

IFUSP/P 483
B.L.F. - USP

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

PUBLICAÇÕES

INSTITUTO DE FÍSICA
CAIXA POSTAL 20516
01498 - SÃO PAULO - SP
BRASIL

IFUSP/P-483

IDEE SPONTANEE SULLA VELOCITÀ DELLA LUCE

A. Villani, J.L.A. Pacca

Instituto de Física, Universidade de São Paulo

Agosto/1984

IDEE SPONTANEE SULLA VELOCITÀ
DELLA LUCE⁺

A. Villani⁺⁺, J.L.A. Pacca

Instituto de Física - Universidade de São Paulo

RIASSUNTO

Sono analizzate le risposte di un gruppo di studenti, già laureati in Física, a due problemi sulla velocità della luce. I risultati sembrano confermare l'utilizzazione di idee "spontanee" molto simili, con qualche adattamento, a quelle che costituiscono la cinematica "spontanea" proposta da E.Saltiel dell'Università Paris VII.

Si discutono alcune conseguenze didattiche relative all'insegnamento di Física e della Relatività Ristretta.

+ Preparato per l' "International Conference on Teaching of Modern Physics".

++ Com finanziamento parziale del CNPq.

INTRODUZIONE

Le ricerche recenti nel campo della Educazione Scientifica si sono indirizzate a trovare e strutturare i concetti "intuitivi" o "pre scientifici" degli studenti; i risultati ottenuti, soprattutto in Física Elementare⁽¹⁾, sono confortanti e di grande aiuto per capire la maniera di pensare e le difficoltà che gli studenti affrontano quando tentano assimilare nuovi concetti scientifici. Un problema che, per quanto ci consta, non è ancora stato studiato è l'influenza delle idee "spontanee" nell'assimilazione di teorie moderne di Física, più sofisticate e più formalizzate.

In questo lavoro pretendiamo mostrare come studenti, che già si laurearono in Física, utilizzano nozioni "spontanee" nella soluzione di problemi qualitativi sulla velocità della luce. Queste nozioni sono molto simili, con qualche adattamento, a quelle che costituiscono la cinematica "spontanea" proposta da E.Saltiel⁽²⁾.

Il nostro articolo sarà composto di quattro parti: nella prima faremo una sintesi delle idee principali sulla cinematica "spontanea", nella seconda presenteremo i risultati quantitativi delle risposte a due problemi sulla velocità della luce e nella terza parte tenteremo dare una idea globale, analizzando i principali tipi di argomenti utilizzati dagli studenti. Finalmente nella quarta e ultima parte faremo alcuni commenti più strettamente legati all'insegnamento della Física e della Teoria della Relatività Ristretta.

1. Concetti "spontanei" in Cinematica Elementare

La cinematica "spontanea"⁽²⁾ è imperniata sulla nozione di movimento assoluto e indipendente: possiamo

riassumerla con le seguenti caratteristiche.

a) Indipendenza della velocità, della distanza percorsa in un movimento e di sua traiettoria dal sistema di riferimento.

b) Presenza di un aspetto causale del movimento, associando un motore alla velocità osservabile reale.

c) Presenza di un aspetto descrittivo del movimento, che lo relaziona allo spazio assoluto; in questo schema esiste solamente una velocità e una distanza percorsa vera e eventuali differenze nelle misure ottenute da osservatori differenti in movimento sono caratteristiche di un movimento "apparente".

d) Utilizzazione, nei casi di movimento con "trascinamento" della idea di somma di movimenti assoluti invece che trasformazione di un movimento relativo: in questo caso le velocità e le distanze reali sono pensate come somma delle velocità e delle distanze "proprie" percorse dall'oggetto in movimento e dal mobile che lo trascina. Queste caratteristiche possono essere completate⁽³⁾ con:

e) Estensione alla grandezza tempo e traiettoria della proprietà di essere "proprio" o "apparente": a priori il tempo "proprio" è quello intrinseco al movimento.

f) Esistenza di osservatori privilegiati con accesso immediato ai valori "propri" delle grandezze spaziali e temporali che caratterizzano il movimento.

2. Risultati quantitativi

Relateremo in questo item i risultati quantitativi delle risposte alle domande formulate in due problemi sulla velocità della luce, il cui testo può essere visto in Appendice.

Per semplicità chiameremo il primo problema (Appendice A) "Problema sulla distanza" e il secondo (Appendice

B) "Problema sul tempo"; essi furono proposti agli studenti in una intervista individuale, le cui risposte erano annotate dall'intervistatore⁽⁴⁾.

