

TRE SASSOLINI ELEMENTARI DI OTTICA GEOMETRICA.

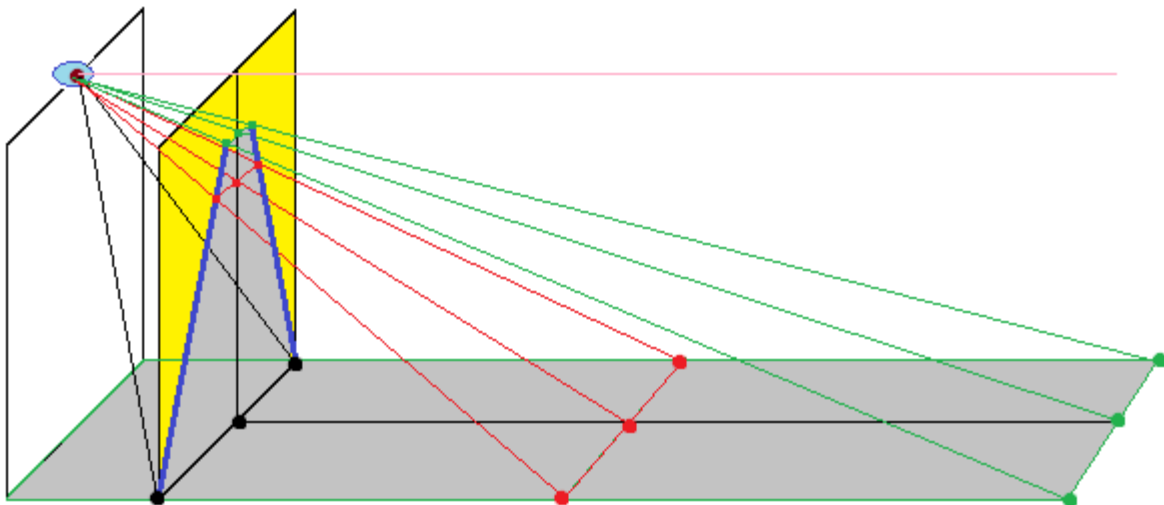
Mi vergogno quasi ad affermare che i tre sassolini che seguono mi tormentarono a lungo, e l'ultimo, addirittura, me lo sono tolto dalla scarpa solo oggi, 5 dicembre 2017, *dies albo signanda lapillo*. Nondimeno ho notato che persone anche colte, confrontate con uno dei tre problemi, possono trovarsi senza risposta, semplicemente perché non ci hanno mai pensato.

Il primo è questo:

I. Come si forma un'immagine in prospettiva?

O, molto più semplicemente, perché se guardiamo di fronte a noi una strada che sappiamo rettangolare, il nostro occhio, o un disegno fedele, o una macchina fotografica, la vede come un trapezio con due lati che tendono a congiungersi in un punto sull'orizzonte, che sappiamo essere all'infinito?

Il disegno allegato può forse aiutare. Credo si tratti della più elementare costruzione per spiegare il problema. Purtroppo, aggiungendo tutte le lettere necessarie, si crea un pasticcio incredibile, per cui spero che i colori diversi e le mie indicazioni possano supplire all'assenza di lettere.



Il punto di vista è disegnato come un occhio stilizzato, a cui giungono – tra infiniti altri - i raggi provenienti dai vari punti che ci interessano. La strada, di cui vediamo solo il primo tratto, è il rettangolo verde, riempito in grigio come tutte le strade, orizzontale. Il piano del disegno o di un vetro trasparente su cui possiamo tracciare ciò che il nostro occhio vede, è il piano giallo. La strada deve essere perpendicolare a questo piano: una strada messa per traverso sarebbe più difficile da trattare, ma non ci direbbe nulla di più di quel che io voglio spiegare, cioè **perché un rettangolo dritto davanti a noi, in prospettiva appaia come un trapezio, i cui lati obliqui appaiono convergere in un punto sull'orizzonte.**

Per tracciare sul piano giallo il disegno di quel che vediamo, usiamo il trucco di tracciare una linea mediana (nera) della nostra strada e del nostro foglio giallo. La mediana del foglio giallo è (intuitivamente) l'immagine della mediana della strada. Poi tracciamo i raggi che vanno da vari punti della strada al nostro occhio.

Ne tracciamo tre terzetti, che ci permetteranno di ottenere sul piano giallo un'immagine di ogni terzetto. Ogni terzetto sulla strada è dato dall'intersezione di una parallela alla base del foglio giallo con i due margini e la mediana della strada ed è composto da due punti sui margini della strada e dal punto sulla linea mediana della medesima, particolarmente importante in questo caso, **perché è l'unico di cui sappiamo dove interseca il piano giallo**: è all'intersezione del suo raggio con la linea mediana del piano, la quale, come si è detto, è l'immagine (che possiamo disegnare subito) della linea mediana della strada. Potremo allora congiungere i tre punti corrispondenti di ogni terzetto con una linea retta, il che ci assicurerà che i tre punti sono allineati (due punti sono sempre allineati, in quanto per due punti passa sempre una - e una sola, nella nostra geometria Euclidea - retta).

Il primo terzetto, in nero, è subito disegnato. Esso è alla base del foglio, che immaginiamo coincidente con l'inizio della strada. Il terzetto nero qui coincide con la sua immagine.

