

La candela

Ripercorrendo le ultime puntate di questa “Candela,” mi sono accorto che è davvero parecchio tempo che non parlo di fisica in senso stretto. È vero che fin dall’inizio mi ero impegnato a non fare lezioni di fisica, o propaganda alla fisica; ma questo non significa che la fisica debba essere bandita dai nostri discorsi. . . Perciò questa puntata è dedicata a un esperimento ambizioso: niente meno, spiegare che cosa sono i buchi neri.

In realtà è quasi certo che la puntata non basterà, e al tempo stesso avremo occasione di affrontare un tema che va al di là del ristretto campo della fisica: che cosa può significare, e se sia davvero possibile, fare divulgazione scientifica seria.

Ho scelto i buchi neri perché mi sembrano un argomento che presenta diverse caratteristiche interessanti:

- a) è sicuramente un argomento di frontiera, astruso e astratto quanto basta
- b) se ne parla molto, e ha un indubbio fascino, specie per i ragazzi
- c) si presta molto bene a illustrare le difficoltà di una trasmissione scientifica verso non specialisti
- d) non può essere affrontato senza allargare il discorso, offrendo così l’occasione per rivedere idee e concetti fondamentali della relatività (ristretta e generale).

Spero di non aver spaventato i miei lettori con queste premesse, e soprattutto di non averli indotti a saltare all’articolo che segue. . . In effetti l’esperimento (o forse la scommessa con me stesso) sta proprio nel cercare di evitare questa fuga. Mi saprete dire voi se ci sarò riuscito.

* * *

È necessario iniziare con un brevissimo cenno ad alcuni risultati che fanno parte della cosiddetta “relatività ristretta”: quella fondata da Einstein nel 1905. Il più importante è certamente il *Principio di Relatività* (PR), che possiamo enunciare sommariamente come segue:

nessun esperimento o fenomeno permette di distinguere un riferimento inerziale da qualunque altro

ovvero:

tutti i riferimenti inerziali sono fisicamente equivalenti.

L’enunciato del PR richiede alcuni commenti di vario genere. Il primo è che la sua prima formulazione risale a Galileo (*Massimi Sistemi*, 1632) col famoso brano che inizia

Riserratevi con qualche amico nella maggiore stanza che sia sotto coverta di alcun gran navilio . . .

A proposito di questo brano, che mi permetto di definire (e non sono il solo) uno dei lasciti immortali della letteratura italiana, apro una piccola divagazione. Molte volte, quando mi capita di parlare a studenti su questi argomenti, prendo una citazione da un testo di relatività di autori americani, dove si legge:

Gli scritti di Galileo, come quelli di Dante, a motivo della loro forza e intelligenza sono tesori del pensiero umano, studiati oggigiorno in Italia dagli studenti delle scuole secondarie come parte di una grande eredità letteraria.

La mia citazione è in realtà un'amara ironia, perché non credo affatto che quanto dicono quegli autori corrisponda alla realtà delle nostre scuole. Sarebbe giusto che lo fosse, perché il riconoscimento del PR ha un enorme valore culturale, ben al di là della fisica, e giustamente è considerato uno dei grandi contributi di Galileo al pensiero moderno. Ma trattandosi di argomento scientifico, ben di rado trova spazio nella cosiddetta "cultura" . . .

Sempre sullo stesso tema vorrei aggiungere un'altra considerazione. La recente riforma "epocale" della scuola secondaria superiore comporterà di certo una revisione dei contenuti di parecchi insegnamenti, non foss'altro per la banale ragione che ci sono stati cambiamenti significativi (in più o in meno) nel monte ore disponibile per ciascuna materia. Per quanto riguarda la fisica, occorrerebbe che da un'adeguata discussione (e non da pronunciamenti ministeriali o dalle scelte degli editori) uscissero dei contenuti irrinunciabili, da salvare in ogni caso. Ebbene, io vedrei appunto il PR come uno di questi.