2.1 - Problema sulla distanza

Hanno risposto a questo problema 24 studenti tutti già laureati in Fisica e che attualmente si dedicano alla ricerca in Fisica o in Educazione Scientifica al livello di "Master" o di "PhD".

Tabella I - Confronto tra le distanze dei fotoni e dei treni (Q1)

$\overline{BA} = \overline{AD}$	→ risposta unanime	
$\overline{T_B A} = \overline{T_D A}$		
	si	no
Danno indicazioni sul sistema di riferimento utilizzato	3	21

Tabella II - Distanza de fotoni vista dal treno T_B (Q2)

$\overline{T_B B} < \overline{T_B D}$	$\overline{T_B B} = \overline{T_B D}$
20	4

Tabella III - Distanza dei fotoni vista dal treno T_D (Q3)

$\overline{T_D B} > \overline{T_D D}$	$\overline{T_D B} = \overline{T_D D}$
20	4

Tabella IV - Coerenza con l'invarianza della velocità della Luce (Q4)

	Si	No	Non esiste relazione
Assimmetria dei fotoni compatibile con l'invarianza della velocità della luce	11	3	6

Una interpretazione immediata dei risultati riferiti sembra indicare una concezione parziale della invarianza della velocità della luce.

Le risposte alla Q1 sono compatibili con qualsiasi maniera di vedere, "spontanea", galileana o relativistica, nonostante questa ultima, a rigore, implichi che si debba specificare il sistema di riferimento. Ma è sempre possibile pensare in un sistema implicito.

Le risposte alle Q2 e Q3, in maggioranza, sono compatibili con l'invarianza galileana delle distanze e incompatibili con la Teoria delle Relatività Ristretta. Ma sono compatibili anche con una visione "spontanea" assoluta.

Finalmente le risposte alla Q4 in grande maggioranza sembrano incompatibili sia con l'analisi galileana sia con quella relativistica. Dobbiamo pensare che gli studenti cambiano l'interpretazione del fenomeno quando si passa da una domanda all'altra? O è possibile avere una idea unitaria in una visione "spontanea" delle risposte degli studenti? L'analisi delle spiegazioni degli studenti ci aiuterà a rispondere a queste domande.

2.2 Problema sul tempo

Hanno risposto a questo problema 30 studenti, con la stessa formazione dei soggetti del problema anteriore⁽⁵⁾

Tabella V - Confronto tra il tempo di andata e ritorno (Q1 e Q2)

	$\Delta t_a = \Delta t_r$	$\Delta t_a > \Delta t_r$	$\Delta t_a < \Delta t_r$
Osservazione nel razzo	20	7	3
Osservazione nella stazione	13	16	1

Δt_a = tempo impiegato nell'andata A-S.

Δt_r = tempo impiegato nel ritorno S-A.

Osservazione: Le risposte compatibili con la Teoria della Relatività Ristretta sono marcate con un circolo.

Tabella VI - Confronto tra il tempo del razzo e quello della Stazione (Q3 e Q4)

	$\Delta t_R = \Delta t_S$	$\Delta t_R > \Delta t_S$	$\Delta t_R < \Delta t_S$
andata	9	3	18
ritorno	8	15	7

Δt_R = tempo impiegato della luce misurato nel Razzo

Δt_S = tempo impiegato della luce misurato nella Stazione Terrestre

Tabella VII - Confronto del cammino della luce da A a S e da S a A. (Q5 e Q6)

	$\Delta d_a = \Delta d_r$	$\Delta d_a > \Delta d_r$	$\Delta d_a < \Delta d_r$	N.R.
osservato nel Razzo	27	3	-	-
osservato nella Stazione	10	18	1	1

Δd_a = distanza percorsa dalla luce all'andata

A - S

Δd_r = distanza percorsa dalla luce al ritorno

S - A

Tabella VIII - Confronto del cammino della luce per il razzo e per la stazione (Q5 e Q6)

	$\Delta d_R = \Delta d_S$	$\Delta d_R > \Delta d_S$	$\Delta d_R < \Delta d_S$	N.R.
Andata	12	3	15	-
Retorno	10	17	2	1

Δd_R = distanza percorsa dalla luce vista dal Razzo

Δd_S = distanza percorsa dalla luce vista dalla
Stazione

Una analisi immediata delle tabelle V, VI, VII e VIII ci dice che circa la metà degli studenti (in alcuni casi un poco di più) risponde coerentemente con la teoria della Relatività: ma più avanti vedremo che le giustificazioni che accompagnano le risposte sono meno consistenti.

