrebbe essere a sua volta interpretata dallo studente come massa di quiete; e propone di scrivere $E = \gamma mc^2$ (dove $\gamma = 1/\sqrt{1 - v^2/c^2}$), evidenziando così in modo più completo e più chiaro il legame relativistico tra massa ed energia (l'energia cresce con la velocità, fermo restando il valore della massa).

Un fisico dell'università del Texas, W. Rindler, autore di testi specialistici sulla relatività, scrive invece un commento stizzito. «Sono turbato dal danno che la 'tirata' di Okun contro l'idea di massa relativistica potrebbe fare a chi impara la relatività... qualcuno potrebbe pensare che ci siano, in relatività, difficoltà logiche non risolte, o che scrivendo $m = \gamma m_0$ si commette un errore, mentre tutto si riduce a una questione di terminologia... Si potrebbe forse desiderare che tutti usino il termine 'massa' con lo stesso significato... io non ho mai percepito questo come un problema, perché il contesto mi dice a che cosa l'autore si riferisce... i fisici delle particelle, che sono oggi quelli che maggiormente usano la relatività ristretta, mi dicono che d'ora innanzi io devo usare il simbolo m per la massa a riposo e devo chiamarla 'massa', e va bene... ma io mi rifiuto di smettere di usare il concetto di massa relativistica». La parte finale della lettera è divertente: «Conosco un tale», scrive Rindler, «che riesce a guidare un'automobile senza usare la frizione; e nel '39 è stato pubblicato un romanzo di 50 000 parole nel quale non compare mai la lettera e . Certo, queste prodezze si possono fare... ma a che pro? A me piace usare la frizione, la lettera e e la massa relativistica. Per me, $m = \gamma m_0$ è un utile concetto euristico... la formula $E = mc^2$ mi ricorda che l'energia ha, come la massa, inerzia e gravità, e mi dice in che modo l'energia varia con la velocità».

Replica di Okun: «Insisto, gli autori che nei testi usano la relazione $m = \gamma m_0$ commettono in effetti un errore di fisica perché usano una terminologia fuorviante e non chiara... io apprezzo che Rindler dica "si potrebbe forse desiderare che tutti usino il termine massa nello

¹ Okun era stato invitato a far parte di una commissione ministeriale che doveva stabilire quale fosse il miglior testo di fisica per la scuola secondaria. Rimase 'scioccato' nel constatare che tutti i testi proponevano l'idea di massa che cresce con la velocità, ma più 'scioccato' nel vedere che tutti i colleghi di commissione – docenti e specialisti nella didattica della fisica – ignoravano la formulazione $E_0 = mc^2$. Spiegò allora la questione, e qualcuno della commissione gli suggerì di scrivere su tale argomento un articolo per la rivista *Physics in the school*. Okun prese quindi contatto con la rivista chiedendo se erano disponibili alla pubblicazione di tale articolo. Tre mesi più tardi ebbe la risposta: il comitato di redazione non accettava un articolo in cui la relazione massa-energia non fosse data nella forma $E = mc^2$.

stesso senso”, e che sia pronto a usare il simbolo m per la massa di quiete e a chiamarla ‘massa’... ma le equazioni $m = \gamma m_0$ e $E = mc^2$ impediscono un uso uniforme del termine ‘massa’... e per inciso a me sembra che la $E = \gamma mc^2$ mostri in che modo l’energia varia con la velocità meglio della $E = mc^2$. Quanto al fatto che usare m in diversi sensi non sia mai stato un problema per Rindler, sarebbe stranissimo se così non fosse: Rindler è un esperto di relatività, non uno studente!».

Poi è spiritoso anche Okun: «La massa relativistica è cara al cuore di Rindler, non usarla è per lui come guidare senza frizione o scrivere un romanzo senza usare la lettera e . Ma la maggior parte delle importanti riviste di fisica... non usano la massa relativistica... questo termine non compare in nessun testo specialistico di fisica delle particelle... sono tutte macchine senza frizione? Per me, i testi di fisica che usano la lettera m con diversi significati sono come un romanzo in cui m sta per e , m , $n...$ », ecc. ecc. La conclusione di Okun è realistica: «Io non penso che dovremmo sforzarci di eliminare $E = mc^2$ da T-shirts, distintivi e francobolli. Ma nei libri di testo dovrebbe comparire solo come un oggetto che appartiene alla storia, con una spiegazione delle sue remote origini».

Tutto questo, vent’anni fa. E oggi? Per quanto ne so, non è cambiato granché, i libri di testo continuano imperterriti, nella stragrande maggioranza, con la massa relativistica. Ma il tempo non passa mai invano: al lettore che volesse affrontare l’argomento su basi moderne suggerisco il bellissimo saggio *Insegnare relatività nel XXI secolo* di Elio Fabri^[2]. Anticipo qui che, più che un errore concettuale, Fabri considera la massa relativistica un errore didattico, un’idea non solo inutile ma pericolosa per i pasticci, le difficoltà, le incongruenze logiche a cui può condurre (e a cui, di fatto, puntualmente conduce).

(continua)

² Supplemento (‘Quaderno 16’) al n.1 della rivista *La Fisica nella Scuola*, gennaio-marzo 2005. Una versione PDF si può trovare in <http://www.df.unipi.it/~fabri/sagredo/Q16>.