Restando sul PR ci sono ancora almeno due cose da dire. Una è per così dire "tecnica": che cosa s'intende per "riferimento inerziale"? In primo luogo, c'è un'abbreviazione mia personale: preferisco dire "riferimento" invece del più comune "sistema di riferimento," non tanto per brevità quanto per togliere di mezzo la parola "sistema" che in fisica ha troppi usi diversi. Quanto al significato di "riferimento" me la cavo velocemente: leggetelo come sinonimo di "laboratorio." Poi bisognerebbe chiarire il termine "inerziale," che richiederebbe una lunga discussione, se quello che state leggendo fosse non un piccolo articolo, ma un capitolo di un libro divulgativo "come si deve." Date le condizioni, mi limito a dire che un riferimento è detto inerziale quando in esso vale la legge d'inerzia: *un corpo non soggetto a forze si muove di moto rettilineo uniforme.*

Prima di lasciare il PR occorre chiarire un'altra cosa: perché ho detto che esso è il più importante contributo di Einstein nel 1905, per poi aggiungere poco dopo che in realtà era già stato enunciato da Galileo nel 1632? La risposta è che entrambe le affermazioni sono vere, ma cambia profondamente il contesto. Quando Galileo scrive quel celebre brano, la fisica sta nascendo, tanto che non ha ancora un nome specifico: fa parte della "filosofia naturale." Tanto meno sono stati delimitati i campi classici che sapete: meccanica, termodinamica, ottica, elettromagnetismo. . . In sostanza Galileo si serve del PR per spiegare come

mai il moto della Terra attorno al Sole e la sua rotazione diurna possano restarci inavvertibili; contrastando con ciò uno dei più forti argomenti che venivano portati contro il sistema copernicano.

Quasi tre secoli dopo, al tempo di Einstein, la fisica ha già avuto un grande sviluppo; si è differenziata in diversi settori d'indagine; in particolare esistono da un lato la meccanica di Newton (già vecchia di oltre due secoli) dall'altro la nuovissima teoria elettromagnetica di Maxwell, che ha portato alla previsione e alla scoperta delle onde elettromagnetiche. In questo contesto, mentre il PR è pacificamente accettato nell'ambito della meccanica, appare problematica, per non dire impossibile, la sua validità nel campo elettromagnetico: se le onde elettromagnetiche viaggiano a velocità c , questo potrà essere vero rispetto a un certo riferimento inerziale, quello in quiete rispetto all'*etere*; ma la velocità risulterà diversa se misurata da un riferimento diverso.

Einstein ha il coraggio di sconvolgere questo tranquillo punto di vista, enunciando appunto il PR (e dandogli per la prima volta questo nome) come *legge universale della fisica*. Un corollario è che la velocità della luce nel vuoto dovrà comunque essere c , misurata da *qualsiasi riferimento inerziale*. Il che comporta tra l'altro la *scomparsa dell'etere*.

Dato che questo non è un libro, anche se divulgativo, qui debbo fermarmi; rinunciando da un lato a motivare la scelta di Einstein, dall'altro a esaminare le conseguenze apparentemente paradossali di questa scelta. Posso — anzi debbo — citarne soltanto una: non solo il PR decreta la scomparsa dello spazio assoluto (insieme alla quiete e al moto assoluto) ma obbliga a riconoscere *carattere relativo anche al tempo*. Questo va brevemente spiegato, perché sarà uno dei pilastri della costruzione successiva.

* * *

C'è anche un altro motivo per cui debbo un pochino soffermarmi sul carattere relativo del tempo, ed è che su questo punto esiste in giro molta confusione, aggravata da tanti libri divulgativi e in parte incoraggiata anche da testi che dovrebbero essere approfonditi. Vediamo dunque di chiarire, anche se solo per sommi capi.