Dal punto di vista della invarianza della velocità della luce, è la stessa cosa parlare della distanza percorsa dalla luce o del tempo impiegato a percorrerla in qualsiasi sistema di riferimento: tuttavia confrontando le tabelle V con VII e VI con VIII possiamo notare una certa discrepanza, maggiore o minore secondo i casi. Questo suggerisce, nella nostra interpretazione, la presenza di altre idee, oltre alla relazione diretta tra distanza percorsa e tempo impiegato, che sembra essere più forte nella conoscenza degli studenti.

I risultati della tabella VI potrebbero significare

una divisione delle risposte degli studenti in parte d'accordo con la Relatività e in parte d'accordo con l'invarianza galileiana del tempo; ma la tabella VIII non lascia dubbi, indicando che l'invarianza temporale coincide, in grande parte, con una invarianza spaziale della distanza percorsa, per nulla galileiana.

3. Analisi delle giustificazioni

In questo item tenteremo una sintesi delle idee che gli studenti hanno presentato per giustificare le loro risposte.

3.1 Il problema sulla distanza

Le risposte a questo problema sono abbastanza omogenee e ci sembrano coerenti con una visione dominante di tipo "spontaneo": il problema proposto con la sua struttura simmetrica facilitava in questo senso.

Vediamo alcune risposte esemplari a Q4.

"(La differenza nella distanza tra il treno e i fotoni) è compatibile con l'invarianza della velocità della luce, perché la posizione dei treni non modifica la velocità della luce e la distanza tra i fotoni e i treni dipende dal cammino dei treni".
"L'invarianza della velocità della luce non ha nulla a che vedere con la distanza tra i treni e i fotoni".

L'idea generale è che l'invarianza della velocità della luce vuol dire che la luce si allontana dall'antenna, in tutte le direzioni, uniformemente. La velocità dei treni, in direzioni opposte, spiega perché i fotoni non sono equidistanti. Naturalmente non mancano le risposte originali, come quella che fa appello alla contrazione della distanza $\overline{T_B B}$ e alla dilatazione della distanza $\overline{T_B D}$ dipendente dalla relazione tra la direzione del treno e quella del fotone.

Se passiamo a Q3 e Q2 incontriamo

"Il treno T_B è piú lontano da D perché oltre al cammino di D c'è il cammino del proprio treno".

"Il treno T_D è piú vicino a D e T_B è piú vicino a B per la invarianza della velocità della luce."

Tutte queste risposte ci sembrano una manifestazione dell'idea di una velocità unica, dei treni e della luce, così come di un cammino unico; in questo schema la distanza tra i treni e i fotoni vista dai treni non sembra risultare dalla trasformazione di una distanza invariante galileiana, ma sembra piuttosto una distanza unica, somma vettoriale delle distanze "proprie" percorse dai fotoni e dai treni. Così per chi pensa velocità e distanze in maniera assoluta non è problematico che il testo non specifichi il sistema di riferimento, né è necessario farne menzione nella risposta, cosa che è comune nelle risposte alla Q1.

3.2 Problema sul tempo

L'aumento del numero dei concetti fisici che entrano nel problema e del numero delle domande, facilita la dispersione delle risposte; per questa ragione le analizzeremo in parti, cominciando dalle domande che si riferiscono direttamente all'influenza del movimento del razzo sul cammino della luce e sul tempo impiegato a percorrerlo. Le giustificazioni delle risposte che considerano tempo e distanza di andata e ritorno uguali sono ovvie nel caso di Q1 e Q5, ma nelle Q2 e Q6 questo non succede. Alcuni esempi sono i seguenti:

"Il tempo di andata e di ritorno sono uguali per l'invarianza della velocità della luce."

"L'antenna e lo specchio mantengano la stessa distanza nell'andata e nel ritorno della luce: essa non dipende dall'osservatore."

"Il cammino della luce, visto dalla stazione, è lo stesso,

solamente è dislocato."

"Per la stazione il cammino della luce è lo stesso; solamente il fascio di luce è meno intenso perché il razzo si allontana."

Ci sembra chiaro che l'idea implicita o esplicita è che la distanza percorsa dalla luce, all'andata e al ritorno, è la propria distanza che esiste tra l'antenna e lo specchio; e il tempo è uguale perché la velocità della luce è invariante nei due sensi di andata e ritorno.

