

I MANGA DELLE SCIENZE

RELATIVITÀ

HIDEO NITTA
MASAFUMI YAMAMOTO
KEITA TAKATSU
TREND-PRO CO., LTD





I MANGA DELLE SCIENZE

RELATIVITÀ

HIDEO NITTA
MASAFUMI YAMAMOTO
KEITA TAKATSU
TREND-PRO CO., LTD.



SOMMARIO

PREFAZIONE	VII
PROLOGO: L'IRRISPETTOSA CERIMONIA DI CHIUSURA.....	1
1	
CHE COS'È LA RELATIVITÀ?	9
1. Che cos'è la Relatività	14
2. Le Relatività di Galileo e la Meccanica di Newton.....	17
3. Il mistero della velocità della luce.....	23
4. Einstein scarta la Meccanica newtoniana.....	34
Che cos'è la luce?	40
La velocità della luce è costante (e in un posto chiamato SPring-8 Io dimostrano ogni giorno)	43
Cosa è simultaneo e cosa no? Dipende a chi lo chiedi (relatività della simultaneità).	44
- Somma newtoniana delle velocità (caso non relativistico).....	44
- Se la velocità della luce è costante (caso relativistico)	46
Il Princípio di Relatività e le trasformazioni galileiane	47
Differenze tra il Princípio di Relatività galileiano e la Relatività Ristretta di Einstein	48
Ehi, un momento... cosa succede quando sommiamo le velocità?	48
2	
COSA VORREBBE DIRE CHE IL TEMPO RALLENTA?.....	51
1. L'effetto Urashima (la dilatazione temporale)	54
2. Perché il tempo rallenta?	56
3. Il rallentamento del tempo influenza allo stesso modo entrambi gli osservatori	64
4. L'equazione del tempo che rallenta.....	73
Dimostriamo la dilatazione dei tempi col Teorema di Pitagora	78
Ma di quanto rallenta il tempo?	80
3	
MA DAVVERO PIÙ UN CORPO È VELOCE E PIÙ DIVENTA CORTO E PESANTE?	83
1. Perché andando più veloci le lunghezze diminuiscono?	86
2. Perché più vado veloce più divento pesante?	92
Come calcolare la contrazione delle lunghezze: l'equazione di Lorentz	106
La longevità dei muoni	108
Masse in movimento	109
- Trasformazioni galileiane	109
- La seconda legge di Newton	109
- Le trasformazioni di Lorentz.....	111
La relazione tra massa ed energia.....	112
La luce ha massa zero?	113

CHE COS'È LA RELATIVITÀ GENERALE?	115
1. Principio di equivalenza	120
2. La gravità agisce sulla luce	133
3. La gravità rallenta il tempo	143
4. La Relatività e l'universo	149
Il rallentamento del tempo nella Relatività Generale	158
La vera natura della gravità nella Relatività Generale.....	162
Fenomeni scoperti grazie alla Relatività Generale	162
- Deviazioni della luce (lente gravitazionale) in prossimità di grandi masse (come quella del Sole)	162
- La precessione del perielio di Mercurio	164
- Buchi neri	164
Il GPS (Global Positioning System) e la Relatività Generale.....	165
EPILOGO	167
INDICE	175

PREFAZIONE

Benvenuti nel mondo della Relatività!

Tutti si sono chiesti almeno una volta in che cosa consista effettivamente la Relatività, le cui previsioni appaiono assolutamente incredibili secondo gli standard di tutti i giorni (come per esempio il rallentamento del tempo e la contrazione delle dimensioni di un oggetto) e che anche per questo può sembrare una sorta di mistero, o di magia.

Nonostante le sue previsioni tanto controidintuitive da apparire inquietanti, la Teoria della Relatività di Einstein è stata confermata innumerevoli volte dagli esperimenti. Insieme all'egualmente controidintuitiva Meccanica Quantistica, costituisce uno strumento indispensabile per la comprensione del mondo fisico.

All'epoca di Newton, quando le velocità che i fisici erano in grado di considerare erano molto inferiori a quella della luce, Spazio e Tempo costituivano Assoluti indipendenti, permanenti ed eterni. Alla fine del XIX secolo, misurazioni sufficientemente precise, insieme agli sviluppi dell'elettromagnetismo, prepararono il terreno per la "scoperta" della Relatività, mentre Tempo e Spazio, che prima di allora erano sempre stati considerati separatamente e indipendentemente, cominciarono a essere concepiti in maniera nuova. Fu allora che sulla scena apparve Einstein. Per prima cosa, scartò decisamente l'idea che Tempo e Spazio potessero essere concepiti come assoluti e propose che fossero relativi e che variassero insieme, in modo tale che la velocità della luce risultasse costante. Questa radicale intuizione generò violente controversie, proprio come l'affermazione di Galileo che la Terra ruotava intorno al Sole (e non viceversa) turbò i suoi contemporanei. Ma quando l'Uomo si avventurò nello spazio, fu chiaro come effettivamente fosse la Terra a spostarsi intorno al Sole.

Analogamente, la Relatività ci ha messo a disposizione nozioni precise sullo spaziotempo in cui viviamo. In altre parole, la Relatività nasce dal domandarsi da che cosa si verifica effettivamente in natura invece di affermare che il mondo dovrebbe essere fatto in un certo modo.

Naturalmente spero che questa prefazione non risulti pesante e che vi incoraggi a godere dei misteri della Relatività nel mondo manga di Minagi e della sua insegnante, Miss Uraga.

Infine, vorrei ringraziare di cuore tutto lo staff di produzione dello studio Ohmsha; re_akino, che ha lavorato scrupolosamente alla sceneggiatura; e naturalmente Keita Takatsu, che ne ha ricavato un manga tanto godibile.

E adesso, tuffiamoci a capofitto nel mondo della Relatività!

MASAFUMI YAMAMOTO



L'IRRISPETTOSA
CERIMONIA DI CHIUSURA

LICEO
TAIGAI, ULTIMO
GIORNO DI
SCUOLA.

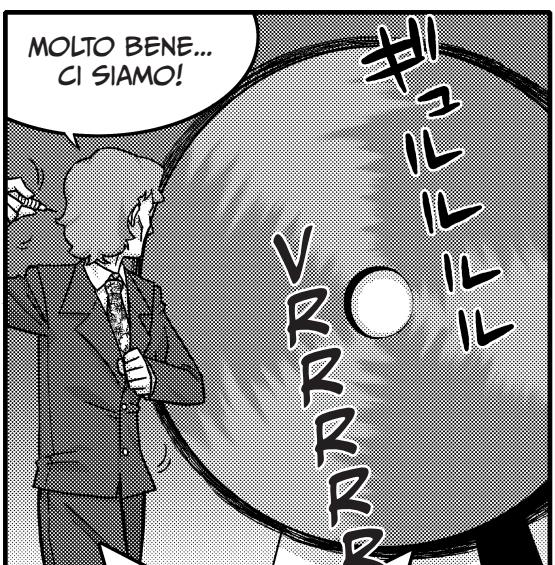
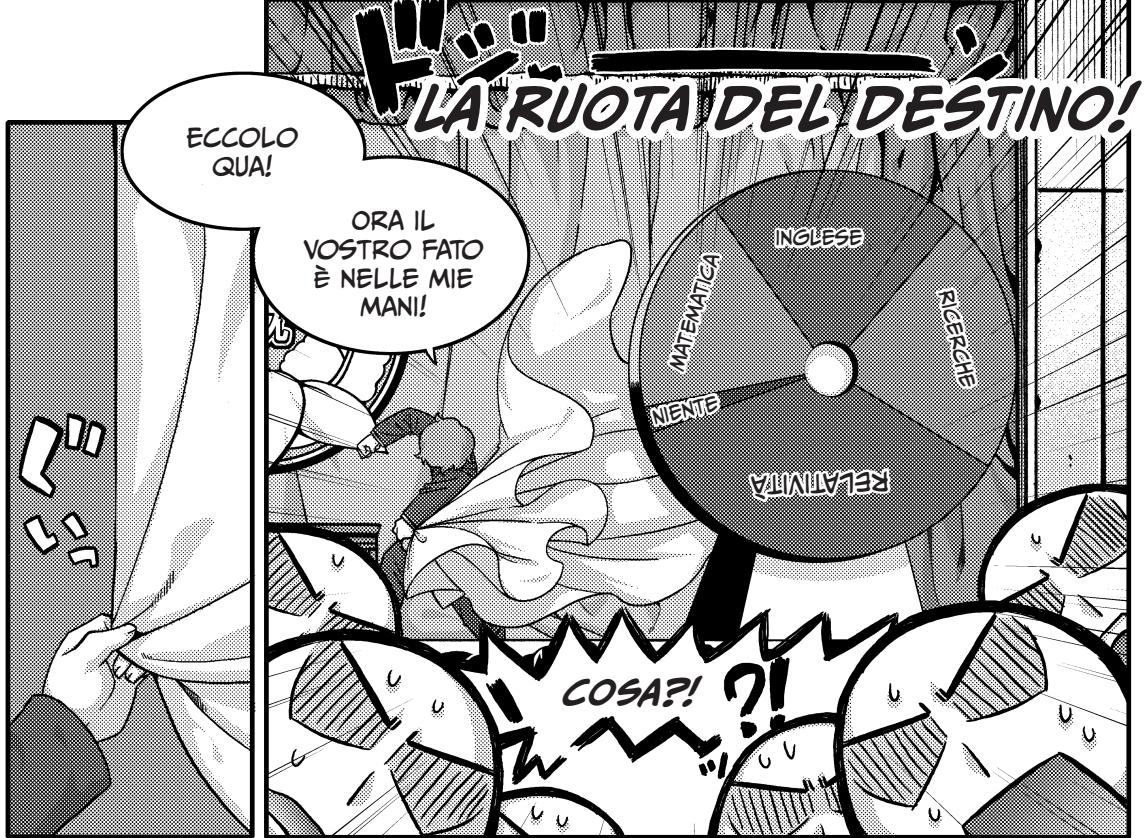
L'INTERO
ISTITUTO FREME
ALL'IDEA DELLA SPIAG-
GIA... DEI BAGNI... E
DEGLI AMO-
RI ESTIVI.

NATURALMENTE,
SO CHE LE VOSTRE
VACANZE STANNO
PER COMINCIARE.
PER-
TANTO!

HO UN REGALO
PARTICOLARE PER LE
MATRICOLE DI QUEST'ANNO,
IN MODO CHE POSSANO
GODERSI L'ESTATE
ANCOR DI PIÙ.

IL PRESIDE
RASE IYAGA.

CHE COSA HA
IN MENTE? A
VOLTE IL PRESIDE
METTE PAURA!