Primo: non l'ho detto sopra, ma nella definizione di riferimento è incluso che il laboratorio sia dotato di una serie di strumenti di misura; tra questi sono ora importanti gli *orologi*, che dobbiamo assumere siano quanti ne vogliamo e disposti in ogni punto interessante del laboratorio. Inoltre tutti questi orologi dovranno essere *concordi* e *sincronizzati*. Dicendo “concordi” intendo che marciano alla stessa velocità: nessuno va avanti o indietro rispetto agli altri. “Sincronizzati” è un concetto assai più delicato, e purtroppo debbo tralasciarne un'adeguata discussione. Intuitivamente si vorrebbe dire che a ogni istante segnano tutti lo stesso tempo, ma se si va a grattare quest'idea intuitiva si scoprono questioni profonde, che fu proprio Einstein a vedere per primo in modo chiaro. Sta di fatto che occorre definire una *procedura di sincronizzazione*, e Einstein propone

che allo scopo vengano usati dei segnali luminosi. Questo proprio in base alla proprietà peculiare della luce, di viaggiare sempre a una precisa velocità. E non aggiungo altro...

Occorre ora introdurre un altro concetto cruciale della relatività: quello di *evento*. Brevemente, si usa chiamare “evento” un fenomeno ben localizzato nello spazio e nel tempo, che si possa quindi assumere, come schematizzazione limite, che avvenga in un dato *punto dello spazio* e a un dato *istante di tempo*. Quanto stretta debba essere questa localizzazione, dipende dal campo di fenomeni che si studiano. In certi casi considereremo come evento il decadimento di una particella; in altri l’esplosione di una supernova o magari la caduta dell’asteroide che causò l’estinzione dei dinosauri. Anche la nascita di Einstein è un evento (un “lieto evento,” in questo caso).

Una volta scelto il riferimento in cui lavorare, un evento verrà appunto caratterizzato da un punto dello spazio e da un istante di tempo (letto sull’orologio che si trova nell’immediata prossimità dell’evento). Dato che un punto dello spazio può essere individuato assegnando le sue *coordinate*, che sono tre numeri reali (tanti quante le dimensioni dello spazio), e dato che l’istante di tempo è individuato dal numero che si legge sull’orologio, ecco che a un evento si associano *quattro* coordinate: tre spaziali e una temporale. Finché si resta nella relatività ristretta è del tutto naturale che le coordinate spaziali siano le consuete coordinate cartesiane x, y, z definite da una terna di assi preventivamente scelti e realizzati da opportuni strumenti di misura del laboratorio; nell’insieme quindi ogni evento avrà come coordinate la quaterna di numeri (x, y, z, t) .

Ora siamo in grado di spiegare che cosa significa che il tempo è relativo. Cominciamo osservando che l’associazione delle 4 coordinate a un evento ha richiesto che venisse scelto un certo riferimento, nel quale abbiamo introdotto coordinate spaziali e orologi. Ma avremmo potuto scegliere un riferimento diverso, e descrivere da questo diverso riferimento *lo stesso evento*. Una parentesi: con ciò stiamo usando un’idea che non avevo esplicitata prima: che gli eventi hanno carattere *obiettivo*, avvengono cioè in modo indipendente dalla descrizione che noi possiamo darne, e in particolare dalla scelta del riferimento. Una supernova esplose: questo è un fatto in sé (un evento obiettivo, appunto) mentre la descrizione che ne possono dare i fisici dipende dagli strumenti che usano, e in particolare dal laboratorio in cui si trovano a operare: qui sulla Terra? in una stazione spaziale su Marte? in un’astronave in viaggio verso Proxima Centauri?

Va osservato che questo fatto, che da un lato ci sono eventi obiettivi e dall’altro ci sono le loro descrizioni, in particolare le loro coordinate, non era certo ignoto ai fisici prima di Einstein, anche se non veniva considerato un aspetto così fondamentale della fisica. Ma su un punto c’era un accordo unanime dopo Newton: questa diversità di descrizioni *non riguardava il tempo*. Comunque scelto il riferimento, si riteneva possibile sincronizzare tutti gli orologi, anche

di riferimenti diversi, in modo che essi assegnassero lo stesso tempo a un dato evento (a ciascun evento). Detto in una parola, si assumeva che il tempo avesse carattere *assoluto*. Newton scrive nei *Principia*:

[il tempo] *in sé e per sua natura, senza relazione ad alcunché di esterno, scorre uniformemente.*

Einstein dimostra che dal PR e dalla conseguente invarianza della velocità della luce segue che invece il tempo è *relativo*. Vediamo un po' meglio. Ho detto sopra che scelto un riferimento, a ogni evento si associano le 4 coordinate (x, y, z, t) . Se cambio il riferimento, non è certo strano che tali coordinate riescano diverse; o meglio. . . Per quanto riguarda le coordinate spaziali la cosa è pacifica: se stappo una bottiglia di acqua minerale (evento) mentre sto seduto su un treno in moto, questo evento avrà delle coordinate spaziali rispetto al treno, generalmente diverse da quelle che avrà se riferito alla stazione. Molto meno ovvio che questo sia anche vero per la coordinata t .

