

# Il Paradosso di Andromeda

Un'implicazione affascinante della Teoria della Relatività



**GAS**  
GRUPPO ASTROFILI DEL SALENTO

**Save the Pale Blue Dot**

il Gruppo Astrofili del Salento  
In collaborazione con il Comune di Stigliano (MT)  
organizza  
un evento spettacolo dedicato alla  
salvaguardia ambientale del pianeta Terra

Città di Stigliano  
la clinica dei paesi

Oronzo Zanzarella – G.A.S.  
Gruppo Astrofili del Salento

# Introduzione

---

- Il paradosso di Andromeda è un concetto affascinante della Teoria della Relatività che esplora la natura del tempo e della simultaneità.
- Introdotto da Roger Penrose nel 1958, illustra la differenza nella percezione del tempo tra osservatori in movimento relativo.
- E' tra le implicazioni meno note e, dal mio punto di vista, più sconvolgenti della Teoria Della Relatività.
- La trattazione che segue è volutamente semplificata, senza riferimenti matematici e basata semplicemente su un esercizio mentale tipico dell'approccio di Einstein.

# Concetti generali della Teoria Della Relatività Speciale

---

- La Teoria della Relatività Speciale ha il suo cardine sul concetto che le leggi della fisica sono le stesse in tutti i sistemi di riferimento inerziali e che la **velocità della luce sia costante**:
  - Nel vuoto la velocità della luce è:  $c = \sim 300 \text{ mila km/s}$
  - E' la velocità massima con cui ci si può muovere nell'universo
- Implicazioni:
  - Spazio e Tempo non sono indipendenti ma sono legati in una struttura chiamata SpazioTempo che esiste come un unico eterno blocco
  - Non c'è un riferimento unico ma lo Spazio e il Tempo sono relativi all'osservatore così come la simultaneità degli eventi
  - Il Tempo rallenta per un sistema in movimento relativo rispetto ad un osservatore (Dilatazione temporale)
  - Lo Spazio si accorcia nella direzione del movimento relativo rispetto ad un osservatore (Contrazione delle lunghezze).

# Estensione della Teoria Della Relatività Generale

---

- La Teoria della Relatività Generale estende alle masse i concetti della Teoria della Relatività Speciale:
  - La dilatazione temporale e la contrazione spaziale che si ha in presenza di moto relativo tra osservatori, si ha anche in presenza di corpi dotati di massa
- Quindi lo **SpazioTempo è deformato** dalla presenza di **oggetti in moto relativo** o di **oggetti dotati di massa**:
  - Gli effetti sono tanto più visibili quanto più le velocità relative sono elevate (intorno al 90% di  $c$ ) o quanto più gli oggetti sono massicci e concentrati (es. buchi neri).

# Conferme sperimentali della Teoria della Relatività

---

- La Teoria della Relatività Speciale e Generale hanno avuto **innumerevoli conferme sperimentali** nel corso degli anni:
  - Esperimento di Michelson Morley per la velocità della Luce
  - Dilatazione del tempo nei mesoni
  - Esperimento di Hafele-Keating per la dilatazione temporale
  - Deflessione della luce
  - Precessione del perielio di Mercurio
  - Redshift gravitazionale
  - Onde gravitazionali
- I prodotti della tecnologia che usiamo quotidianamente non funzionerebbero se non applicassimo le corrette formule che vengono dalla Teoria della Relatività (es. Navigatori GPS)