NON È GIUSTO,
PRESIDE! È UN
SOPRUSO!

E POI, COSA
DIAVOLO È LA
RELATIVITÀ?

....!!

RELATIVITÀ

COSA DIA...?!

NON POTEVA
ANDARE PEGGIO!
CHE COS'È?

CHE
COSA...

IL
VICEPRESIDE!

BAU!
BAU!

CI PRENDE
IN GIRO?

IL VICEPRESIDE
KOROMAKU.

CHE COSA,
SIGNOR VICEPRESIDE? GLIELO AVE-
VA GIÀ DETTO?

NON SI CAPISCE COSA
DICE IL VICEPRESIDE, MA
SEMBRA ARRABBIATO!

EHI, NON PUÒ
FARCI UNO SCHERZO
DEL GENERE!

OH, PERBACCO,
SEI PROPRI TU, IL
RAPPRESENTANTE DE-
GLI STUDENTI.

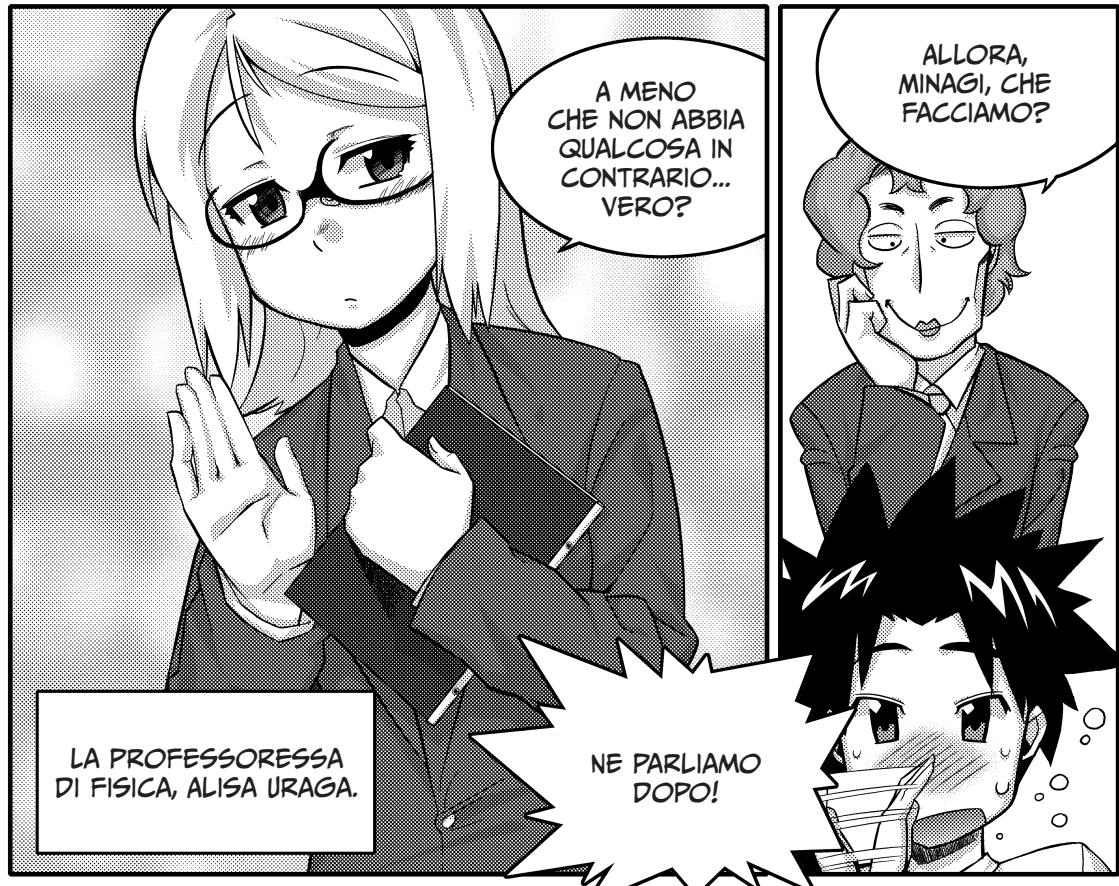
LA RUOTA DEL DESTINO
È UNA FARSA! LEI VUOLE
SOLO TORMENTARCI.

TUTTI ABBIAMO GIÀ
DEI PROGRAMMI PER LE
VACANZE.

IN OGNI CASO
PERCHÉ DIAVOLO AB-
BIAMO UN CANE COME
VICEPRESIDE?

IL RAPPRESENTANTE
DEGLI STUDENTI RUKA
MINAGI.





MOLTO BENE,
ALLORA. AL TERMINE
DELLE VACANZE
PRESENTERAI UNA
RELAZIONE SULLA
RELATIVITÀ.

OKAY!

NON È
IMPORTANTE SE TI
FARÀ LEZIONE MISS
URAGA. L'IMPORTANTE
È CHE LA RELAZIONE
SIA SCRITTA
DA TE!

E SE NON CI
RIUSCIRAI...

SE NON
CI RIUSCIRAI...

PER TUTTO IL TUO
ULTIMO ANNO DI
LICEO SARAI...

IL MIO
SEGRETARIO
PERSONALE!

SE LO PUÒ
SCORDARE!

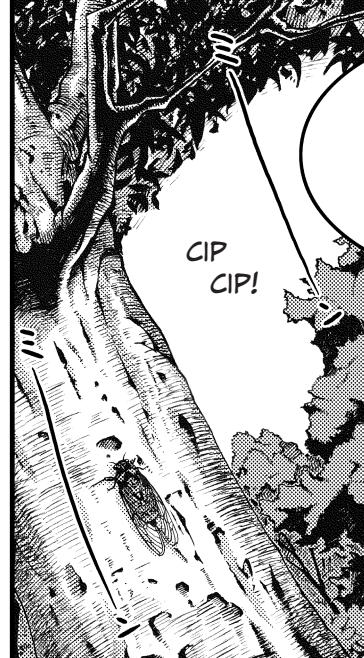
È UNA FOLLIA!
MA CE LA FARÒ!

BAU!

EH
EH
EH



CHE COS'È LA RELATIVITÀ?



BRAVO,
COMPLIMENTI... FAI
PURE LO SPAC-
CONE. ADESSO TI
TOCCA...



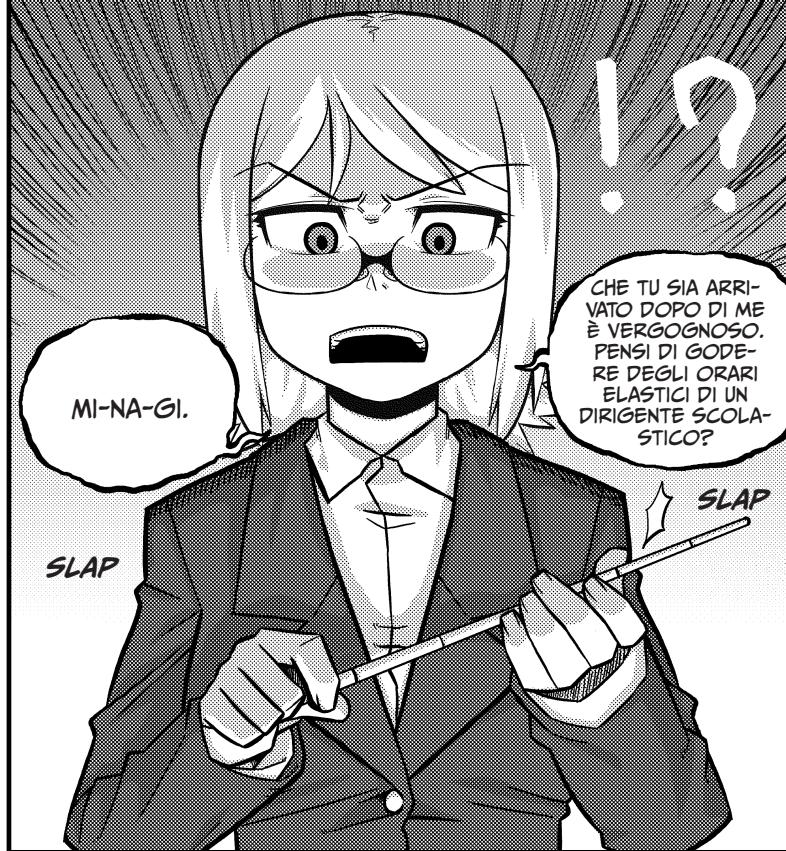
ALMENO MI
FARÀ LEZIONE
L'AFFASCINANTE
MISS Uraga!

FISICA
LABORATORIO

MMM...
ECCOMI QUA.

SEI IN
RITARDO!!!

WHAM!





È IL MIO SETTORE.
HO PENSATO DI POTERNE APPROFITTARE PER GUADAGNARE PUNTI AGLI OCCHI DEL PRESIDE.

E IO SAREI SOLO UNO STRUMENTO, EH?

E SE FACCIO CENTRO IN QUALITÀ DI "MISS Uraga CHE NON Vede L'ORA DI DARE UNA MANO AGLI STUDENTI" MAGARI AL PROSSIMO GIRO POTREI DIVENIRE PRESIDE IO.

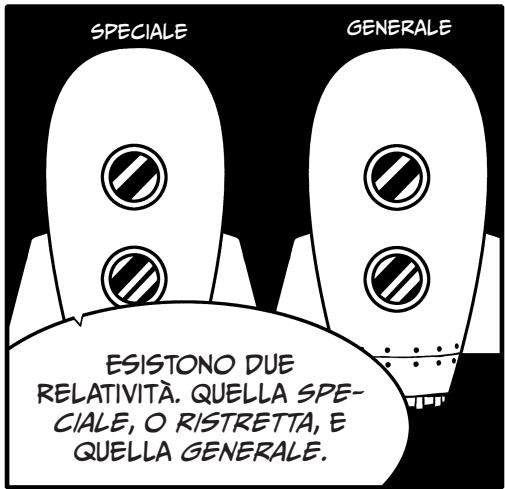
N-NON È UN PO' TROPPO FANTASIOSO?

MOLTO BENE,
COMINCIAmo! VISTO
CHE HAI DOMANDATO
CHE COS'È LA
RELATIVITÀ...

OKAY.