Più esattamente, ciò che si scopre è che *la simultaneità di due eventi è relativa*: se io e il mio compagno di viaggio stappiamo *insieme* le nostre bottiglie, questi due eventi saranno simultanei nel riferimento del treno, ma non lo saranno nel riferimento della stazione. Se non ce ne accorgiamo, la ragione è che nelle condizioni dette, e in tutte quelle della vita pratica e di molta attività scientifica, la differenza è inapprezzabile: microsecondi o anche molto meno.

Ma c'è un'altra conseguenza, che ha fatto discutere tantissimo e ancor oggi riesce indigesta a molti, sebbene tutti i libri divulgativi ci si dedichino con impegno. Si tratta di questo: io stappo la bottiglia (evento A) e dopo un po' la richiudo (evento B); tra i due eventi trascorrerà un certo tempo, poniamo 20 secondi. Riferiamo ora gli stessi eventi alla stazione: è ovvio che essi avvengono in punti diversi, perché nel tempo trascorso il treno ha fatto un po' di strada, poniamo 600 metri. Ma se andiamo a leggere gli orologi (sincronizzati, ricordate!) che troviamo vicini alle posizioni in cui avvengono A e B, vediamo che l'intervallo che segnano è *maggiore* di 20 secondi. Beh, bisogna essere onesti: coi dati che ho scelto troveremmo 20.0000000000001 (dodici zeri dopo il punto) ossia una differenza di 0.1 picosecondi. Non deve quindi meravigliare che nessuno se ne fosse accorto. . .

A parte la piccolezza dell'effetto, che dipende dalla modesta velocità del treno e che può diventare misurabile o lavorando con velocità assai maggiori o disponendo di strumenti di misura (orologi) sufficientemente sofisticati, stiamo parlando di quella che di solito viene chiamata "dilatazione del tempo." Espressione che a me riesce alquanto indigesta, specie quando viene commentata con frasi come la seguente: "un orologio in moto rallenta" oppure "per un corpo in moto il tempo scorre più lentamente." Il solo e unico significato di questa fantomatica "dilatazione" è quello che ho descritto sopra: se misuriamo l'intervallo di tempo tra due eventi A e B, la misura nel riferimento in cui i due eventi

avvengono nello stesso luogo (riferimento di quiete) riesce *più breve* di quella in qualsiasi altro riferimento, nel quale i due eventi accadono in luoghi diversi.

* * *

Quanto ho detto fin qui lo trovate tutto nel famoso articolo di Einstein del 1905. Il passo successivo (e decisivo per gli sviluppi che verranno) lo fa Minkowski nel 1908: visto che un evento ha 4 coordinate, e che nel passaggio da un riferimento all'altro tutte e quattro si trasformano, risulta utile e più semplice dal punto di vista matematico vedere le 4 coordinate (tre spaziali, una temporale) come coordinate di un punto in uno "spazio" a 4 dimensioni, che unifica lo spazio e il tempo della fisica newtoniana: lo *spazio-tempo*. Gli eventi non sono che *punti nello spazio-tempo*.

Minkowski in realtà va anche oltre: si spinge ad affermare che lo spazio-tempo è l'unica realtà fisicamente significativa, visto che la separazione in spazio e tempo non ha carattere assoluto, ma è relativa al particolare riferimento adottato. Scrive:

Da questo momento lo spazio di per sé e il tempo di per sé svaniscono come semplici ombre, e solo una specie di fusione dei due esiste a pieno titolo.