E questi argomenti sono anche piú espliciti nelle risposte alle Q3 e Q4.

"I tempi all'andata sono gli stessi perché la distanza è la stessa."

"I tempi sono uguali al ritorno perché la velocità della luce non dipende dal referenziale".

Ma l'unicità della distanza percorsa non è privilegio di un tipo di risposta: possiamo incontrarla, camuffata, anche in risposte "corrette" alla Q3, nelle quali il tempo di andata è minore per il razzo che per la stazione.

Nella teoria della Relatività per rispondere a questa domanda bisogna tener presente due effetti: uno, principale, galileiano, per il quale la distanza percorsa dipende dal sistema di riferimento, e uno, secondario, relativistico, che dipende dalla contrazione delle distanze in movimento.

Quest'ultimo opera in senso opposto al primo nell'andata (Q3) e nello stesso senso al ritorno (Q4).

È interessante notare che molte risposte fanno cenno solamente all'effetto relativistico.

"La luce impiega piú tempo per la stazione, all'andata e al ritorno, per causa della dilatazione del tempo."

"Nell'andata la luce impiega piú tempo per la stazione, perché

per il razzo esiste la contrazione."

È facile verificare che nell'andata, per gli studenti, l'effetto relativistico è invertito: la contrazione della distanza occorre in chi sta in movimento, ossia nel razzo e non per chi osserva il movimento. Analogamente la dilatazione del tempo non ha niente a che vedere con la misura di un unico orologio.

Tutto questo ci sembra molto coerente con una identificazione del movimento come "assoluto" e con una "assolutizzazione" degli effetti relativistici.

Un'altra idea abbastanza utilizzata è quella della compensazione.

"Al ritorno la luce impiega più tempo per il razzo, per compensare l'invarianza del tempo totale."

"Per il razzo la luce impiega meno tempo all'andata per causa della contrazione e impiega più tempo al ritorno per la dilatazione delle distanze in senso opposto al movimento. Ma il totale è uguale per i due osservatori."

"Apparentemente la luce impiega di più all'andata che al ritorno, per la stazione; ma il totale è lo stesso del razzo."

Non mancano le idee originali

"Il tempo passa più lentamente nel razzo, ma la distanza percorsa dalla luce è minore; questo compensa il fatto che il tempo passa più in fretta nella stazione, per la quale la distanza è maggiore."

Finalmente non bisogna tralasciare di segnalare la presenza, a volte aperta, a volte sottile, delle qualificazioni come tempo e distanza "reali" e tempo e distanza "apparenti". Grosso modo l'argomento è sempre lo stesso; i due osservatori "sembrano" fare delle misure differenti, ma in "realtà" ⁽⁶⁾ esiste solamente una misura per lo spazio, per il tempo e per la velocità della luce.

Il quadro sintetico di quanto abbiamo visto può essere chiamato: "La scalata dell'assoluto".

In primo luogo ci sono le risposte (numerose) nelle quali tutto è fisso e tutto è identico: tempo di andata e ritorno, cammino della luce, velocità della luce. Esiste una sola realtà fisica caratterizzata da grandezze indipendenti dagli osservatori. Poi abbiamo le risposte nelle quali c'è una compensazione pensata in varie maniere: contrazione e dilatazione, distanza e tempo; insomma alla fine, nonostante i dettagli possano essere differenti, il tempo e la distanza globale devono essere indipendenti dall'osservatore.

In seguito ci sono le risposte nelle quali le differenze tra i diversi osservatori sono solo dovute agli effetti relativistici: il grosso del fenomeno è uguale per i vari osservatori. In questo modo è facile ricorrere all'ultimo espediente: è vero che le misure sono differenti per causa della relatività, ma in realtà si tratta di effetti "apparenti". Il reale, ossia la distanza reale, la velocità reale, il tempo reale, è unico, perché non dipende da nessun osservatore.

Sfortunatamente le risposte degli studenti non danno nessuna indicazione sulla relazione tra le grandezze reali e gli osservatori nel senso di localizzare eventuali osservatori privilegiati.

4. Commentari e Conclusioni

Ci sembra che l'idea di movimento assoluto sia un punto di partenza molto proficuo per interpretare il significato delle risposte di studenti pre e post-universitari, quando è in gioco la sua relazione con differenti osservatori.