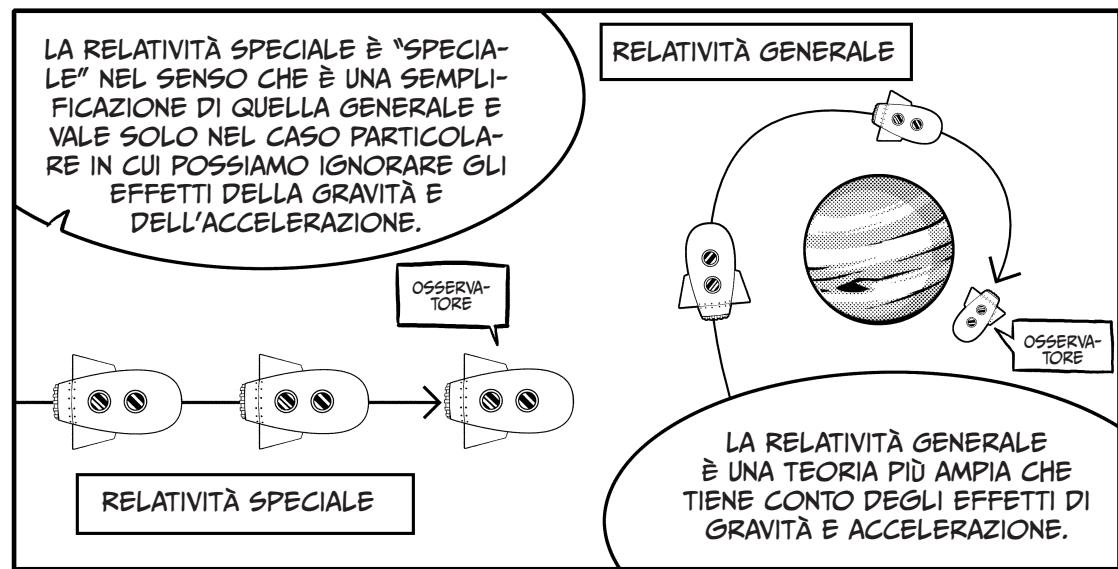


1. CHE COS'È LA RELATIVITÀ?



LA RELATIVITÀ GENERALE È UNA ESTENSIONE DI QUELLA SPECIALE.

UNA TEORIA PIÙ GENERALE NON DOVREBBE VENIRE PRIMA DI QUELLA PIÙ PARTICOLARE?



IGNORARE L'ACCELERAZIONE NON È PIÙ SEMPLICE?

BE', CERTAMENTE.

LA TEORIA DELLA RELATIVITÀ AFFERMA CHE IL FLUSSO DEL TEMPO, LE DISTANZE E LA MASSA DIPENDONO DA CHI EFFETTUÀ L'OSSERVAZIONE. NELLA RELATIVITÀ SPECIALE, O PARTICOLARE, CI LIMITAMO A OSSERVATORI A RIPOSO O CON VELOCITÀ COSTANTE. QUESTO PUNTO DI VISTA PRIVILEGIATO VIENE CHIAMATO SISTEMA DI RIFERIMENTO INERZIALE.



QUANDO LE OSSERVAZIONI VENGONO EFFETTUATE DA UN OSSERVATORE IN STATO DI ACCELERAZIONE, PARLIAMO DI SISTEMA DI RIFERIMENTO NON INERZIALE E DOBBIAMO RICORRERE ALLA RELATIVITÀ GENERALE. ORA CERCHERÒ DI SPIEGARE A GRANDI LINEE IN CHE COSA CONSISTONO QUESTE TEORIE.

LA RELATIVITÀ SPECIALE AFFERMA CHE PER GLI OGGETTI IN MOVIMENTO...

IL TEMPO RALLENTA, LE LUNGHEZZE SI CONTRAGGONO E LA MASSA AUMENTA.

RALLENTA? SI CONTRAGGONO? QUESTE COSE ACCADONO SUL SERIO?

CONTRAZIONE!
AUMENTO!

TRANSFORMERS!
ALL'ATTACCO!

...NON È COME TI IMMAGINI.

GLI EFFETTI DELLA RELATIVITÀ DIVENTANO AVVERTIBILI A VELOCITÀ VICINE A QUELLE DELLA LUCE.

SI TRATTA DI VELOCITÀ ELEVATISSIME, ED È PER QUESTO CHE SULLA TERRA MOLTO RARAMENTE OSSERVIAMO EFFETTI RELATIVISTICI.

COSA
DIAVOLO?!

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

“

</div

SECONDO LA RELATIVITÀ GENERALE, UN CORPO DOTATO DI MASSA PRODUCE LA GRAVITÀ, INFLUENZANDO IL TEMPO E LO SPAZIO.



CHE COS'È LA GRAVITÀ?

LAMPO DI RELATIVITÀ!

PRENDIAMO PER ESEMPIO, LA LUCE...

LE STELLE HANNO UNA MASSA COSÌ GRANDE DA DEFORMARE LO SPAZIO E IL TEMPO ABbastanza DA PERMETTERCI DI OSservare LA DEVIAZIONE DELLA LUCE CHE PASSA LORO VICINO.

ZAP!
FU PROPRIO LA DEVIAZIONE DELLA LUCE DA PARTE DI UNA GROSSA STELLA A CONFERMARE PER LA PRIMA VOLTA LA RELATIVITÀ GENERALE.

LA RELATIVITÀ GENERALE È UN ARGOmento AVANZATO E MOLTO DIFFICILE...

QUINDI PER ORA CI CONCENTREREMO SULLA RELATIVITÀ SPECIALE. SPERO CHE APPREZZI LA COSA.

OKAAAY...

PERCHÉ SE NON CAPISCO SARÒ IN GUI GROSSI...

2. LA RELATIVITÀ DI GALILEO E LA MECCANICA DI NEWTON.

COMINCIAMO CON
QUALCHE DETTAGLIO
STORICO, IN MODO DA
CAPIRE MEGLIO LA
RELATIVITÀ.

L3 L3

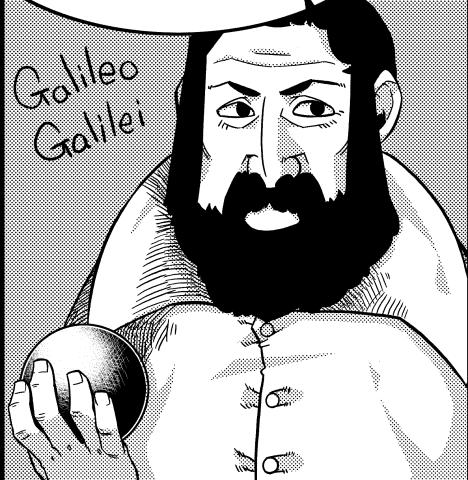
...STORICO?!

SE PRIMA TI
SPIEGO LE ORIGINI
DELLA TEORIA, FORSE
LA CAPIRAI MEGLIO.

PER LA CRONACA, SOR-
VOLERÒ SU DIVERSI DET-
TAGLI, QUINDI MI VORRETE
SCUSARE QUALCHE
IMPRECISIONE.

BE', IMMA-
GINO CHE CI
POSSA STARE,
SE RIESCO A
CAPIRE LE IDEE
DI BASE.

TANTO PER COMINCIARE,
CIRCA 300 ANNI PRIMA
DI EINSTEIN...



...C'ERA IL PRINCIPIO DI
RELATIVITÀ GALILEIANO,
ENUNCIATO DA GALILEO
GALILEI.

PRINCIPIO...
DI RELATIVITÀ?

LO SAI CHE COS'È
IL MOTO RETTILI-
NEO UNIFORME,
VERO MINAGI?

APPARVE UNA
CREATURA
MISTERIOSA!

UH, È QUANDO UN
OGGETTO SI MUOVE
SEMPRE CON LA
STESSA VELOCITÀ E
DIREZIONE?

AH...

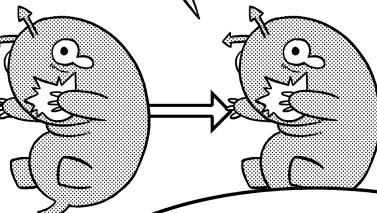


STATO DI
QUIETE

IN ASSENZA DI FORZE
ESTERNE, UN OGGETTO
IMMOBILE RESTERÀ IN
STATO DI QUIETE.

UH?!

STATO DI MOTO
CON VELOCITÀ
E DIREZIONE
COSTANTI.



SECONDO IL
PRINCIPIO DI INERZIA, IN UN
SISTEMA DI RIFERIMENTO INER-
ZIALE UN OGGETTO A RIPOSO
RESTERÀ A RIPOSO...

...E UN OGGETTO DOTATO DI VE-
LOCITÀ COSTANTE CONTINUERÀ A
MUOVERSI (CON LA STESSA VELO-
CITÀ) FINCHÉ NON INTERVERRÀ UNA
QUALCHE FORZA ESTERNA.

AIUTOOOO!



IL PRINCIPIO DI RELATIVITÀ GALILEIANO AFFERMA CHE LE LEGGI DI NEWTON SONO LE STESSE IN QUALSIASI SISTEMA DI RIFERIMENTO INERZIALE, COMUNQUE LO SCEGLIAMO. IN ALTRE PAROLE, PER UN OSSERVATORE INERZIALE, INDIPENDENTEMENTE DA DOVE SI TROVI NELL'UNIVERSO E DA QUALE SIA LA SUA VELOCITÀ, LE LEGGI DELLA FISICA RESTANO SEMPRE LE STESSE.

HO CAPITO.
CREDO...

PER ESEMPIO, SE LANCIO IN ALTO UNA PALLA IN UN LUOGO CHE È FERMO, MI RICADRÀ IN MANO, GIUSTO?

ANALOGAMENTE, SE LA LANCIO A BORDO DI UN TRENO CHE SI MUOVE A VELOCITÀ COSTANTE, MI RICADRÀ IN MANO ANCHE IN QUESTO CASO.

IN ALTRE PAROLE,
NON IMPORTA SE SIAMO FERMI O CI MUOVIAMO DI MOTO UNIFORME... LE LEGGI DELLA FISICA RESTANO LE STESSE.

MA LA STESSA TERRA SI SPOSTA ATTRAVERSO LA GALASSIA... QUESTO VUOL DIRE CHE È UN SISTEMA DI RIFERIMENTO IN MOVIMENTO?



ESATTO! IN RELATIVITÀ NON ESISTONO SISTEMI DI RIFERIMENTO PRIVILEGIATI RISPETTO AD ALTRI. NEPPURE LA TERRA PUÒ ESSERE CONSIDERATA UN SISTEMA DI RIFERIMENTO "ASSOLUTO".



CHE COSA VUOLE DIRE?

CLACKITY CLACK

HAI PRESENTE-
QUESTO RUMORE,
QUANDO VIAGGI IN TRENO?