Ancora: il moto di un corpo si descrive mediante le successive posizioni spaziali che esso occupa a successivi istanti di tempo. Abbiamo così una successione di eventi (posizioni-istanti) che nel loro insieme formano una *linea*: quella che prende il nome di "linea oraria" o "linea d'universo." Le linee orarie rappresentano per così dire in un sol colpo tutta la *storia* dei corpi.

Non è male notare che le linee orarie non sono una novità: il loro uso era già comune prima della relatività, e in effetti tutti i testi scolastici di fisica ne riportano molte, per rappresentare in un diagramma cartesiano la posizione di un corpo in funzione del tempo. Ma la differenza è d'interpretazione: nella visione prerelativistica un diagramma orario è solo il grafico di una funzione, della posizione che varia nel tempo. Spazio e tempo sono grandezze fisicamente disomogenee, per cui quei diagrammi sono del tutto simili a quelli che si possono fare per infiniti altri casi:

- nella scarica di un condensatore, per la variazione della d.d.p. col tempo
- per la crescita di una popolazione batterica
- per l'andamento di una reazione chimica: concentrazione del prodotto in funzione del tempo
- per il tasso di cambio euro-dollaro
- per l'altezza di un bambino con l'età

eccetera eccetera. . .

Invece nella concezione di Minkowski le linee orarie acquistano un significato e un peso molto maggiori. Intanto perché non si sviluppano nel piano cartesiano dei comuni grafici, ma nello spazio-tempo con le sue 4 dimensioni. Ma soprattutto perché descrivono, come ho già detto, l'intera storia dei corpi, vista *sub*

specie æternitatis, ossia tutta in un sol colpo, tutta insieme: passato, presente e futuro. Per questa ragione i grafici spazio-tempo e le linee orarie sono strumenti fondamentali per la comprensione della relatività (anche quella generale, come vedremo).

C'è purtroppo una difficoltà alla quale non si può sfuggire, ma che può solo essere attenuata con espedienti diversi, e che nasce dal carattere 4-dimensionale dello spazio-tempo. Noi siamo abituati a leggere e scrivere in due dimensioni: su fogli di carta, sugli schermi dei computer. . . Già la rappresentazione su questi mezzi di oggetti tridimensionali pone dei problemi, e sappiamo bene come la storia della pittura abbia dovuto affrontarli nei secoli e nelle diverse culture. La scoperta della prospettiva nel '400 ha segnato un punto di svolta, ma non bisogna dimenticare che accanto all'opera di grandi artisti-scienziati come Piero della Francesca o Leonardo da Vinci si doveva anche costruire nel pubblico una capacità di *leggere* quelle rappresentazioni. Ormai, da quando la fotografia si è diffusa sulla stampa, e poi con la diffusione del cinema e della televisione, può sembrare che questa capacità sia un fatto acquisito, almeno nella gran parte dei cittadini dei Paesi più sviluppati. Ma forse le cose non sono così semplici, e vale la pena di ragionarci un po' sopra.

È mia opinione, suffragata dall'esperienza anche con studenti universitari, che la capacità di leggere la rappresentazione sul foglio di un oggetto o di una struttura tridimensionale non sia da dare per scontata; e che questo possa costituire un ostacolo didattico non secondario nell'insegnamento scientifico (penso soprattutto alla fisica, ma non solo). Va poi considerato che accanto alla capacità di leggere si rende necessaria anche quella complementare: di saper rappresentare le tre dimensioni, per comunicare ad altri. È vero che oggi sono disponibili software sofisticati, che fanno tutto al posto nostro (così come i calcolatorini dovrebbero rimpiazzare la nostra conoscenza, sempre più scarsa, delle manipolazioni aritmetiche elementari); ma non sempre abbiamo a disposizione il software quando servirebbe, per cui saper fare uno schizzo, un semplice disegno, per illustrare un'idea, un ragionamento, una situazione sperimentale, mi sembra sia una capacità da richiedere agli studenti prima del termine della secondaria superiore. Quanto ci si pensa? In che misura si realizza un tale obiettivo? A voi l'ardua sentenza. . .