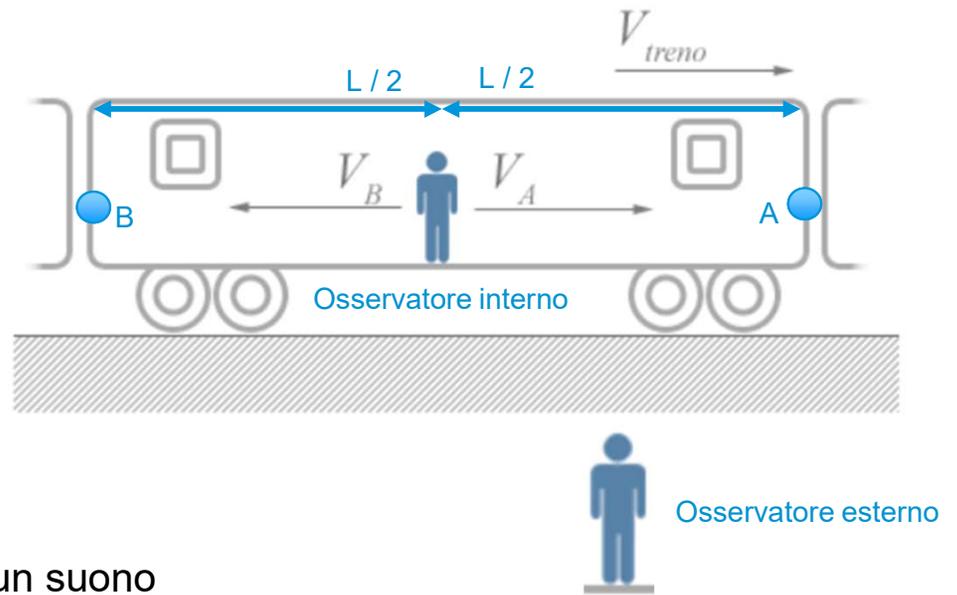
## ... torniamo al Paradosso di Andromeda

---

- Molti paradossi sono ben più noti rispetto al Paradosso di Andromeda:
  - Il paradosso dei Gemelli (un gemello trova l'altro invecchiato)
  - Il paradosso di Olbers (come mai il cielo è buio?)
  - Il paradosso di Fermi (se l'universo pullula di vita, dove sono tutti quanti?)
- Una delle implicazioni della Teoria della relatività è il concetto di Eternalismo:
  - Cosa significa in realtà?
  - Molti filosofi del passato erano forti sostenitori del Determinismo
  - Strano che rispetto ad altre implicazioni (es dilatazione temporale), dell'eternalismo Einsteiniano se ne parli poco

# Premessa: eventi in situazioni non relativistiche

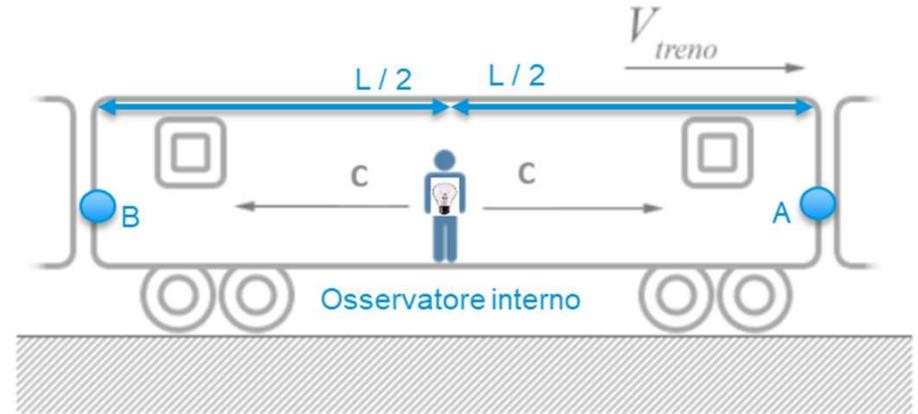
- Treno che si muove a velocità costante  $V_{\text{treno}}$ 
  - E' un sistema inerziale
- Osservatore interno solidale col treno
  - Non avrà percezione del movimento del treno
- Osservatore esterno fermo rispetto al treno
  - Vede il treno e l'osservatore interno muoversi insieme