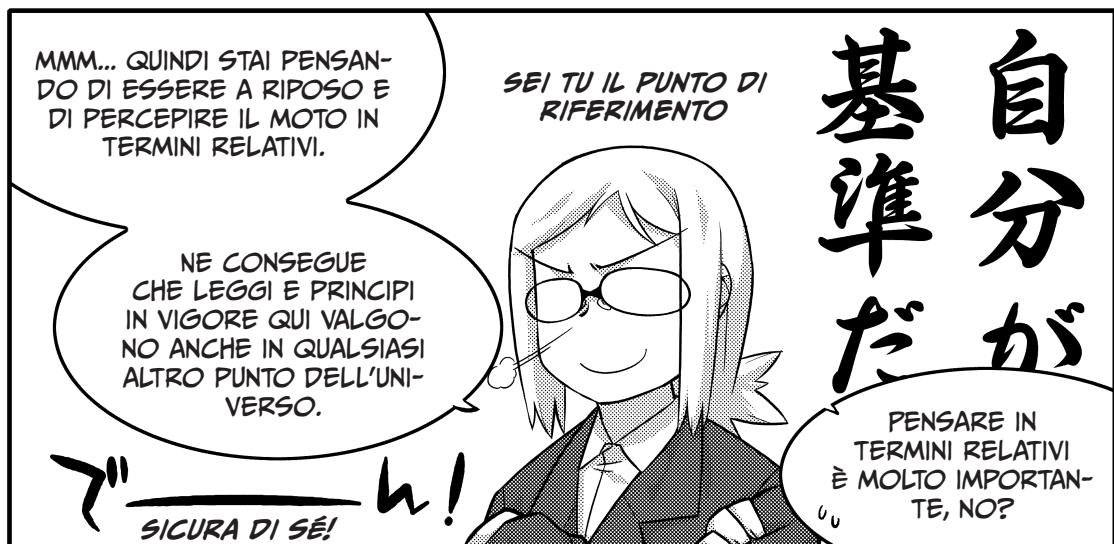
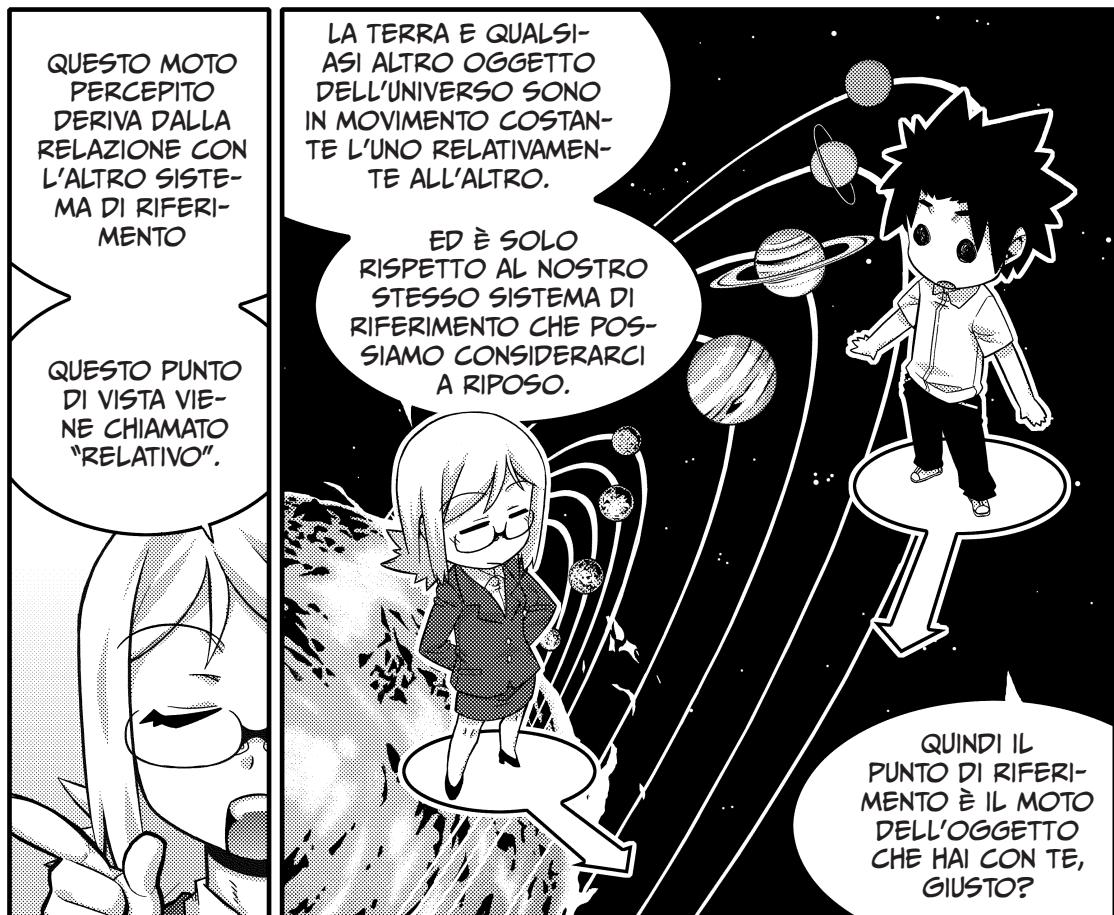
CLACK
CLACK

CLACKITY
CLACK

SUPPONI PER ESEMPIO DI TROVARTI SUL TRENO A, MEN-
TRE VIAGGIA A 50 KM/H, E DI SUPERARE IL TRENO B, CHE A SUA VOLTA STA VIAGGIANDO A 50 KM/H NELLA DIREZIONE OPPOSTA.

UNA PERSONA SUL TRENO B TI VEDRÀ PASSARE ALLA VELOCITÀ DI 100 KM/H.

CAPISCO.
IN EFFETTI È PRO-
PRIO QUELLO CHE SEMBRA.



NEL XVII SECOLO
NEWTON SINTETIZZÒ
DIVERSI PRINCIPI NELLE
SUE "TRE LEGGI DEL
MOTO".

FURONO QUESTE
A COSTITUIRE LE BASI
DELLA MECCANICA
NEWTONIANA.

PRIMA



IL PRINCIPIO DELLA
RELATIVITÀ GALILEIANA
AFFERMA IN SOSTANZA CHE
LE TRE LEGGI DI NEWTON
VALGONO IN TUTTI I
SISTEMI INERZIALI.

LE TRE LEGGI DI NEWTON
PRIMA LEGGE: PRIN
SECONDA LEGGE:
TERZA LEGGE: PRIN

ANCHE SE QUESTE LEGGI
SONO STATE FORMULATE
SECOLI FA, ANCORA OGGI
LE UTILIZZIAMO IN MOLTE
SITUAZIONI.

UH?

COSA INTENDE CON
"MOLTE SITUAZIONI"?

OTTIMA
DOMANDA,
MINOGI.

ESISTE UN
FENOMENO CHE
LA MECCANICA
NEWTONIANA NON
SPIEGA.

SI TRATTA
DELLA VELO-
CITÀ DELLA
LUCE.

3. IL MISTERO DELLA VELOCITÀ DELLA LUCE

NON LO SPIEGA PERCHÉ È COME LE REGOLE DEL NOSTRO PRESIDE FUORI DI TESTA...



1. ONORA IL TUO PRESIDE
2. FAI OGNI GIORNO UNA BUONA AZIONE PER IL TUO PRESIDE
3. NON CRITICARE IL PRESIDE
4. NON DARE TROPPO DA MANGIARE AL VICEPRESIDE.



AH, AH, AH! QUESTE REGOLE METTEREBBERO IN GINOCCHIO ANCHE NEWTON!

QUESTI SONO REGOLAMENTI SCOLASTICI!

IO STO PARLANDO DELLA VELOCITÀ DELLA LUCE!

E QUINDI?

OUCH!

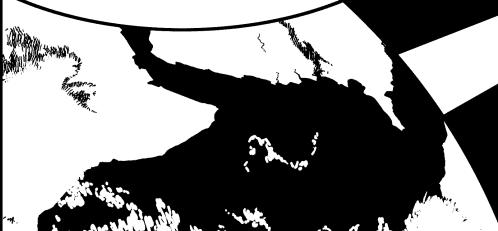
NON CERCARE DI CAMBIARE ARGOMENTO!

MA ESISTE UN LEGAME TRA LA VELOCITÀ DELLA LUCE E LA RELATIVITÀ?

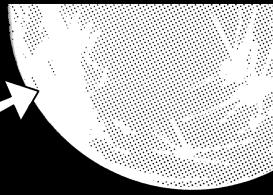
ASSOLUTAMENTE SÌ!



NON È ESAGERATO DIRE CHE LA TEORIA DELLA RELATIVITÀ È NATA INTORNO AL MISTERO DELLA VELOCITÀ DELLA LUCE!



PIÙ O MENO ALL'EPoca
DELLA NASCITA DI EINSTEIN,
NEL 1879, DOPO VARI ESPE-
RIMENTI SI SAPEVA CHE LA
VELOCITÀ DELLA LUCE ERA DI
CIRCA 300.000 CHILO-
METRI AL SECONDO.



LA DISTANZA TRA LA
TERRA E LA LUNA È DI
CIRCA 380.000 KM

ALLA VELOCITÀ DELLA
LUCE, VIENE COPERTA
IN 1,3 SECONDI.

ANCHE SE ABBIAMO L'IM-
PRESSIONE CHE LA TRA-
SMISSIONE SIA ISTANTANEA,
LA LUCE VIAGGIA QUINDI A
UNA VELOCITÀ BEN PRECISA.



NON SI SAPEVA MOLTO AL-
TRO, MA ALL'EPoca QUESTO
ERA UN FATTO STRAORDI-
NARIO. MA POI AVVENNE UNA
SCOPERTA ANCORA
PIÙ INCREDIBILE.



TA DA!

EHM



NEL 1864, JAMES CLERK
MAXWELL FORMULÒ LE
EQUAZIONI CHE PORTANO
IL SUO NOME, CHE UNIFI-
CARONO ELETTRICITÀ E
MAGNETISMO.

James Clerk
Maxwell
(1831 ~ 1879)



HAI DETTO CHE...
UNIFICARONO
ELETTRICITÀ E MA-
GNETISMO?

ECCO
QUA!

LE EQUAZIONI DI MAXWELL, CHE TRALASCIERÒ PERCHÉ SONO COMPLICATE, RIUSCIRÒ A DESCRIVERE PERFETTAMENTE ELETTRICITÀ E MAGNETISMO...

PER LA CRONACA, ECCOLA QUA.