Per disegnare il secondo terzetto, in rosso, occorre aiutarci con il raggio rosso che parte dall'intersezione della retta del terzetto con la mediana della strada ed interseca la mediana nera del foglio giallo in un dato punto. Attraverso questo punto tratteremo la parallela rossa alla base del foglio: noi sappiamo che in prospettiva le linee perpendicolari alla linea di vista e qui parallele alla base del foglio resteranno parallele anche nella nostra immagine. Le due intersezioni della parallela rossa alla base del foglio con i due raggi dagli estremi della linea rossa sul piano all'occhio, ci danno due altri punti del piano giallo per cui passano le due immagini dei lati della strada.

Per il terzo terzetto, verde, si procede allo stesso modo: intersezione della mediana del foglio col raggio proveniente dal punto sulla mediana della strada, attraverso cui passiamo la parallela verde alla base del foglio. I due punti in cui essa interseca i raggi verdi provenienti dagli estremi del terzetto sono le due immagini degli estremi del terzetto.

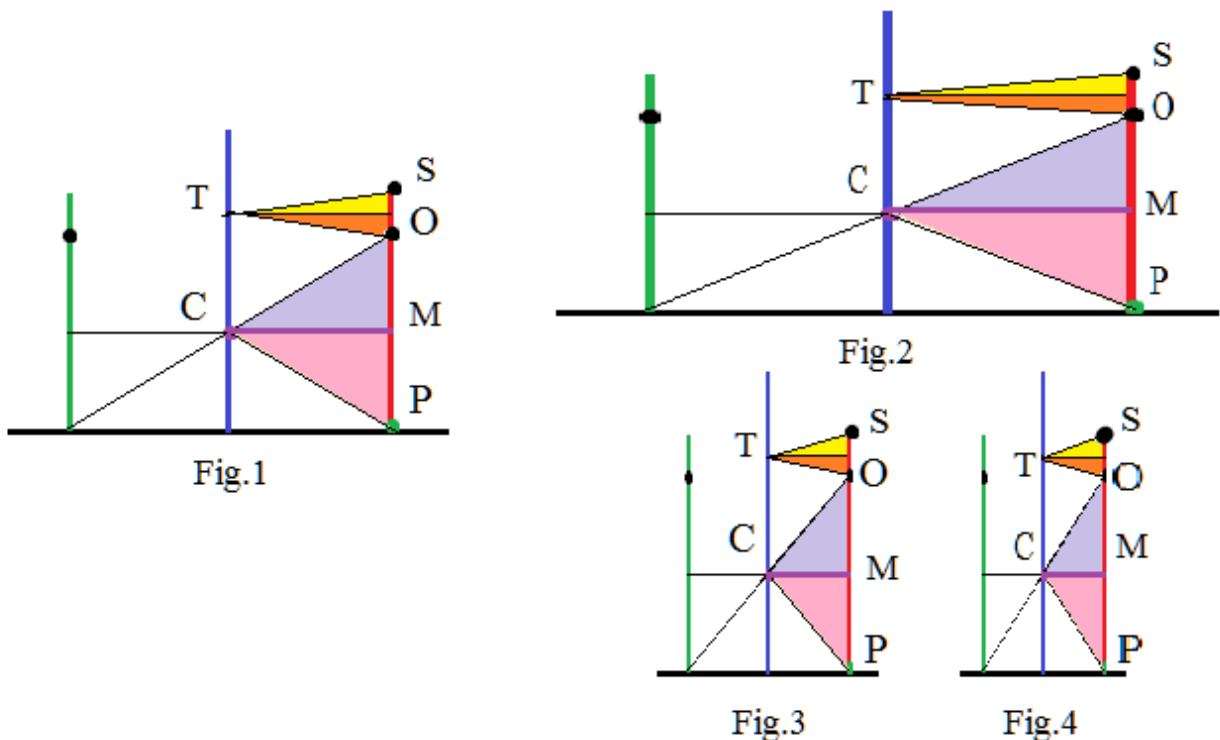
Adesso congiungiamo i tre punti (nero-rosso-verde) ottenuti a destra con una retta blu, e i tre punti (nero-rosso-verde) ottenuti a sinistra con altra retta blu, e vediamo che ne esce il nostro trapezio, i cui due lati obliqui, in un disegno meglio fatto, si dovrebbero congiungere dove la mediana del foglio giallo incontra la retta rosa all'altezza dell'occhio, che va all'infinito, dove appaiono congiungersi i due lati della strada.

Spero che questa costruzione chiarisca l'idea di chi mai si sia posto il problema e non abbia avuto il tempo o il modo di risolverlo. Ci si può dilettere a produrre immagini di altre più complicate (ma non troppo) figure geometriche. Un passatempo come un altro.

II. Dimensioni di uno specchio piano.

Se chiedete a bruciapelo a una persona **quanto deve essere lungo o alto uno specchio piano verticale perché possiate vedervicisi interi, da capo a piedi, standogli di fronte in piedi**, la risposta, quasi infallibilmente sarà “Dipende dalla distanza”.

Invece non è vero. C'è una misura precisa, che dipende dall'altezza dell'osservatore (che si suppone dritto in piedi) e non dipende dalla distanza. Si osservino le figure.



Incominciamo con la fig.1. Sia O la posizione dell'occhio, P la posizione dei piedi, e consideriamo il raggio che dai piedi P è riflesso sullo specchio in C e va all'occhio O.