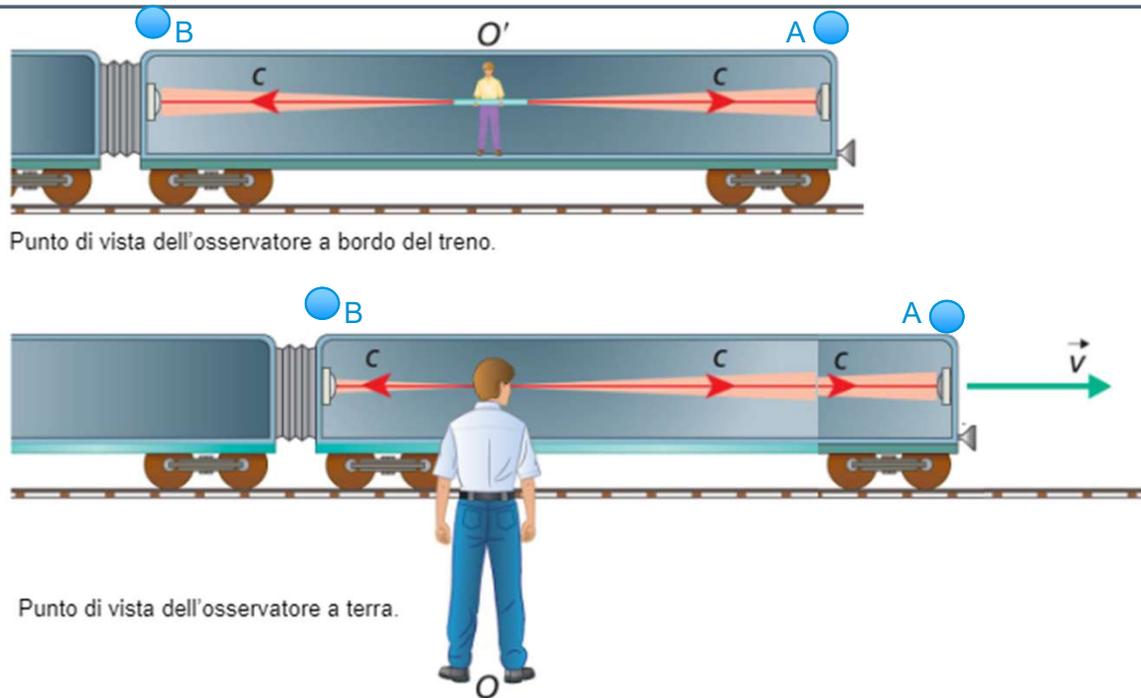
- L'osservatore interno posto a metà del vagone emette un suono
  - Per lui il treno è fermo ed il suono si propaga alla stessa velocità  $V_{\text{suono}}$  in tutte le direzioni
  - Partendo da metà vagone, il suono raggiunge i due estremi A e B nello stesso istante  $I_1$
- L'osservatore esterno vede gli oggetti nel treno muoversi a velocità diverse rispetto a quanto vede l'osservatore interno
  - La velocità del suono verso A è:  $V_A = V_{\text{suono}} + V_{\text{treno}}$
  - La velocità del suono verso B è:  $V_B = V_{\text{suono}} - V_{\text{treno}}$
  - D'altra parte il suono verso A percorrerà più strada mentre verso B percorrerà meno strada essendo il treno spostatosi nel frattempo. Semplici calcoli dimostrano che l'osservatore esterno vedrà il suono raggiungere i punti A e B contemporaneamente nello stesso istante  $I_1$  misurato dall'osservatore interno.