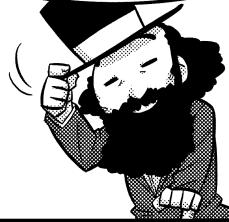
...E CHIARIRONO CHE LA LUCE È UN'ONDA ELETROMAGNETICA CHE VIAGGIA A VELOCITÀ COSTANTE.

$$C = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}$$

E SAPPIAMO QUESTE COSE DA UN'EQUAZIONE?

LE EQUAZIONI DI MAXWELL PREDICEVANO LA STESSA VELOCITÀ CHE RISULTAVA DALLE MISURE Sperimentali E L'AFFERMAZIONE CHE FOSSE COSTANTE VENNE PRESA MOLTO SERIAMENTE.

SI TRATTAVA DI UN CONCETTO IMPORTANTE.



GRAZIE...



...GRAZIE MILLE.

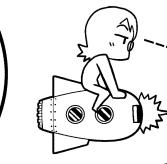


CAPISCO, MA DOV'È IL PROBLEMA SE LA VELOCITÀ DELLA LUCE È COSTANTE?

NELLA MECCANICA NEWTONIANA, CON CUI SI PENSABA DI POTER SPIEGARE TUTTE LE LEGGI DELLA FISICA, SI ASSUMEVA CHE LA VELOCITÀ DI UN OGGETTO IN MOVIMENTO DIPENDESSE DALL'OSERVATORE.

MECCANICA NEWTONIANA

OSSERVATO DAL RAZZO, IL MISSILE VOLA A 10 KM/S



MISSILE SPARATO A 10 KM/S

OSSERVATO DA UNA PERSONA A TERRA I 10 KM/S DEL RAZZO SI SOMMANO E IL MISSILE HA UNA VELOCITÀ DI 20 KM/S.



VELOCITÀ DELLA LUCE

OSSERVATA DA UN RAZZO IN VOLO AL 90% DELLA VELOCITÀ DELLA LUCE, LA LUCE VA A 300.000 KM/S?!



LUCE EMESSA DAL RAZZO

OSSERVATA DA UNA PERSONA A TERRA, LA LUCE VA A 300.000 KM/S?!



ED È QUI CHE SORGE UN PROBLEMA: SE LA VELOCITÀ DELLA LUCE È COSTANTE, RISPETTO A CHE COSA È COSTANTE?

LA PROPOSTA PER SUPERARE IL PROBLEMA FU L'ETERE, UN MEZZO ASSOLUTO E STAZIONARIO, IN CUI LA VELOCITÀ DELLA LUCE ERA COSTANTE E CHE RIEMPIVA L'INTERO UNIVERSO.

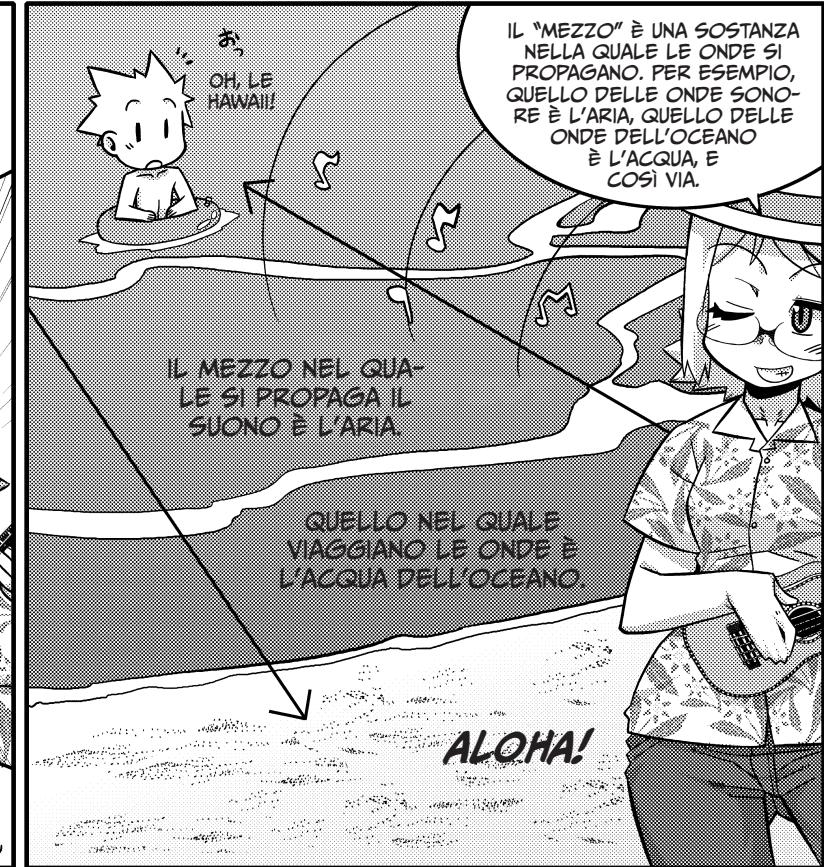
ETERE? HO SENTITO PARLARE DI QUALCOSA DEL GENERE...

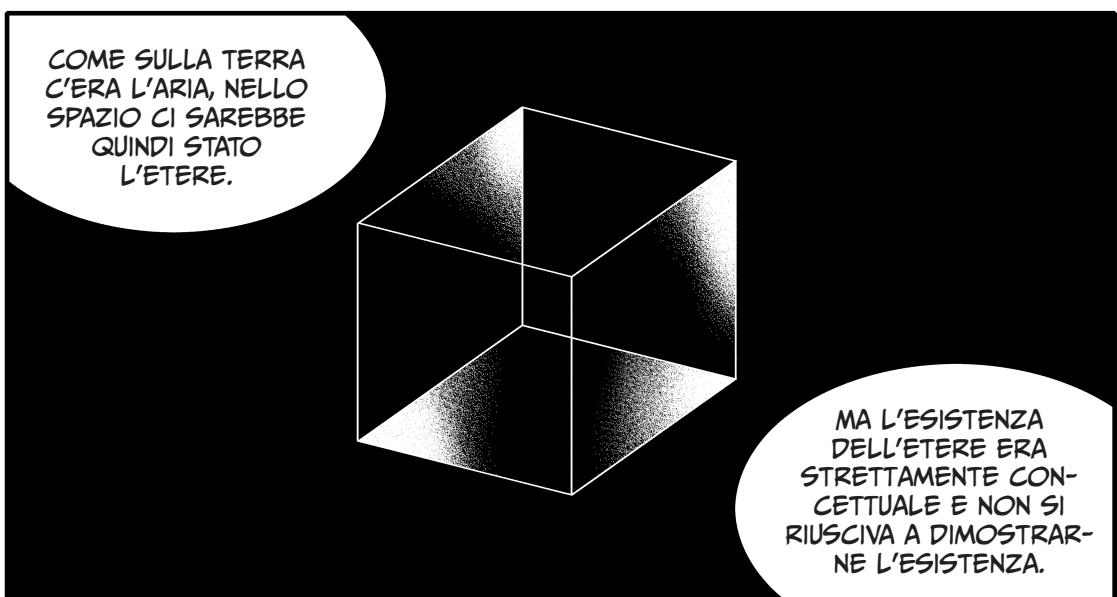
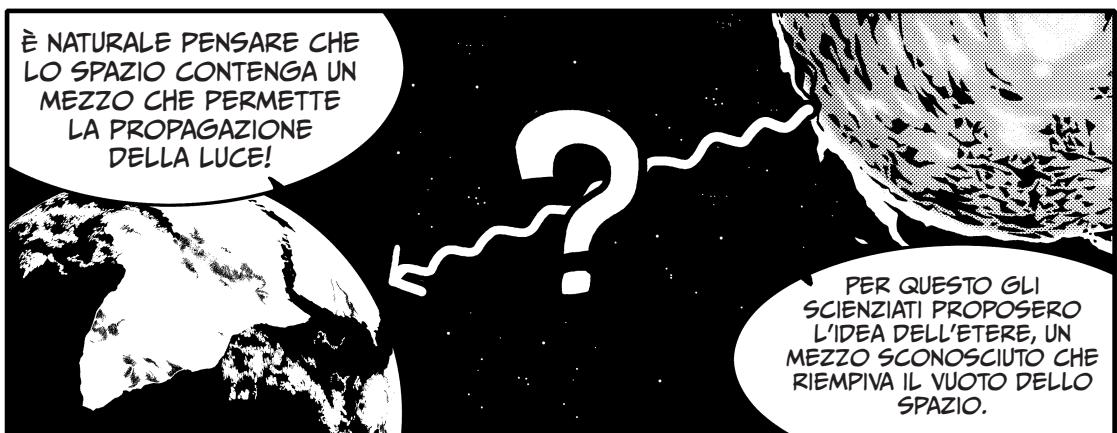
TRATTANDOSI DI UN'ONDA, LA LUCE DOVREBBE ESSERE CONSIDERATA SEMPLICEMENTE COME IL SUONO.

PRIMA TI HO DETTO CHE DALLE EQUAZIONI DI MAXWELL SAPPIAMO CHE LA LUCE È UN'ONDA ELETTROMAGNETICA.

SI PENSO QUINDI CHE FOSSE NECESSARIO UN MEZZO NEL QUALE SI PROPAGASSE.

MEZZO?





ORA TI PARLERÒ DELLO SPAZIO STAZIONARIO ASSOLUTO, MA PRIMA DEVO SPIEGARTI I SISTEMI DI COORDINATE.

E COSA SA-REBBERO?

UN RIFERIMENTO PER MISURARE LA POSIZIONE O L'ISTANTE DI UN CORPO CHE SI MUOVE O CHE È A RIPOSO. IN PAROLE POVERE, È UNA MAPPA PER LA COMPRENSIONE DELLO SPAZIO E DEL TEMPO.



VUOI DIRE COORDINATE COME L'ASSE DELLE X O DELLE Y?

QUELLE SONO UN TIPO DI COORDINATE, MA IL SISTEMA DI CUI PARLO COMPRENDE NON SOLO LO SPAZIO MA ANCHE IL TEMPO.

ANCHE IL TEMPO?

E SI PENSAVA CHE L'ETERE FOSSE COMPRESO IN UN SISTEMA FISSO, CHE NON SI MUOVEVA COME LE COORDINATE XYZ USATE NEI PROGRAMMI 3D.

IMMAGINA CHE QUESTO SIA LO SPAZIO STAZIONARIO ASSOLUTO, CON STELLE E GALASSIE CHE VI GALLEGGIANO.

IN ALTRE PAROLE, SI PENSAVA CHE L'ETERE NON SI MUOVESSE.