Le leggi della riflessione su uno specchio piano (“L'angolo di incidenza - rispetto alla perpendicolare allo specchio nel punto di incidenza - è eguale all'angolo di riflessione”) impongono che l'angolo che il triangolo lilla ha in C sia eguale all'angolo che il triangolo rosa forma in C. Inoltre il lato porpora, CM, è comune. I due triangoli (rettangoli), OCM e PCM, avendo un lato in comune e due angoli eguali, sono eguali. Quindi $OM = MP$, e la parte di specchio da C al suolo non viene messa in gioco per vedere i nostri piedi. Possiamo aggiungere che il ragionamento vale anche per i triangoli arancione e giallo, che permettono all'occhio di vedere il

sommo S della testa. La lunghezza necessaria dello specchio, messo in posizione giusta, per vedere i piedi e il sommo della persona vale

$$TC = \frac{1}{2} (OS + OP) ,$$

cioè metà dell'altezza della persona.

Ma , come dimostrano le figure 2, 3, 4, il ragionamento è identico per tutte le distanze a cui il nostro soggetto si pone dallo specchio. In conclusione:

Per vedere i propri piedi e il sommo della propria testa nello specchio, questo deve essere lungo metà dell'altezza della persona che si specchia (stando ritto in piedi) , indipendentemente dalla distanza.

Devo ammettere che se si fa l'esperimento, si nota qualche discrepanza dalla mia affermazione: il fatto è che noi siamo oggetti tridimensionali, e la prospettiva fa dei brutti scherzi. Ma, vi prego, credete alle costruzioni geometriche.

Qualche semplice ragionamento sui triangoli permette di concludere che la nostra immagine riflessa, virtuale (verde), appare a una distanza dallo specchio eguale a quella della persona reale (rossa).

Inoltre, i piedi si riflettono sempre all'altezza del punto C, a qualunque distanza siamo, come si può vedere coprendo con un giornale la parte inferiore dello specchio, da C in giù, se lo specchio è più lungo

Sorpresi?

Ed ora, il classico dei classici:

III. Perché gli specchi invertono la destra e la sinistra, ma non l'alto e il basso?

Ho trovato la maggior parte delle spiegazioni su Internet, e ce ne sono letteralmente centinaia, anche di Fisici professionisti, tutte a mio vedere alquanto insoddisfacenti, forse anche perché nei blog non si possono – che io sappia – inserire disegni. Non vedo perché non dovrei provare anch'io a dare la mia spiegazione.

Per conto mio, quanto meno, invece di citare Chiralità e particelle elementari dalle astruse proprietà, terzo-quarto anno di fisica, si può partire da più lontano.

All'asilo circa impariamo che il guanto della destra non va bene per la mano sinistra a meno che...a meno che non lo rovesciamo, nel qual caso potremo mettere un guanto destro sulla mano sinistra – ma rivoltato, cioè con l'interno all'esterno. Dunque, nella maggior parte delle paia di guanti i due guanti sono due cose diverse (difatti uno va bene per la destra e l'altro per la sinistra), ma ci sono modi per renderli sovrapponibili. Un modo è quello di rivoltarne uno, rendendolo simile all'altro. (Naturalmente non parliamo di guanti in latex usati ad esempio in chirurgia, in cui non c'è distinzione fra parte inferiore e parte superiore del guanto e quindi lo stesso guanto andrebbe bene per entrambe le mani).

Poco più avanti nella nostra vita, diciamo alle medie, impariamo che ci sono figure piane che non possiamo sovrapporre, *se ci limitiamo a traslazioni e rotazioni sul piano e lavoriamo esclusivamente in due dimensioni*. Ad esempio, le figure A e B in Fig.1 possono essere ruotate (per esempio la B di 90 gradi in senso orario) e quindi sovrapposte, mentre non c'è modo di ruotare la C nel piano e poi sovrapporla alla A o alla B (che sono poi la stessa figura).

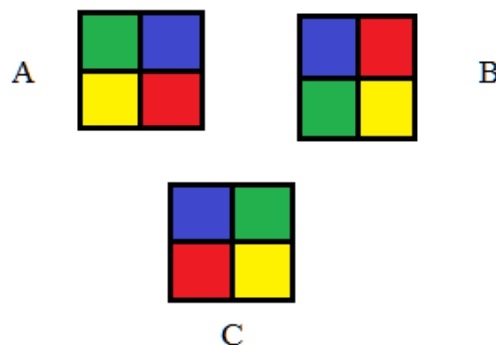


Fig.1

Passiamo agli anni del liceo. Quando si studiano sistemi di riferimento in tre dimensioni, veniamo quasi subito informati del fatto che i tre assi cartesiani ortogonali devono formare una “terna destra”, cioè i tre assi x , y , z nell’ordine devono puntare lungo le direzioni del pollice, indice, medio della mano *destra*.

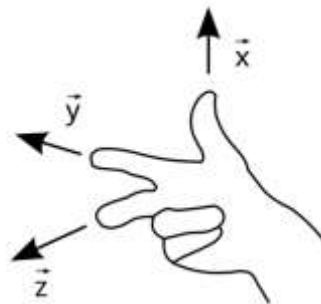


Fig.2 – Terna destra.

<https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/81/RHR.svg>

Se facciamo puntare i tre assi x , y , z nell’ordine lungo le direzioni del pollice, indice, medio della mano *sinistra*, otteniamo una terna *sinistra* e troviamo che non c’è modo di sovrapporre le due terne (come non c’è modo di sovrapporre le figure da me suggerite in Fig.1) a meno di invertire la direzione di un asse, trasformando, per esempio, l’asse y nero in B nell’asse Y verde.