# Premessa: eventi in situazioni relativistiche

- Treno che si muove a velocità costante  $V_{\text{treno}}$ 
  - E' un sistema inerziale
- Osservatore interno solidale col treno
  - Non avrà percezione del movimento del treno
- Osservatore esterno fermo rispetto al treno
  - Vede il treno e l'osservatore interno muoversi insieme
- L'osservatore interno posto a metà del vagone accende una lampadina
  - Per lui il treno è fermo e la luce si propaga alla stessa velocità  $V_{\text{luce}} = c$  in tutte le direzioni
  - Partendo da metà vagone, la luce raggiunge i due estremi A e B nello stesso istante  $I_1$
- L'osservatore esterno vede gli oggetti nel treno muoversi a velocità diverse rispetto a quanto vede l'osservatore interno, tranne la luce che si propaga a velocità costante  $V_{\text{luce}} = c$ . Questo vale in tutti i sistemi di riferimento, cioè per tutti gli osservatori
  - La velocità della luce verso A è uguale alla velocità della luce verso B:  $V_A = V_B = c$
  - La luce verso B percorre meno strada perché nel frattempo il treno si è spostato. Raggiungerà il punto B nell'istante  $I_2$
  - La luce verso A percorre più strada perché nel frattempo il treno si è spostato. Raggiungerà il punto A nell'istante  $I_3$



# Gli eventi non sono assoluti ma relativi all'osservatore



## Si è persa la simultaneità degli eventi: eventi simultanei in un sistema possono non esserlo in un altro!

- Il raggio di luce parte contemporaneamente verso A e verso B per entrambi gli osservatori
- Ad un certo punto l'osservatore esterno vede il raggio di luce colpire il punto B, istante  $I_2$ .
- In questo istante  $I_2$ , l'osservatore interno vede entrambi i raggi diretti verso A e verso B, e non hanno ancora raggiunto i punti A e B. Cioè l'evento all'istante  $I_2$  non si è ancora verificato per l'osservatore interno ed appartiene al suo futuro.
- Dopo un po' di tempo, l'osservatore interno vede i due raggi toccare A e B contemporaneamente (istante  $I_1$ ), ma per l'osservatore esterno il raggio verso B ha già raggiunto in precedenza la sua meta e non ora, e il raggio verso A è ancora per strada mentre l'osservatore interno lo vede toccare il punto A!
- Dopo un altro po' di tempo, l'osservatore esterno vede il raggio verso A raggiungere la sua meta, istante  $I_3$ , mentre per l'osservatore interno questo evento si è già verificato!

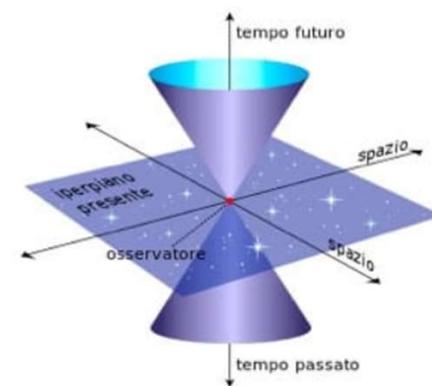
# Simultaneità Relativa

---

- Nella relatività speciale, la simultaneità degli eventi dipende dall'osservatore. Eventi simultanei in un sistema di riferimento possono non esserlo in un altro.
- Ad esempio, per due osservatori in movimento relativo, uno può percepire un evento come accaduto prima dell'altro, a causa della natura relativa del tempo.

# Paradosso di Andromeda

- Scenario: due persone si muovono in direzioni opposte
  - Più alta è la differenza tra le velocità più evidente sarà l'effetto sulla non simultaneità
- Evento nella galassia di Andromeda: una decisione presa dagli alieni di invadere la Terra
  - Più distante è il luogo dell'evento, più evidente è l'effetto sulla non simultaneità
- Differenti piani di simultaneità mostrano che per uno degli osservatori l'invasione è già partita, mentre per l'altro no
  - Uso dei diagrammi di Minkowski per illustrare il fenomeno
  - Dimostrazione matematica e grafica
  - ❖ Gli osservatori in movimento hanno piani di simultaneità inclinati.