ESATTAMENTE. GLI SCIENZIATI ERANO ALLA RICERCA DI UN SISTEMA DI COORDINATE IN CUI L'ETERE FOSSE A RIPOSO, E CHE SAREBBE STATO IL SISTEMA DI COORDINATE ASSOLUTO E STAZIONARIO PER L'INTERO UNIVERSO.

QUESTO ETERE È DECISAMENTE MISTERIOSO, NO?

PENSA ALLO SPAZIO COME A UN ACQUARIO PIENO DI UN'ACQUA CHE CHIAMIAMO "ETERE", INVISIBILE, IMMOBILE E CHE NON OPPONE RESISTENZA.

IL BORDO DELL'ACQUARIO HA DELLE COORDINATE CHE NON CAMBIANO.

È COME SE LE STELLE SI MUOVESSERO ALL'INTERNO DELL'ACQUARIO.

UH... E COSA C'ENTRA
TUTTO CIÒ COL FATTO
CHE LA VELOCITÀ DELLA
LUCE SAREBBE
COSTANTE?



MMM... IL PUNTO È
QUESTO...

PER UNA PERSONA A
RIPOSO NELLO SPAZIO STAZIONARIO
ASSOLUTO, LA LUCE
VIAGGIA A 300.000
KM/S.

IN ALTRE PAROLE, SI
PENSAVA CHE LA VELOCITÀ
DELLA LUCE AVESSE
IL VALORE COSTANTE DI
 $299.792.458 \text{ m/s}$ SOLO
SE OSSERVATA DALLO
SPAZIO STAZIONARIO
ASSOLUTO.

LA LUCE
VIAGGIA A
300.000 KM/S.

A QUESTO PUNTO, CHE
COSA SUCCIDE SE LA
VELOCITÀ DELLA LUCE
VIENE OSSERVATA DA UN
SOGGETTO DISTINTO DAL
LO SPAZIO STAZIONARIO
ASSOLUTO, CIÒ È DA
QUALCOSA IN MOVIMENTO?

OSSERVATORE A
RIPOSO

QUESTA È UNA
DOMANDA IMPORTANTE.

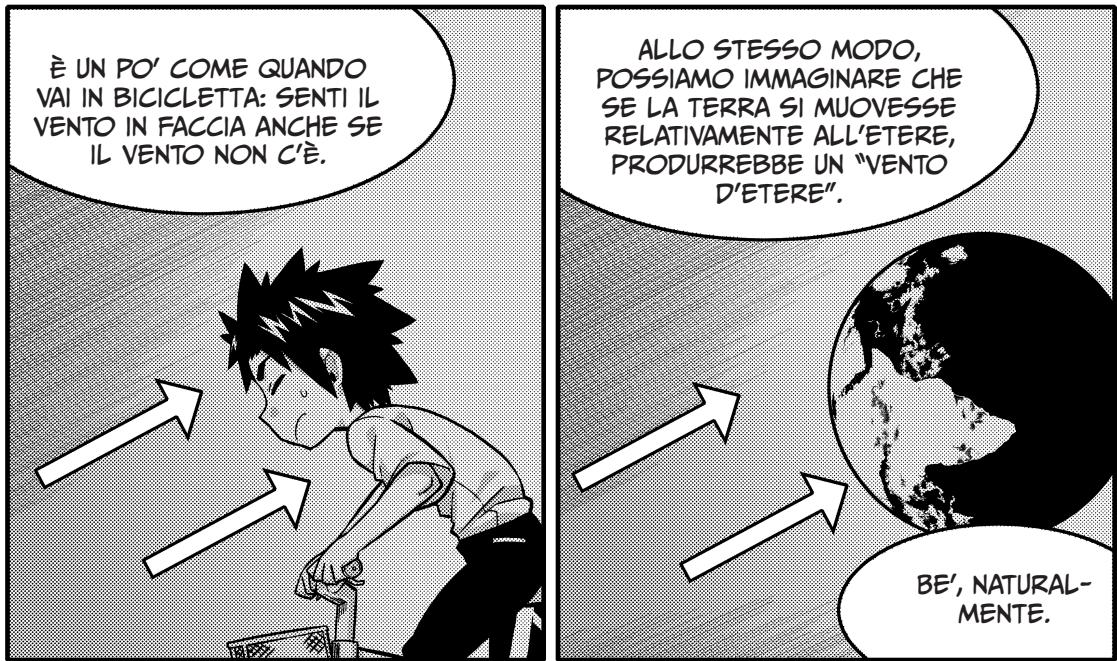
SI PENSAVA
CHE SE LA LUCE FOSSE
STATA OSSERVATA DA
QUALCOSA IN MOVIMENTO
ATTRaverso lo SPAZIO
STAZIONARIO ASSOLUTO,
LA SUA VELOCITÀ
SAREBBE APPARSA
DIVERSA.

OSSERVATORE IN MOTO

LA VELOCITÀ
DELLA LUCE È
SEMPRE 300.000
KM/S?

NON È
PIÙ COSTANTE,
GIUSTO?

ESATTO.



UH, VEDIAMO... QUESTO
VUOL DIRE CHE SE ESI-
STESSE UN "VENTO CON-
TRARIO" RELATIVAMENTE
ALL'ETERE...

VENTO DI
ETERE

LUCE

VENTO DI
ETERE



VELOCITÀ DELLA LUCE
MISURATA DALLA TERRA

VELOCITÀ DELLA LUCE
(300.000 KM/S)

COMPONENTE
DOVUTA AL VENTO
DI ETERE

...SECONDO LA MECCANI-
CA NEWTONIANA, LA LUCE
OSSERVATA DALLA TERRA
AVREBBE UNA VELOCITÀ DI
"300.000 KM/S + SPINTA
DA VENTO DI ETERE"?

ESATTAMENTE.

Albert
Abraham
Michelson

I DUE FISICI
MICHELSON E MORLEY
CERCARONO DI MISURARE
L'EFFETTO "VENTO DI ETERE"
MISURANDO CON GRANDE PRE-
CISIONE LA VELOCITÀ
DELLA LUCE.

Edward
Williams
Morley

UN ESPERIMENTO
FANTASTICO, NO?

SE AVESSE AVUTO SUCCESSO,
AVREMMO TROVATO LA VELOCITÀ
DELLA TERRA RELATIVAMENTE
ALLO SPAZIO STAZIONARIO
ASSOLUTO.

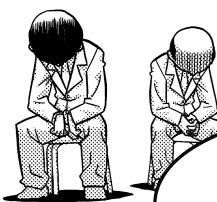
SAREBBE STATO UN ESPE-
RIMENTO EPOCALE, CHE
AVREBBE DEMONSTRATO SIA
L'ESISTENZA DELL'ETERE
CHE QUELLA DELLO SPAZIO
STAZIONARIO ASSOLUTO.

E COME
ANDÒ?

NON RIUSCIRONO
A MISURARE NESSUN
"VENTO D'ETERE".

IL RISULTATO DELL'ESPE-
RIMENTO DI MICHELSON E
MORLEY FU MOLTO POCO
CHIARO, PERCHÉ NONOSTAN-
TE LO SPOSTAMENTO CONTI-
NUO DELLA TERRA ATTRAVER-
SO LO SPAZIO...

...LA MISURA DELLA
VELOCITÀ DELLA LUCE
SULLA TERRA RESTAVA CO-
STANTE. ERA UN RISULTATO
INCOMPATIBILE CON LA
STESSA IDEA DI ETERE E
CHE SEMBRAVA VIOLARE
IL PRINCIPIO DI RELATIVITÀ
GALILEIANO.



QUINDI SEMBRA CHE LA
VELOCITÀ DELLA LUCE
FOSSE COSTANTE E CHE
NON CAMBIASSE NEMMENO
QUANDO VENIVA OSSER-
VATA DA UN OGGETTO IN
MOVIMENTO?



LA VELOCITÀ DELLA LUCE
È 300.000 KM/S OSSER-
VATA A RIPOSO.

LA VELOCITÀ DELLA LUCE
È 300.000 KM/S ANCHE
QUANDO VIENE OSSERVA-
TA IN UNO STATO DI MOTO.

MMM... LA
COSTANZA DELLA
VELOCITÀ DELLA LUCE
ERA UNA FACCENDA
SERIA, CHE NON SI
POTEVA SPIEGARE COL
PRINCIPIO DI RELATIVITÀ
GALILEIANO.

4. EINSTEIN SCARTA LA MECCANICA NEWTONIANA.

POI ARRIVÒ SULLA SCENA IL FAMOSO EINSTEIN!

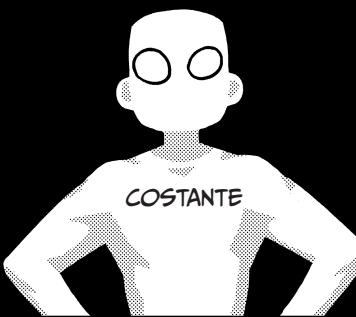
OH! ERA ORA!



EINSTEIN
INCORPORÒ LA CO-
STANZA DELLA VELO-
CITÀ DELLA LUCE IN
UNA NUOVA TEORIA.

IN BREVE, SCARTÒ LE NOZIONI DELLA MECCANICA NEWTONIANA, BASATE SUL PRINCIPIO DI RELATIVITÀ DI GALILEO...

E IPOTIZZÒ CHE LA
VELOCITÀ DELLA LUCE
FOSSE COSTANTE INDIPEN-
DENTEMENTE DA CHI FOSSE
L'OSSERVATORE.



UN PUNTO DI
VISTA ASSO-
LUTAMENTE
ORIGINALE!

PROPOSE INOLTRE
UN NUOVO PRINCIPIO DI
RELATIVITÀ IN SOSTITUZIO-
NE DI QUELLO DI GALILEO.
SECONDO IL NUOVO PRIN-
CIPIO, OGNI LEGGE FISICA,
COMPRESSE QUELLE CHE RI-
GUARDAVANO LA LUCE, VALE
ESATTAMENTE ALLO STESSO
MODO INDIPENDENTEMENTE
DAL SISTEMA DI RIFERI-
MENTO INERZIALE.

**È QUESTA LA
TEORIA DELLA RELA-
TIVITÀ SPECIALE DI
EINSTEIN!**

IN ALTRE PAROLE, SO-
STENEVA CHE NON ERA
NECESSARIO RISERVA-
RE UN TRATTAMENTO
SPECIALE ALLA LUCE,
GIUSTO?

GIUSTO.

SECONDO EINSTEIN,
SIA L'UNIVERSO CHE
LA TERRA SONO COSTANTE-
MENTE IN MOVIMENTO E
QUINDI NON È POSSIBILE
AFFERMARE CHE VI SIA
UN QUALCHE PUNTO IN
QUIETE...