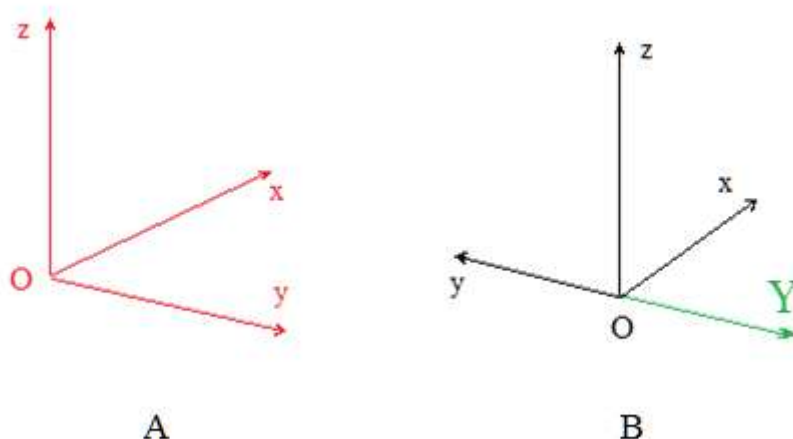


Fig.3

Si noti che in questo processo è sufficiente invertire la direzione di un asse, e si ottiene una terna opposta (in questo caso due terne sinistre).

In realtà la scelta di una terna destra, quale viene fatta nei libri di testo di fisica, diventa importante solo in fisica avanzata. R.Feynman scrisse un elegante capitolo sul soggetto nel capitolo 52 del vol. I delle sue *Lectures on Physics*. Le leggi della gravitazione e dell'elettromagnetismo tutte, esaminate a fondo, soddisfano una "simmetria per riflessione", per cui tutti i fenomeni fisici possono essere descritti utilizzando una delle due terne indifferentemente (ma coerentemente), il che non permette di dare una definizione intrinseca di destra e di sinistra: in tutti questi campi di studio la scelta del nome è oggetto di convenzione, fermo restando che le due terne non sono sovrapponibili. Tuttavia, nel mondo delle particelle elementari nei primi anni '50 si scoprì che un fenomeno, detto decadimento beta, non rispetta questa simmetria per riflessione, e quindi permetterebbe di distinguere il nostro universo da un universo speculare dando un significato oggettivo e non convenzionale alle parole "destra" e "sinistra". La simmetria potrebbe essere però ricomposta se nell'universo speculare la materia fosse mutata in antimateria, e il nostro universo di materia "destro" si riflettesse in un universo di antimateria "mancino". Meglio non andarci e non accettare visitatori da laggiù e, soprattutto come conclude Feynman, stare attenti se, dopo lunghe spiegazioni su quale sia la destra e quale sia la sinistra, quando finalmente ci incontriamo, il visitatore ci offre la sinistra.

Tuttavia noi possiamo costruirci un modello di universo in cui la terna fondamentale è opposta alla nostra: per farlo, basta uno specchio. L'universo al di là dello specchio è virtuale, ed innocuo.

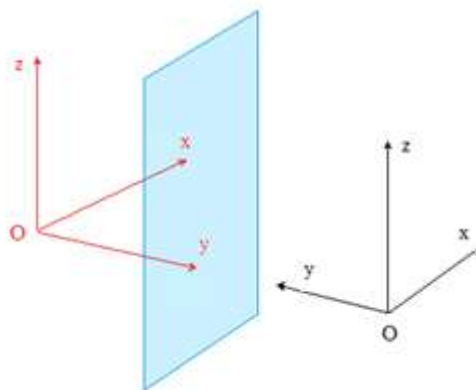


Fig.4

Come si vede, è sufficiente che gli assi y si oppongano, come avviene in uno specchio, per avere l'altro universo. In questo universo, un guanto destro diviene un guanto sinistro. Se proviamo ad atteggiare le dita della destra in una terna destra, vediamo nello specchio che la nostra mano destra ha composto una terna sinistra.

Di fatto, mentre le leggi fisiche, a parte certe astruse proprietà delle particelle elementari, non fanno distinzione tra destra e sinistra, il *mondo biologico* che conosciamo e che ci riguarda più da vicino in questo saggio, *una distinzione tra destra e sinistra la fa*. Gli organismi viventi, ad esempio, utilizzano solo la molecola L-Alanina per costruire proteine, e ignorano la D-Alanina. A livello molecolare le due molecole sono identiche, ma sono una l'immagine speculare, non sovrapponibile, dell'altra. Come questo risultato si sia prodotto dipende probabilmente dal caso: le prime poche molecole furono casualmente di L-Alanina e si riprodussero in molecole di L-Alanina, sopraffacendo quelle di D-Alanina. Sta di fatto che se un organismo biologico dell'universo nero fosse trasportato magicamente nell'universo rosso al di là dello specchio, esso morirebbe di fame, perché cercherebbe invano le molecole di L-Alanina che gli servono per vivere. Feynman conclude dicendo che la prevalenza della L-Alanina non sostiene una dissimmetria delle leggi della biologia, ma piuttosto lascia intendere che la vita ebbe un'unica origine.

E poi, aumentando la scala degli oggetti viventi nell'universo rosso, troveremmo, ad esempio che nell'uomo, gli organi cambiano lato: cuore, milza, colon discendente sono a sinistra, fegato, pancreas, cistifellea sono a destra. Nel nostro mondo. Qualche organo, come il cervello, cerca di essere più imparziale, ma con scarso successo. Nell'universo rosso, gli organi cambierebbero di lato: cuore a destra etc.