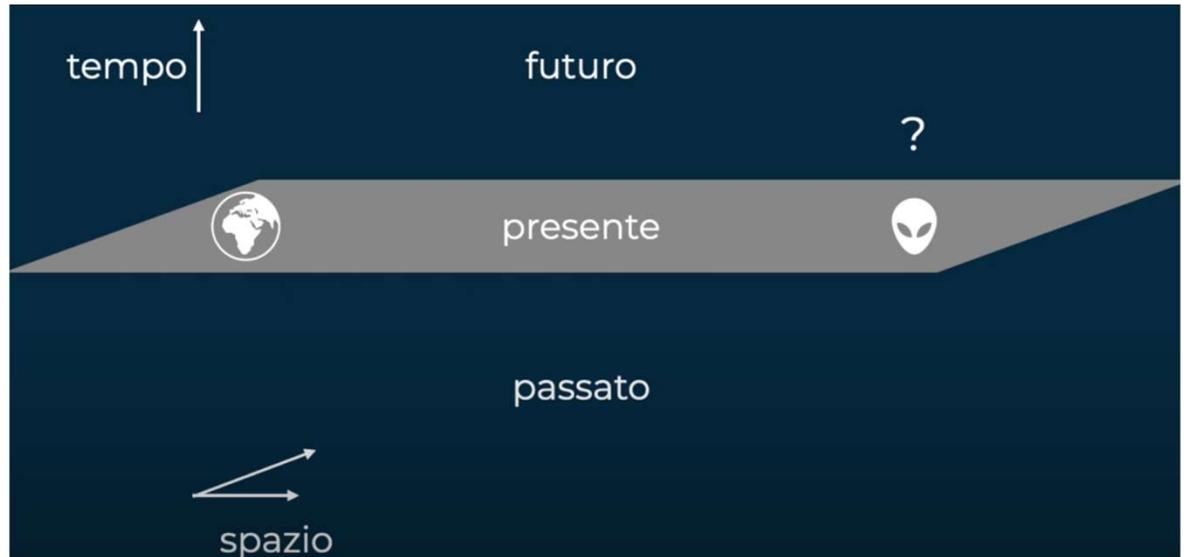


# Ricapitoliamo: Paradosso di Andromeda ed Eternalismo

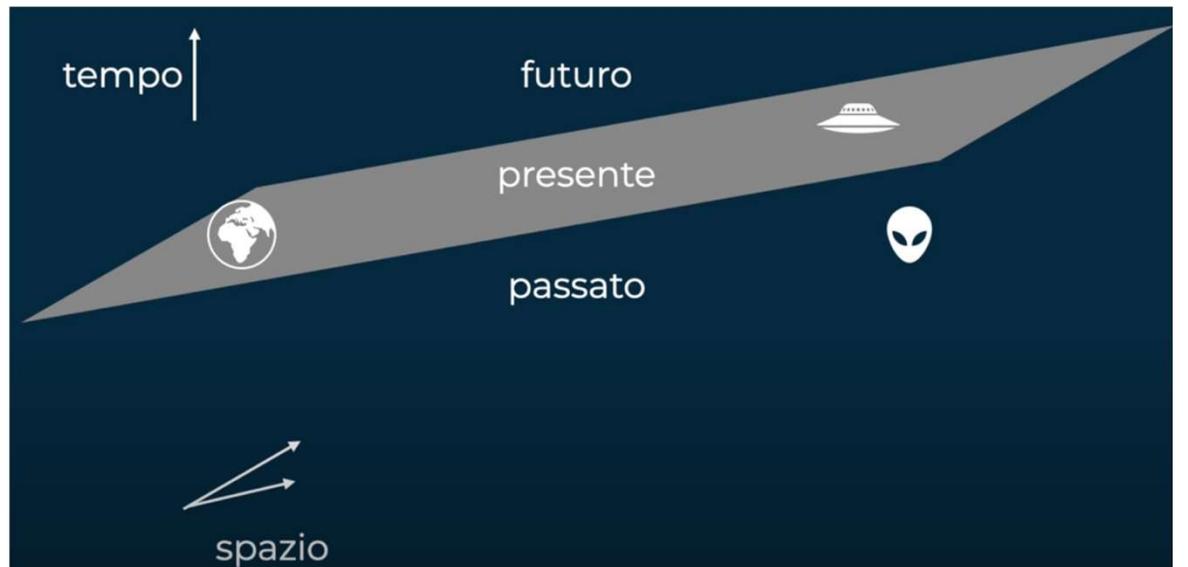
- Consideriamo due persone, Oronzo e Fernando, che camminano in direzioni opposte. Un evento distante, come una decisione in una civiltà aliena nella galassia di Andromeda, può essere percepito diversamente da Oronzo e da Fernando a causa della loro differente velocità.
  - Per Oronzo, l'evento può non essere ancora accaduto, mentre per Fernando potrebbe essere già successo, a causa della differenza nei loro piani di simultaneità.
- **Il fatto che per Oronzo l'evento non sia ancora accaduto, non significa che potrà accadere diversamente. L'evento è già successo, infatti Fernando l'ha già visto. Non c'è niente che possa far cambiare idea agli alieni tra quando Fernando l'ha visto e quando lo vedrà Oronzo in futuro.**
- **Questo non dipende dal fatto che la luce possa aver raggiunto Fernando ma non ancora Oronzo. E' un altro fenomeno quello in questione, si tratta della simultaneità relativa degli eventi: per Oronzo l'evento non è ancora accaduto ed inevitabilmente accadrà esattamente come Fernando l'ha già visto.**