SICCOME UN TALE
PUNTO NON ESISTE,
POSSIAMO SEMPLI-
CEMENTE NON POR-
CI IL PROBLEMA.

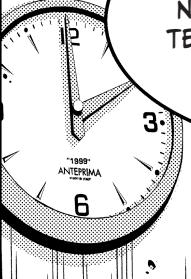
LA TERRA
SI MUOVE.

ANCHE IL SI-
STEMA SOLARE,
CHE CONTIENE
LA TERRA, SI
MUOVE.

LA VIA LATTEA, LA
GALASSIA A CUI AP-
PARTIENE IL SISTEMA
SOLARE, SI MUOVE
PURE LEI.

...E COSÌ VIA,
PER QUALESiasi
COSA CON-
TENGA LA VIA
LATTEA.

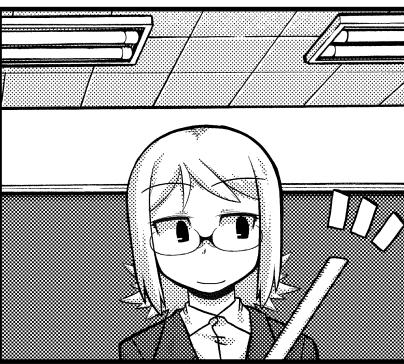
EINSTEIN POSTULÒ CHE
LA VELOCITÀ DELLA LUCE
FOSSE 300.000 KM/S INDI-
PENDENTEMENTE DALL'OS-
SERVATORE, E NON SOLO
SE MISURATA DALLO SPAZIO
STAZIONARIO ASSOLUTO.



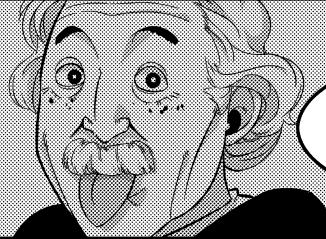
NELLA MECCANICA
NEWTONIANA, SPAZIO E
TEMPO SONO CONCETTI
ASSOLUTI.



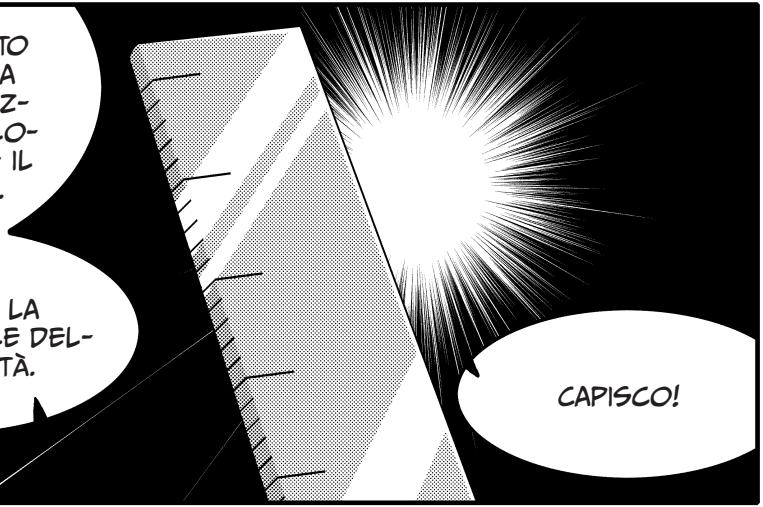
È COSÌ CHE CI
APPAIONO ANCORA
OGGI NELLA VITA DI
TUTTI I GIORNI.



SE NON LO
FOSERO, NON POTREM-
MO STABILIRE L'ORA DI UN
APPUNTAMENTO O MISU-
RARE LE LUNGHEZZE COI
RIGHELLI, NO?



EINSTEIN
RIBALTO QUESTI
CONCETTI!



A PARTIRE DAL POSTULATO
CHE LA VELOCITÀ DELLA
LUCE È COSTANTE, IPOΤΙ-
ΖÒ CHE PROPRIO LA VELO-
CITÀ DELLA LUCE FOSSE IL
CONCETTO ASSOLUTO.

È QUESTA È LA
TEORIA SPECIALE DEL-
LA RELATIVITÀ.

CAPISCO!

LA VELOCITÀ È DATA DALLO SPAZIO PERCORSO DIVISO PER IL TEMPO IMPIEGATO, GIUSTO?

PERCIÒ, VISTO CHE LA VELOCITÀ DELLA LUCE È COSTANTE IN QUALSIASI SISTEMA DI RIFERIMENTO, LO SPAZIO E IL TEMPO DIPENDONO DAL MOTO DELL'OSSESSORATORE. QUESTA È UNA PREMESSA FONDAMENTALE ALLA RELATIVITÀ SPECIALE!

IN EFFETTI SUONA DAVVERO STRANO... MA È TUTTO VERO, NO?

"TEMPO" E "SPAZIO", CHE NELLA MECCANICA DI NEWTON ERANO DISTINTI...

...ORA VENGONO CONSIDERATI INSIEME, SOTTO FORMA DI UN NUOVO, STUPEFACENTE SISTEMA DI COORDINATE CHIAMATO SPAZIOTEMPO.

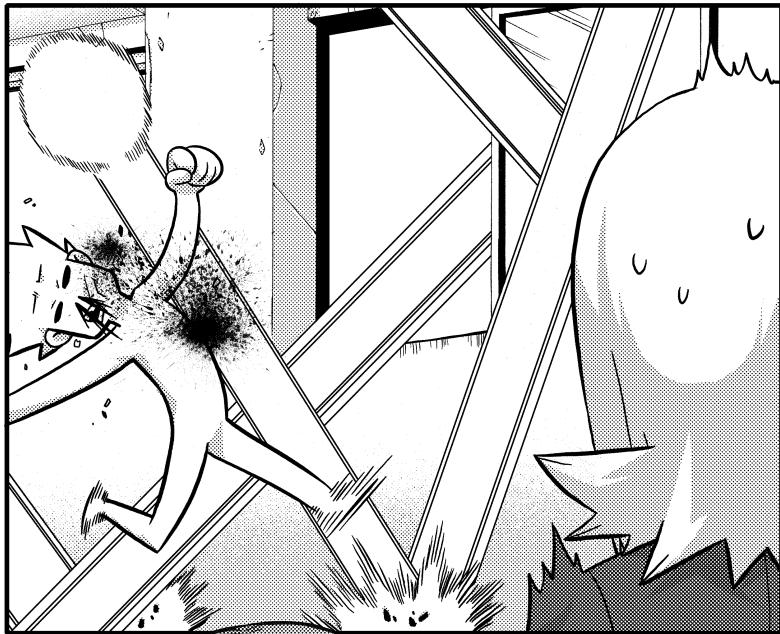
OGNI VOLTA CHE LO DICHI SEMBRA INCREDIBILE.

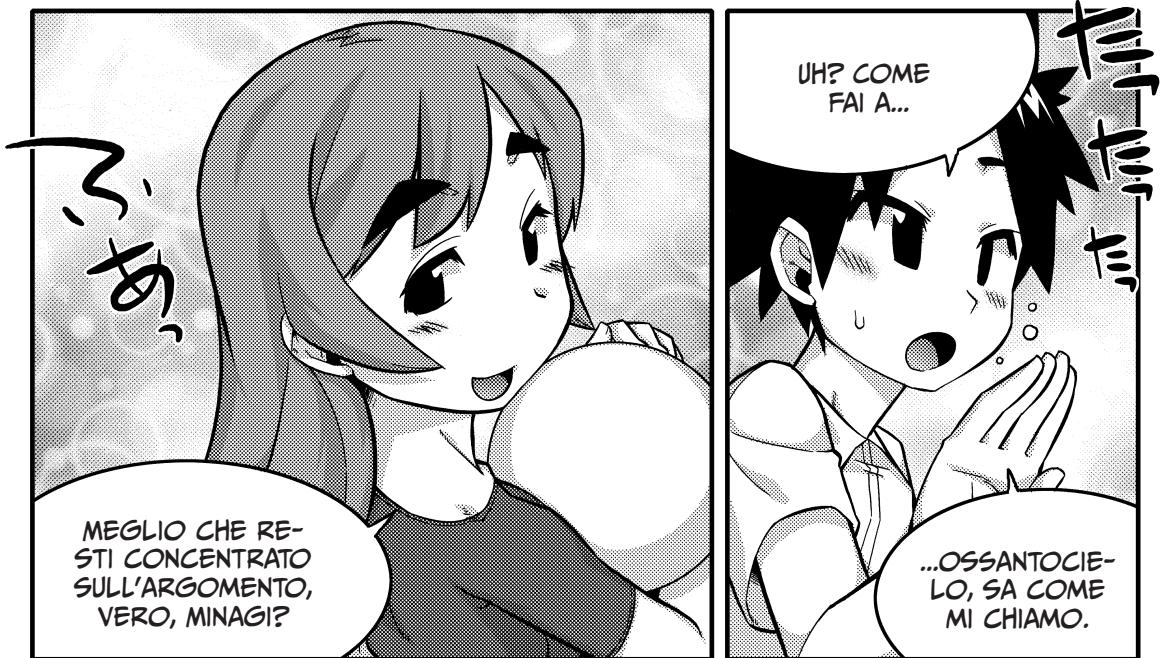
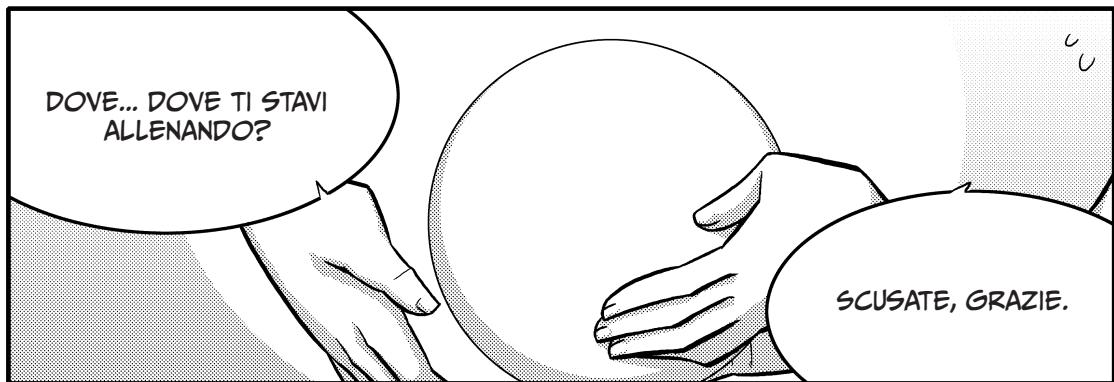
LO È DAVVERO! ORA CERCHERÒ DI SPIEGARE QUAL È IL CUORE DELLA RELATIVITÀ.