Questo ci leva a una considerazione sull'insegnamento della Relatività Ristretta: è poco realista cominciarlo

supponendo che gli studenti abbiano assimilato totalmente la Relatività Galileiana. È nostra opinione che bisogna cominciare più indietro e più profondamente, "costruendo" in primo luogo l'intuizione galileiana che libera in parte lo studente dal riferimento assoluto. Solamente dopo che gli studenti pensano e "vedono" galileianamente dovrà cominciare il lavoro di costruire una intuizione relativistica, molto più astratta, perché più relativa e molto più difficile, perché non si può appoggiare in fenomeni familiari. Un piccolo aiuto in questa ardua impresa può essere dato dall'utilizzazione di problemi semplici qualitativi e di "esperienze mentali" tipo "paradossi".

Ma è nostra impressione che l'idea di movimento assoluto sia ben più profonda e possa servire per capire anche le risposte degli studenti in altri campi della meccanica⁽⁸⁾ che involgono una relazione con le idee di forza, traiettoria, velocità, accelerazione.

E se percorriamo la storia della Fisica anche superficialmente, incontriamo una maniera di pensare il movimento molto simile a quella dei nostri studenti, cominciando dalle idee primitive di movimento della Grecia Antica, fino alle idee sofisticate della identificazione della materia con il movimento nell'etere⁽⁹⁾. O all'interpretazione ondulatoria della materia.

Questo suggerisce, perlomeno come punto di riflessione, che le idee spontanee degli studenti non sono solamente una "zizzagna" da estirpare, ma sono anche "grano" da coltivare nel senso di riflettere sulle concezioni fondamentali della natura, sui modelli intuitivi che permeano e stanno alla base di teorie moderne complicate dal punto di vista matematico. E l'acqua che può innaffiare questo "grano" e aiutarlo a svilupparsi e a dare frutti è lo studio della storia delle Idee in Fisica, attraverso

la quale lo studente potrà prendere coscienza non solo che la Fisica non è fatta unicamente di formule matematiche, ma anche che la Fisica è molto vicina alla Filosofia e alla Cultura del suo tempo.

Nel caso specifico della teoria della Relatività, crediamo che lo studio della sua genesi, del suo sviluppo e della sua relazione con la teoria di Lorentz potrà aiutare non solo a eliminare molti miti sulla sua necessità storica⁽¹⁰⁾, ma potrà contribuire per capire meglio la peculiarità delle idee einsteniane. E tutta la storia dell'etere, soprattutto da Faraday in avanti sarà un aiuto per lo studente non solo per comprendere la sua "tendenza" verso l'assoluto, ma anche per riconciliarsi con le idee più semplici della teoria della Relatività Generale e delle moderne teorie dei Campi.

Concludendo, possiamo così riassumere il nostro obiettivo nello studio delle idee "spontanee" degli studenti: l'insegnamento di Fisica avrà tutto da guadagnare se riuscirà ad associare la discussione dei concetti fondamentali di Fisica con una analisi storica dei medesimi e una presa di coscienza dei concetti "spontanei". Lo studente non solamente diventerà più cosciente della sua conoscenza, più colto e più preparato per insegnare, ma probabilmente gli sarà più facile "pensare" in Fisica.