# Differenti piani di simultaneità a seconda degli osservatori

## ❖ Piano di simultaneità di Oronzo:



## ❖ Piano di simultaneità di Fernando:



# Implicazioni filosofiche (parte 1)

---

- **Determinismo: il futuro è già deciso!**
  - Tutti gli eventi, comprese le azioni umane, sono determinati da cause precedenti.
  - I filosofi greci dell'atomismo antico (Leucippo, Democrito,...) sostenevano che il Tutto è composto da Atomi che si muovono in uno spazio vuoto e che i loro movimenti determinano tutti gli eventi futuri.
  - Laplace sosteneva che se un'intelligenza sapesse tutte le posizioni e velocità delle particelle dell'universo, potrebbe prevedere il futuro ed il passato con precisione assoluta.
- **Eternalismo: il futuro è già accaduto!**
  - Quanti sono gli eventi per me non ancora accaduti ma accaduti per altri? Se la differenza di velocità con un osservatore mi crea una differenza di simultaneità di un'ora, ci può essere un altro osservatore la cui differenza di velocità mi crea una differenza di simultaneità di un mese. Ed un altro che mi crea una differenza di simultaneità di un secolo, di un millennio. Cioè un evento che io vedrò fra mille anni, per un altro è già accaduto. Per estensione di questo concetto si può dire che tutto il futuro è già accaduto!
  - Libero arbitrio: siamo davvero convinti di averlo? Di poter decidere o scegliere? Non perché ci sono condizioni al contorno che mi forzano certi eventi, ma perché questi eventi sono già scolpiti nel continuum spazio-temporale! Sono già accaduti e non li ho scelti io!

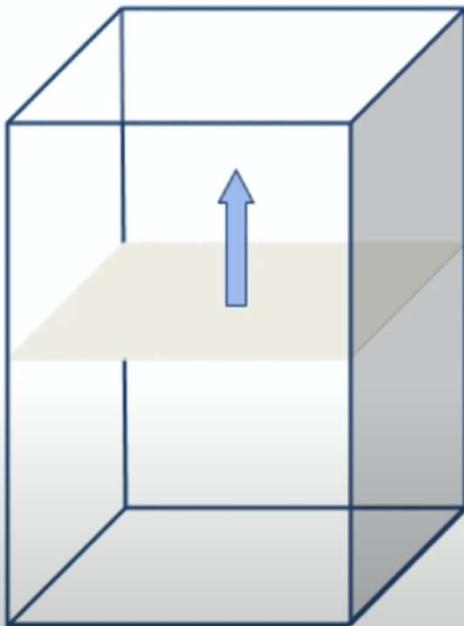
# Implicazioni filosofiche (parte 2)