* * *

Quali sono le vie d'uscita dalla difficoltà di base, derivante dal carattere 4-dimensionale dello spazio-tempo? Sono diverse, anche in funzione degli scopi che ci si propone e del pubblico cui ci si rivolge. Una soluzione estrema, prediletta soprattutto dai matematici in ambito strettamente scientifico, è di *fare del tutto a meno di figure*. Ci si muove in una direzione iniziata secoli fa, e basata sull'innovazione di Cartesio: la *geometria analitica*. Tutti gli enti geometrici, in qualunque tipo di spazio, ammettono una rappresentazione "in formule": vale per punti, rette, curve, superfici qualsiasi. Il grande vantaggio dell'approccio

analitico è che non pone limiti: né al numero di dimensioni dello spazio, né alla sua natura geometrica (euclideo o no, finito o infinito, variamente connesso . . .) né al carattere degli oggetti di cui si vuole trattare: curve, superfici, ipersuperfici, loro intersezioni, tracce, involucri. . . Tutto è possibile, ma si paga un prezzo: la comprensione *intuitiva* di ciò che si sta facendo è possibile solo a patto di possedere un allenamento, altamente specializzato, a “vedere” con gli occhi della mente cose che non hanno alcun corrispettivo nell’intuizione comune.

Il matematico vi dirà che questo è il bello; anzi, che questo è il solo modo per capire la natura di certi oggetti matematici. Se volete conoscere la mia opinione, sono d’accordo; ma non ci possiamo nascondere che così rimane aperta la difficoltà di avvicinare a certe idee chi non possiede quell’allenamento. Qui le opinioni si dividono: c’è chi ritiene che se le cose stanno così, è inutile cercare di addolcire la pillola; che la difficoltà è intrinseca al problema, e non ci sono vie d’uscita che non siano in un modo o nell’altro ingannevoli. C’è invece chi (e sono praticamente tutti quelli che si cimentano con la divulgazione delle idee della fisica, almeno quelle dell’ultimo secolo) ritiene possibile far passare “qualche idea” al prezzo di semplificare, ricorrere ad analogie, a figure che suggeriscono più che spiegare. . .

Come dite? Qual è la mia posizione? Vi chiedo un po’ di pazienza: la potrete ricavare da tutto il discorso che sto facendo, e caso mai la riassumeremo quando saremo arrivati in fondo.

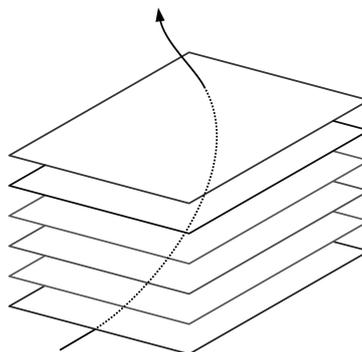
Ma supponiamo pure che il nostro lettore sia abbastanza allenato, e che quindi non ci siano difficoltà a comprendere e rappresentare oggetti e diagrammi tridimensionali, usando la prospettiva o più comunemente l’assonometria (se la distinzione non vi è chiara dal punto di vista tecnico, me ne dispiace, ma non posso aprire un’altra divagazione. . .). Resta la difficoltà più profonda: che lo spazio-tempo di dimensioni *ne ha quattro*.

Le altre soluzioni possibili si riducono tutte a fare a meno di (sottintendere) una o più delle dimensioni spaziali. Molto spesso se ne tolgono due, riducendosi quindi a due dimensioni in tutto: il tempo t e una direzione spaziale che chiameremo x . Allora non avremo difficoltà nel tracciare le figure, che saranno semplici *diagrammi spazio-tempo* (x, t) . Ne ho già parlato sopra, ma ora debbo chiarire che non sarà necessario limitarsi alla linea oraria di un qualche moto: potremo anche rappresentare situazioni più complicate, come per esempio i famosi gemelli su due diverse astronavi, che si scambiano segnali via radio. . . Non vi presento la figura perché non ci servirebbe a niente, mentre è meglio riflettere sul significato di questa “eliminazione” di due delle tre dimensioni spaziali.