Noi quindi viviamo nell'universo nero, ma non dobbiamo pensare che nell'universo rosso valgano le stesse regole. Se vogliamo che gli oggetti del nostro universo nero si comportino come quelli dell'altro, rosso, dobbiamo, almeno nella nostra mente, "rivoltarli".

Che nell'altro universo valgano regole diverse, penso, nessuno ne dubita. ***Quello che crea il paradosso è che queste nuove regole sembrano comportare che nell'universo speculare si faccia la capricciosa scelta di scambiare la sinistra con la destra, ma non l'alto col basso.*** Noi non ci aspettiamo che esistano assi privilegiati, se non ci sono ragioni evidenti per cui essi esistano, e ci aspettiamo che la nostra terna possa essere orientata in qualsiasi direzione, e le stesse regole, diverse dalle nostre, valgano per tutte le terne.

Quando noi pensiamo ad uno specchio, immaginiamo che noi stessi passiamo dall'altra parte e facciamo dietro front, altrimenti nello specchio vedremmo la nostra schiena. In questo dietro-front, destra e sinistra dovrebbero essere conservate. Sì, *ma solo finché restiamo nel nostro universo.*

I maggiori fisici vi diranno, correttamente, che quindi l'asse lungo il quale avviene la trasformazione è l'asse diretto verso lo specchio, in direzioni opposte nei due universi. Non c'è un abituale dietro front, che sostanzialmente è una rotazione di 180 gradi intorno all'asse verticale, ma c'è una trasformazione che consiste nello "scambiare la parte posteriore con quella anteriore". Facile a dirsi, non altrettanto facile a spiegarsi come avvenga. Finché le modalità della trasformazione non sono chiarite, e l'asse z non è divenuto asse privilegiato, non si spiega perché dovrebbe essere trattato in modo privilegiato.

In due dimensioni la spiegazione è abbastanza semplice:

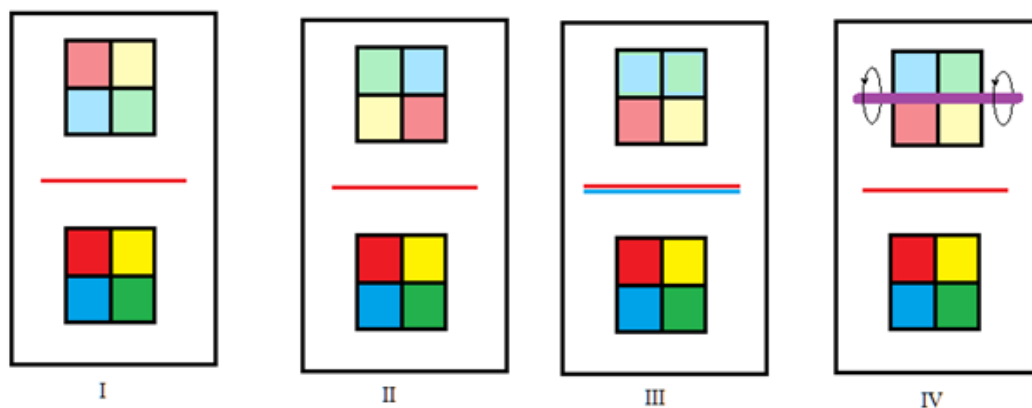


Fig.5

Si immagini (I) di far passare un *alter-ego* del nostro quadrato (un poco più scialbo) dall'altra parte (dal basso verso l'alto), della linea rossa, e che essa non rappresenti uno specchio, bensì una porta di cristallo qualsiasi attraverso la quale il nostro doppio possa passare impunemente senza trovare cambiate le regole del nostro universo. Attraversando dal basso verso l'alto dovremmo vedere il retro del nostro doppio (azzurro e verde), come è mostrato in I.

Nella figura II si mostra il risultato che si vedrebbe se l'universo al di sopra della linea rossa seguisse le stesse regole del nostro e l'*alter-ego* facesse una rotazione di 180 gradi intorno all'asse perpendicolare al piano che è il nostro universo in 2D. Ne risulterebbe che nel non-specchio il rosso sarebbe di fronte al giallo e il giallo di

fronte al rosso. **Destra e sinistra non sarebbero scambiate, ma gli specchi non si comportano così.**

In figura III invece vediamo quello che succede inserendo nel portale un vero specchio (azzurro) Per passare da I a III, nella parte superiore si è scambiata la parte posteriore del quadrato (verde e blu) con quella anteriore. Ma con questo scambio abbiamo la situazione di un normale specchio: rosso davanti a rosso, giallo davanti a giallo.

*Nessuna rotazione o combinazione di rotazioni **nel piano** può simulare questa trasformazione, e portare alla giusta disposizione di colori, quella che ogni specchio ci mostrerebbe.*

Tuttavia si arriva direttamente, senza utilizzare specchi, dalla I alla IV **passando nella terza dimensione**, cioè eseguendo una rotazione intorno alla linea porpora, supponendo che il quadrato sia trasparente e i colori sopra e sotto il quadrato siano gli stessi. A questo punto abbiamo riprodotto l'azione dello specchio, ma senza specchio (abbiamo tolto la linea azzurra). In compenso abbiamo dovuto uscire dal piano e passare attraverso la terza dimensione.

Anche per noi, specchiarci è come far passare il nostro *alter-ego* attraverso la quarta dimensione, per renderlo speculare a noi stessi. Ma gli esseri che sono dall'altra parte dello specchio, sono passati attraverso la quarta dimensione, e sono diventati diversi da noi, non siamo noi. Hanno il cuore a destra. Loro.