---

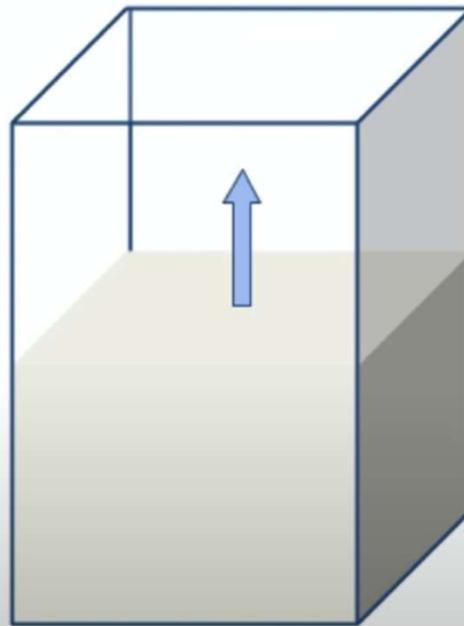
- Natura del Tempo: il tempo come una dimensione
  - Le dimensioni spaziali  $x$ ,  $y$  e  $z$  sono presenti, indipendentemente se ci noi occupiamo o meno quella posizione  $x$ ,  $y$ ,  $z$
  - Lo stesso accade per il tempo, una “posizione nel tempo” esiste indipendentemente se la occupiamo o meno.
  - Il passato, presente e futuro sono già esistenti per tutte le posizioni spaziali dell’universo
- ❖ **Il tempo esiste in un blocco unico (eternalismo)**
- L’Universo è un “continuum spazio-temporale”: un blocco unico fatto da una sequenza temporale di eventi dall’inizio alla fine dei tempi per tutte le posizioni spaziali dell’universo.
  - ❖ **Questo continuum spazio-temporale è stato generato in un unico istante, quello che chiamiamo: Big Bang !**

# La natura dell'Universo

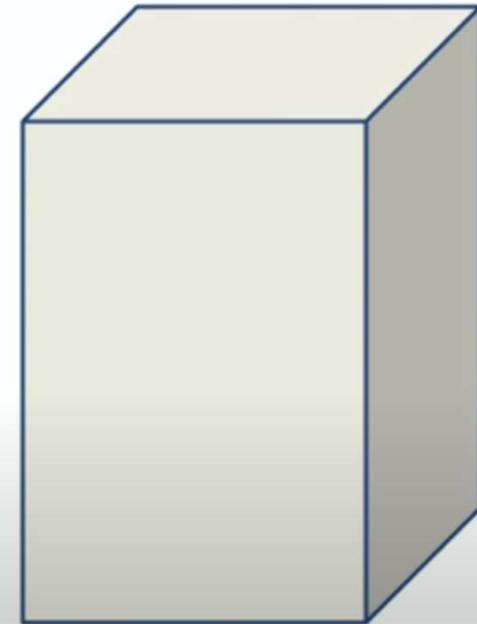
esiste solo il presente  
**(presentismo)**



esiste un blocco  
crescente di passato  
**(possibilismo)**



tutto il tempo esiste in  
un blocco unico  
**(eternalismo)**



# Conclusion

---

- Il paradosso di Andromeda è uno strumento concettuale per esplorare le implicazioni della relatività speciale. Esso ci aiuta a comprendere come la simultaneità e il determinismo siano influenzati dalla relatività.
- Attraverso questo paradosso, possiamo riflettere sulla natura fondamentale dell'universo.
  - La nostra percezione è che solo il presente è reale, il passato non esiste più, il futuro deve ancora accadere.
    - Comunque, anche se il passato non esiste più, per noi esso è più “reale” del futuro, perché lo abbiamo visto e c'è testimonianza. Il futuro invece è tutto da definire ed il determinismo del macrocosmo è reso incerto dall'indeterminismo del microcosmo con le leggi della meccanica quantistica che regolano.
  - La teoria della relatività invece ci dimostra che la natura della realtà è diversa, lo scorrere del tempo è illusorio, tutto è già accaduto: passato, presente e futuro coesistono in un unico eterno blocco spazio-temporale.