Stiamo forse proponendo un gioco di fantasia, una specie di “Flatland” spazio-temporale? Non proprio: si tratta invece di una delle tante schematizzazioni cui sono abituati i fisici: quando una parte della realtà non ha alcun ruolo nel fenomeno che stiamo studiando, possiamo cancellarla dalle nostre rappresentazioni, col vantaggio di semplificarle (in questo caso, il vantaggio è di

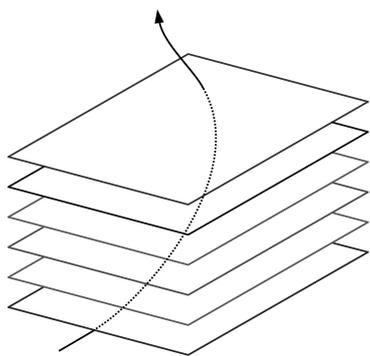
poter fare il disegno su un normale foglio). Come ho accennato, il campo di situazioni che si lasciano schematizzare in questo modo è sufficientemente vasto perché l'eliminazione di due dimensioni spaziali ci lasci . . . spazio per fruttuosi ragionamenti.

Ci sono però situazioni sperimentali in cui una sola dimensione spaziale non basta: ce ne vogliono almeno due. Niente paura: la tecnica per rappresentare tre dimensioni su un supporto bidimensionale è ormai antica e consolidata, per cui non dobbiamo inventare niente. Potremo servirci ad es. dell'*assonometria*. Un esempio potete vederlo qui accanto, dove il tempo è disposto in senso verticale, i diversi piani paralleli sono "sezioni spaziali" dello spazio-tempo, fatte a diversi t , e la curva che attraversa i piani è la linea oraria di un corpo (la sua storia) le cui intersezioni con ciascun piano indicano la posizione che il corpo occupa a quel valore del tempo t . Il fatto che i piani rappresentino delle sezioni spaziali, sta appunto a indicare la perdita di una dimensione: lo spazio tridimensionale è qui ridotto a un più modesto piano bidimensionale.



In verità di piani ce ne sono parecchi (in teoria infiniti): ciò sta forse a significare che abbiamo infiniti spazi? Sicuramente no, dato che i diversi piani non sono altro che rappresentazioni di come si presenta lo spazio (unico) se fotografato a tempi diversi. Per es. nella figura è tracciata una linea oraria, che interseca i diversi piani in punti differenti: ciò indica che il corpo cui si riferisce quella linea oraria *si sta muovendo*. Niente di più.

Qui appresso vedete una seconda figura, nella quale è disegnato un solo piano, per non pasticciare troppo il disegno. Poi vedete una particolare curva: un'*elica*. Che cosa significa questo? Se proiettate la curva sul piano indicato come "spazio," ottenete una *circonferenza* (tratteggiata nella figura): dunque il



a *traiettoria circolare*. Mentre il corpo si muove il tempo passa, e quindi gli eventi che rappresentano le posizioni del corpo e i tempi ai quali queste posizioni vengono raggiunte si spostano verso l'alto: il fatto che il passo dell'*elica* sia costante indica che il tempo impiegato a fare un giro è sempre lo stesso, ossia che il moto è *uniforme*. Quella rappresentata è dunque la linea oraria di un corpo in *moto circolare uniforme*; potrebbe essere il moto della Terra intorno al Sole, se potessimo trascurarne l'eccentricità.

* * *

Tornando al discorso principale, siamo arrivati allo spazio-tempo di Minkowski, coi suoi punti che sono eventi e le linee orarie che rappresentano la storia dei corpi. Per completare la descrizione della relatività ristretta (alcuni preferiscono dire “speciale,” ma Einstein diceva “beschränkte,” che significa appunto “ristretta”) manca ancora un’altra idea di Minkowski: quella di una “metrica” (in termini imprecisi potremmo dire una “distanza”) definita tra punti dello spazio-tempo.

Poi dovrei spiegare perché “ristretta”... In termini un po’ semplicistici questo è facile: è ristretta in contrapposizione alla versione successiva che Einstein chiamò “generale.” Ma ristretta o generale da che punto di vista? È un po’ più lungo da spiegare, mentre il *mio* spazio e il *mio* tempo per questa volta sono finiti, come avevo temuto. La strada per i buchi neri è ancora lunghetta, per cui vi do appuntamento alla prossima volta.