Ora, la trasformazione in questione può essere semplificata nella seguente figura: la punta della figura è il naso, che – interponendo uno specchio - viene rivolto, anzi, **rivoltato** verso di noi senza ruotare intorno all'asse verticale.

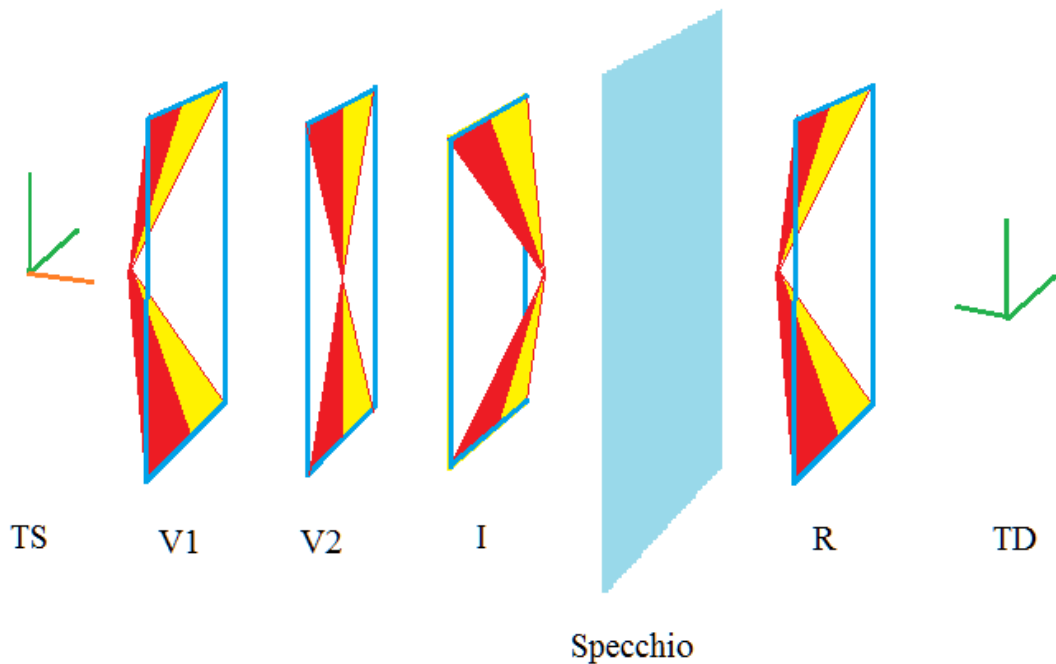


Fig.6

Sul lato destro abbiamo l'oggetto reale (R), con la sua terna destra (TD); sul lato sinistro abbiamo il processo di formazione dell'immagine: se non ci fosse lo specchio, avremmo V1, uguale ad R, di cui vedremmo la parte posteriore. Ma quando interponiamo uno specchio l'oggetto viene rivoltato: noi non vediamo mai la fase intermedia V2, ma vediamo il risultato finale I, l'immagine, in cui ci pare che la sinistra sia scambiata con la destra. In effetti, la terna destra è diventata una terna sinistra. Dunque un asse privilegiato c'è, ed è l'asse rivolto verso lo specchio, che viene rivoltato, con tutti gli oggetti dell'Universo riflesso. La cosa ci pare tanto ovvia che non ci rendiamo conto del fatto che, oltre ad un'apparente scambio della sinistra con la destra c'è anche uno scambio del davanti col dietro, *che è la parte chiave del processo*. L'asse verde della terna destra *rivolto verso lo specchio* diviene l'asse arancione *rivolto verso lo specchio*, e quindi *opposto all'asse verde* nell'altro Universo, *che è basato su una terna sinistra in cui l'asse parallelo allo specchio (x) punta verso la "loro" sinistra (mentre nel nostro universo punta verso la "nostra" destra)*. Per conseguenza, anche la sinistra ci appare scambiata con la destra, ma l'individuo che abita al di là dello specchio non siamo noi. E' fondamentalmente diverso. Come si è detto, tutti i suoi organi hanno mutato lato.

Lo stesso avviene se ruotiamo la figura di 90 gradi intorno all'asse y, quello che punta verso lo specchio. La formazione dell'immagine è la stessa, ***ma questa volta ciò che importa è che il basso è scambiato con l'alto: il quesito posto dal paradosso***

era evidentemente errato, e di nuovo, il fatto che la terna sia sinistra e non destra comporta un apparente scambio della destra con la sinistra.

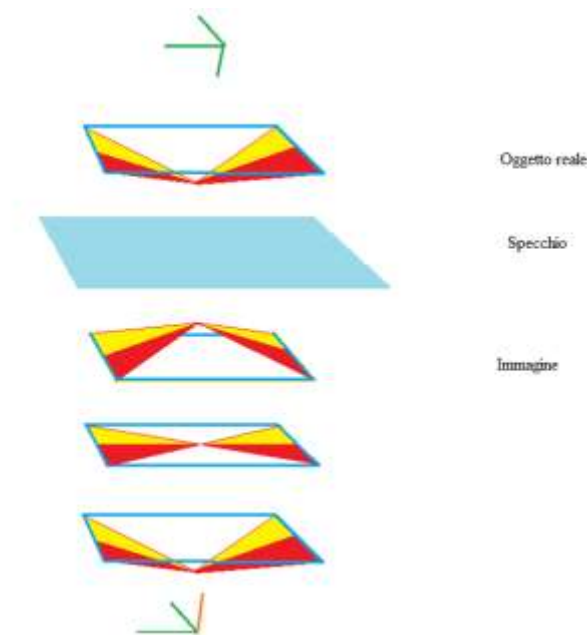


Fig.7

E perché non continuiamo con un nostro guanto sinistro? Puntiamo il guanto sinistro reale verso lo specchio e consideriamolo come oggetto dell'universo al di là dello specchio. Qui la sua natura cambia: il guanto sinistro diventa destro dall'altra parte dello specchio e punta verso lo specchio.