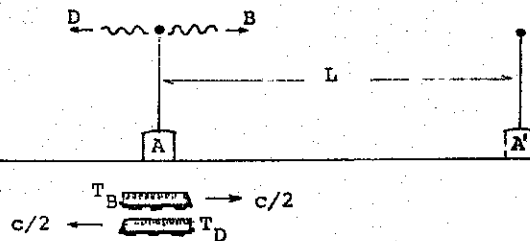
Riferenze e Note

- (1) Una sintesi significativa dei lavori e dei risultati ottenuti in Fisica Elementare può essere incontrata nel volume "Research on physics education: proceeding of the 1st International Workshop" - La Londe les Maures - 1983.
- (2) E. Saltiel: "Concepts cinématique et raisonnement naturels:..." These - Université Paris VII (1978).
- (3) Y. Hosoume, A. Villani, J.L.A. Pacca - In preparazione.
- (4) Ulteriori dettagli sulla pesquisa, sul metodo di analisi e sul significato delle domande possono essere incontrati in: A. Villani, J.L.A. Pacca: "As concepções espontâneas e a velocidade da luz: um levantamento preliminar." - In preparazione.
- (5) I tipi di risposta e di giustificativa presentati in questo problema sono analoghi a quelli dati da altri 30 studenti a un altro problema nel quale Antenna e Specchio erano solidari con la Stazione Terrestre. (Ved. ref. 4)
- (6) L'utilizzazione delle categorie "reale" e "apparente", quando si tratta di problemi relativistici, è stata notata anteriormente in vari lavori: per ex. J.A. Angotti et al: "Teaching Relativity with different philosophy".-Am. Jour. of Phys. 46 (1978) pp. 1258 - 62.
P. Hewson: "A case study of conceptual change in Special Relativity"-Eur. Jour. of Sc. Ed. 4 (1982) pp. 61 - 78.
- (7) Le risposte alle Q5 e Q6 in generale sono costituite di disegni con relativo commento: le tabelle VII e VIII sono state costruite confrontando i vari disegni tra di loro.
- (8) A. Villani, J.L.A. Pacca, Y. Hosoume: "Concepção Espontânea sobre movimento" in Pubblicazione nell'Istituto de Física da U.S.P.

- (9) B. Doran: "Origin and Consolidation of Field Theory in XIX Century Britain: From the mechanical to the Electromangental view of Nature"-Hist. Stud. Phys. Sc. 7 (1977) pp. 133 - 255.
- (10) Vari autori hanno trattato il problema della genesi della Relatività e del suo confronto con la teoria di Lorentz; una sintesi delle varie posizioni può essere incontrata in La Forgia M., Tarsitani C.: "Note critiche sulla scoperta della Relatività Speciale". Publ. Inter. Istituto di Fisica di Roma - 1979.

Appendice A

Problema sulla distanza



Nell'istante nel quale i due treni T_B e T_D , che viaggiano con velocità $v = c/2$ in direzioni opposte, si incrociano con l'antenna A, questa emette due segnali luminosi B e D in direzioni opposte. Il treno T_B e il segnale B dallo stesso lato, analogamente T_D e D.

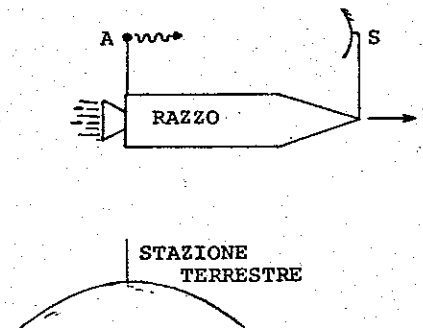
Domande

- Q1. A che distanza da A staranno i due treni T_B e T_D e il segnale D. quando B incontra una antenna A' che sta a distanza L da A? Perché?
- Q2. Pensa di essere un passeggero di T_B . Per te, quando B attinge l'antenna A', quale dei due segnali luminosi ti sarà più prossimo? Perché?
- Q3. Pensa di essere un passeggero di T_D . Per te, quando B attinge l'antenna A', quale dei due segnali luminosi ti sarà più prossimo? Perché?
- Q4. Le tue risposte domande anteriori sono compatibili con l'invarianza della velocità della luce? Giustifica la tua risposta.

Appendice B

Problema sul tempo.

Un razzo de lunghezza L, é dotato di una antenna (A) nella parte posteriore e di uno specchio riflettore (S) nella parte anteriore. Quando il razzo, che viaggia con una velocità uguale alla metà della velocità della luce, passa vicino a una Stazione Terrestre, l'antenna (A) emette un segnale luminoso, che viaggia, attinge lo specchio (S), é riflesso, ritornando all'antenna (A) dove é assorbito.



Domande

- Q1. Per chi sta nel razzo, il segnale luminoso impiega più tempo ad andare dall'antenna (A) allo specchio (S) o a ritornare dallo specchio (S) all'antenna (A)? Perché?
- Q2. Per chi sta nella Stazione Terrestre, il segnale luminoso impiega più tempo per andare dall'antenna (A) allo specchio (S) o per ritornare dallo specchio (S) all'antenna (A)? Perché?
- Q3. Il segnale luminoso impiega più tempo, per percorrere l'andata A-S, per chi sta nel razzo o per chi sta nella Stazione? Perché?

- Q4. Il segnale luminoso impiega piú tempo, per percorrere il ritorno S-A, per chi stã nel razzo o per chi sta nella Stazione? Perché?
- Q5. Disegna il cammino della luce, dall'antenna allo specchio e ritorno, visto da chi sta nel razzo. Spiega il tuo disegno.
- Q6. Disegna il cammino della luce, dall'antenna allo specchio e ritorno, visto da chi sta nella Stazione Terrestre. Spiega il tuo disegno.