Ma possiamo fare qualcosa di simile al ribaltamento della figura nel precedente universo in due dimensioni. Supponiamo di sostituire lo specchio con una finestra di vetro, rivoltare un guanto identico al nostro guanto sinistro e mantenerlo puntato con le dita verso la finestra come l'originale. Come sappiamo, un guanto sinistro rivoltato diventa un guanto adatto alla mano destra. Se i colori dell'interno e dell'esterno del guanto sono molto diversi possiamo pensare semplicemente che il guanto sia un altro guanto che vive in quell'altro universo. Ma se il guanto ha gli stessi colori all'interno e all'esterno possiamo ancora pensare che, come in uno specchio, la sinistra sia scambiata con la destra.

In figura vediamo il processo del rivoltare il guanto. Si parte con il paio di guanti in figura A. Essi hanno diverso colore dentro (bianco) e fuori (arancione). Se, come in B, immaginiamo il processo terminato (la riga rossa a mezza via tra il vecchio guanto sinistro e il medesimo guanto appena rivoltato ci dice che non c'è specchio e siamo sempre nel nostro universo) questo è, salvo il colore e altri dettagli minori,

l'immagine speculare del vecchio guanto. Esso ci appare come un guanto destro, e come tale lo potremmo indossare.

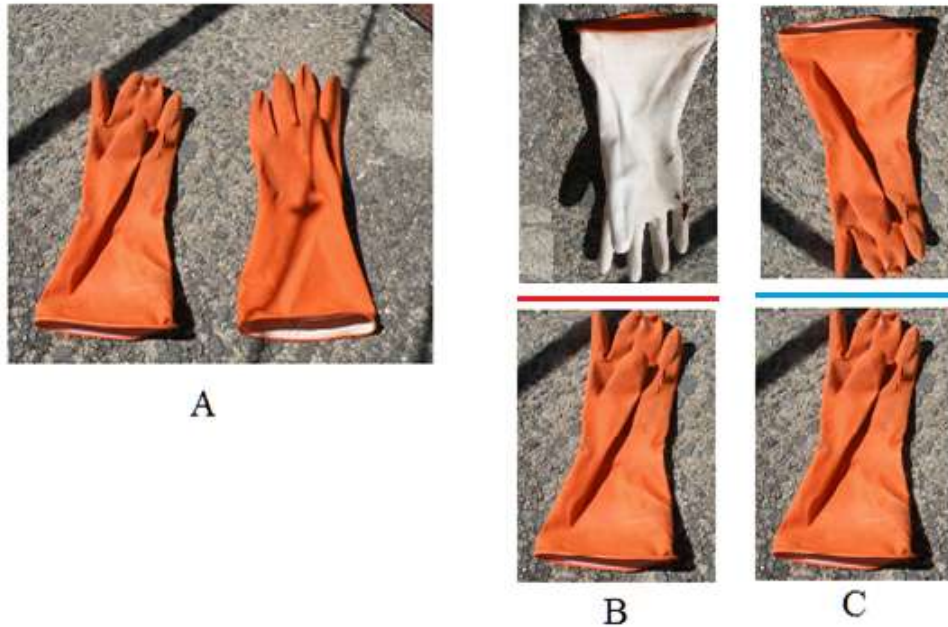


Fig.8

Ispirato dal sito:

<http://glovechirality.blogspot.it/2013/03/if-you-turn-left-handed-glove-inside.html>

Rivoltandolo, abbiamo raggiunto quindi la situazione C, che si ottiene normalmente con uno specchio (linea azzurra). L'unica differenza tra B e C è nel colore dei guanti, che ci avverte che quell'altro mondo è un mondo diverso, in cui abitano oggetti simili, ma sostanzialmente diversi dai nostri.

Ma nell'Universo mancino i colori non cambiano, e noi penseremmo semplicemente che il guanto nello specchio sia un guanto sinistro in cui la destra è scambiata con la sinistra. È il problema aggiunto che abbiamo noi esseri umani guardando l'immagine del nostro corpo, che è *quasi* simmetrico e ci fa pensare che dall'altra parte dello specchio ci siamo sempre noi, che siamo andati dietro allo specchio. Invece l'individuo che sta dall'altra parte dello specchio è diverso: si nutre di D-Alanina invece che L-Alanina e ha tutti gli organi scambiati di lato – e non parliamo dei suoi zuccheri!

Supponiamo ora di stare in piedi su uno specchio. In questo caso l'asse verticale è l'asse privilegiato, ed effettivamente vediamo che lungo questo asse privilegiato, lo

specchio scambia l'alto col basso, nel senso che i nostri piedi (il basso) appaiono contro lo specchio nell'immagine, e i piedi dell'immagine anche, mentre la testa dell'immagine è, dal nostro punto di vista, più in basso dei piedi.

Inoltre, il davanti e il dietro dell'uomo sono invariati, ma la destra è ancora scambiata con la sinistra.

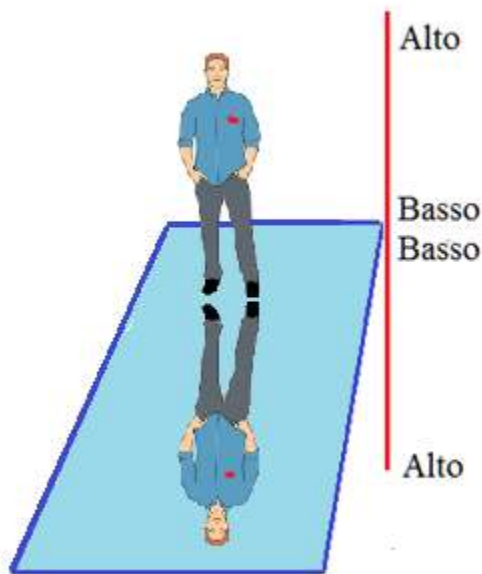


Fig.9

Preferisco non disegnare lo stato intermedio in cui l'uomo viene rivoltato come un guanto in tutti i disgustosi dettagli. Meglio ignorare, tanto questa fase non la vedremo mai.

Resta tuttavia un problema: qualunque direzione inverta il nostro specchio, abbiamo sempre la percezione che la sinistra sia scambiata con la destra, anche se ammettiamo che il davanti e il dietro (ciò di cui ci dimentichiamo spesso), l'alto e il basso (ciò che costituisce l'enigma, ed è dimostrato falso in Fig. 9) possono scambiarsi. Questo lo si vede tanto dalla figura classica in cui un oggetto sta di fronte allo specchio, quanto nella figura dell'uomo ritto sullo specchio. E' qui che, a mio (e non solo mio) parere, entra una questione psicologica. Si osservi la figura qui sotto.

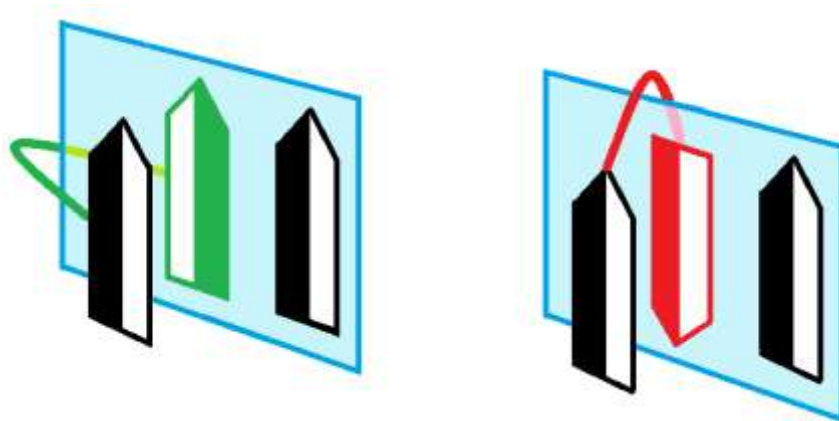


Fig.10

Noi sempre paragoniamo la figura riflessa con una figura del nostro universo la quale faccia un giro dietro allo specchio secondo la linea verde, voltandosi verso di noi. Sarà la forza di gravità, l'abitudine di camminare, la nostra quasi-simmetria destra-sinistra. Per cui ci aspettiamo la figura che ho colorato in verde, mentre l'immagine riflessa, il ritratto del nostro alter-ego che vive secondo le regole del suo mondo, è in bianco e nero e ci spinge a dire: *“Ecco, destra e sinistra sono scambiate, mentre alto e basso non sono scambiati”*.

Ma se noi vivessimo per un tempo abbastanza lungo in una regione a gravità zero, come una stazione spaziale o una sonda interplanetaria in volo balistico, magari, per passare dietro allo specchio, ci abitueremmo a seguire il percorso rosso. In tal caso ci aspetteremmo la figura che ho colorato in rosso riflessa nello specchio, sempre per l'idea che al di là dello specchio le regole sono le stesse che al di qua. Ma confrontando l'immagine che ci aspettiamo, a testa in giù, con quella bianco e nera che vediamo in realtà, dobbiamo concludere *che l'alto e il basso sono scambiati, mentre destra e sinistra non lo sono*. Dato che la simmetria alto-basso del nostro corpo è nulla, non noteremmo neppure la stranezza.

Dunque non è vero che lo specchio preferisca scambiare destra e sinistra. La risposta al quesito è che in realtà:

(1) lo specchio agisce sull'asse rivolto verso di lui invertendone la direzione, da cui segue che, con questa inversione, l'Universo (virtuale) dietro lo specchio è un universo che opera su una terna sinistra, mentre il nostro opera su una terna destra e le nostre immagini che lo abitano sono sostanzialmente diverse da noi.

(3) il nostro cervello interpreta la situazione come se noi avessimo camminato (e non fatto una capriola) dietro lo specchio, per cui preferisce interpretare l'immagine come se destra e sinistra fossero scambiate lasciando invariati l'alto e il basso invece che viceversa.

A me pare che entrambi i punti siano necessari: uno spiega ciò che avviene da un punto di vista fisico, l'altro spiega l'interpretazione psicologica.

Sovente anche le leggi della riflessione dell'ottica geometrica sono invocate per spiegare questo enigma. Esse entrano, a mio parere, soltanto per realizzare uno specchio, cioè un modello di quell'altro Universo mancino, che magari esiste, ma è meglio che non ci abbiamo nulla a che fare.

Non so il mio eventuale lettore, ma questa spiegazione almeno accontenta me.