SÌ, DAI!

IMPROVVISAMENTE TRABOCCO DI AMBI-
ZIONE!

MI SA CHE STA ESAGERANDO UN POCCHINO...





CHE COS'È LA LUCE?

Le equazioni di Maxwell ci dicono che la luce è un'onda elettromagnetica, il cui colore è determinato dalla lunghezza d'onda. Quella della luce rossa è di 630 nm, quella della luce blu è inferiore (circa 400 nm), dove 1 nm = 1 nanometro = un miliardesimo di metro = 10^{-9} m. A seconda della lunghezza d'onda, la radiazione elettromagnetica può assumere molte forme, manifestandosi per esempio come raggi X o raggi gamma (γ ; v. figura 1.1).

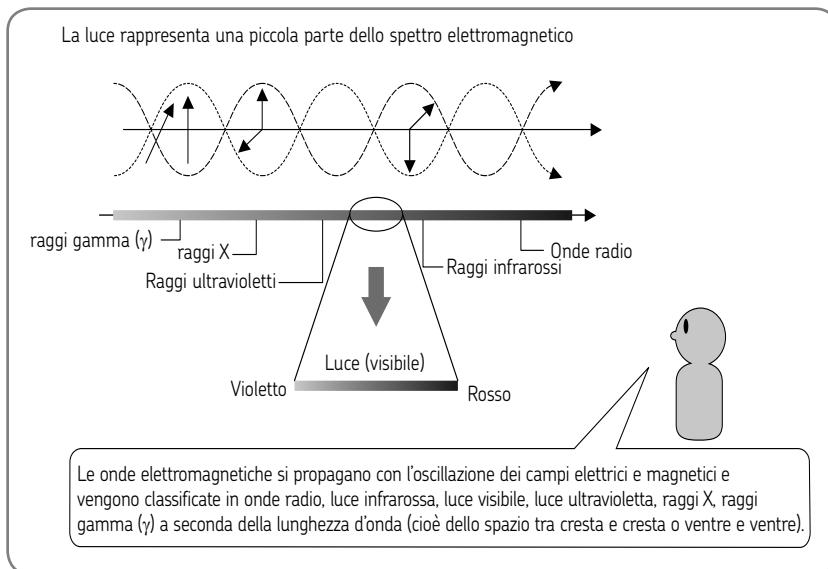


Figura 1.1 – La luce è un'onda elettromagnetica

Anche se può apparirci piuttosto comune – dopotutto, la vediamo tutt'intorno a noi – la luce è fondamentale sia per Relatività che per la Meccanica Quantistica, le pietre angolari della fisica moderna.

Prima però di approfondire la sua vera natura, riassumiamone le proprietà che abbiamo sempre conosciuto.

Per cominciare, sappiamo che la luce viene *riflessa* da uno specchio o dalla superficie dell'acqua. Esiste poi anche la *rifrazione* della luce: basta che vi guardiate i piedi la prossima volta che fate il bagno o vedere come la cannuccia "si piega" ogni volta che la mettete in un bicchiere d'acqua. Ogni passaggio da un mezzo all'altro altera la direzione dell'onda, a causa della variazione di velocità dell'onda.

I vari mezzi rifrangono in misura diversa la luce di lunghezza d'onda diversa. In altre parole, la luce di colori diversi viene deviata di angoli diversi, un fenomeno detto *dispersione*. È questo a distribuire la luce bianca – composta da luce di tutti i colori – nell'intero spettro, dall'infrarosso all'ultravioletto. È la dispersione a rendere visibili i sette colori dell'arcobaleno.

Sono riflessione, rifrazione e dispersione a rendere possibili le lenti di precisione e i telescopi. Nella figura 1.2 vediamo cosa succede alla luce quando viene riflesse, rieffratta o dispersa.

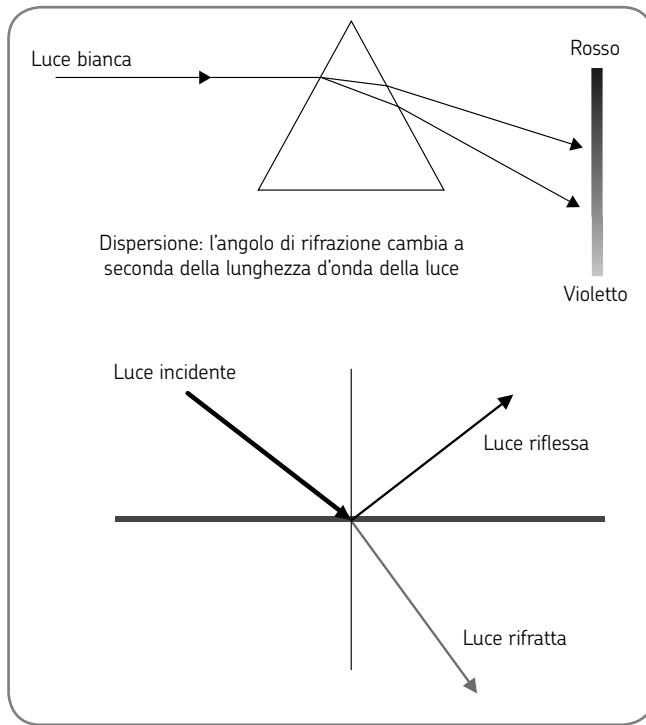


Figura 1.2 – Dispersione, riflessione e rifrazione

È possibile osservare anche fenomeni più sottili, come l'interferenza e la diffrazione, tipiche della natura ondulatoria della luce. L'interferenza è la sovrapposizione di due diverse onde incidenti: il risultato può essere un'*interferenza costruttiva* (quando le ampiezze si sommano) o un'*interferenza distruttiva* (quando le ampiezze si cancellano a vicenda). I diversi tipi di interferenza sono rappresentati nella figura 1.3.

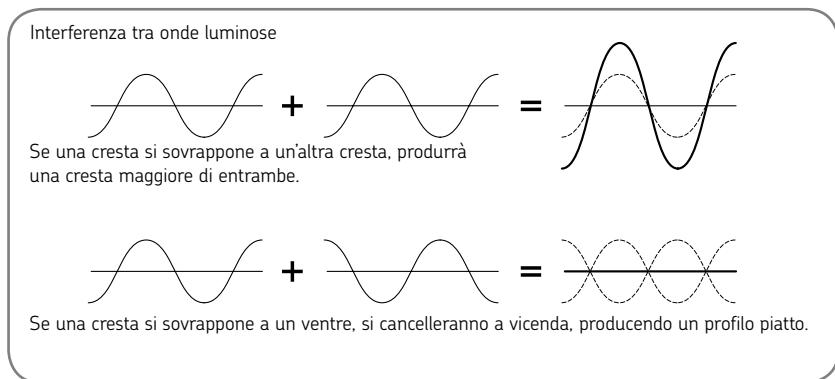


Figura 1.3 – L'interferenza può rafforzare o indebolire un'onda.

La diffrazione si può osservare quando la luce passa attraverso un foro sottile, con dimensioni paragonabili alla lunghezza d'onda. A causa dell'interferenza (costruttiva o distruttiva) di componenti diverse dell'onda luminosa con se stessa, il passaggio dell'onda attraverso la fenditura può causarne la diffusione o la deviazione, come in figura 1.4. Molto spesso è la diffrazione a limitare la risoluzione dei microscopi.

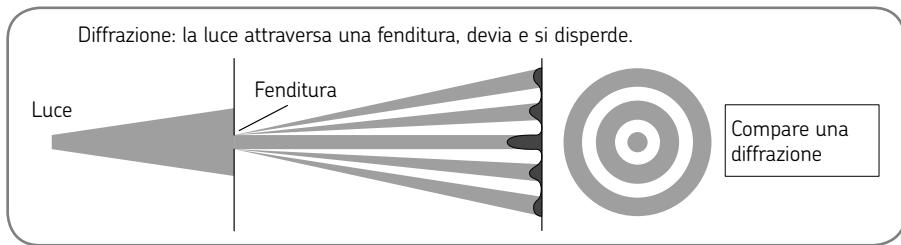


Figura 1.4 – Diffrazione come prodotto di un'interferenza

Un'altra caratteristica della luce è la *polarizzazione*, termine che indica l'orientamento delle componenti trasversali elettriche e magnetiche dell'onda elettromagnetica. Si tratta di una proprietà molto utile, che permette la costruzione di filtri particolari (*filtri polarizzatori*), che consentono il passaggio solo alla luce con una determinata polarizzazione (v. figura 1.5).

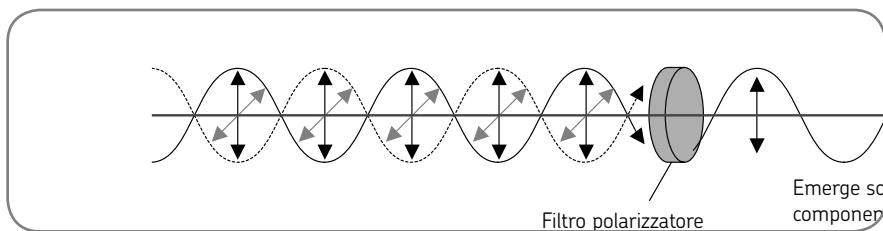


Figura 1.5 – Polarizzazione

Nello *scattering* la luce entra in collisione con particelle di polvere o altro materiale presenti nell'aria e cambia direzione (v. figura 1.6). La luce blu (con una lunghezza d'onda inferiore) viene deviata dalle molecole dell'acqua più della luce rossa (che ha una lunghezza d'onda maggiore) ed è per questo che il cielo ci appare blu.

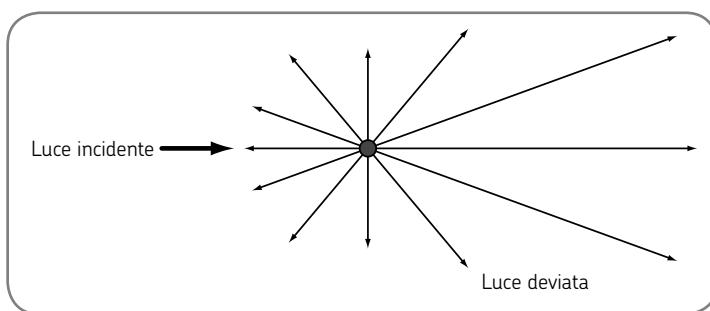


Figura 1.6 – Scattering

LA VELOCITÀ DELLA LUCE È COSTANTE (E IN UN POSTO CHIAMATO SPRING-8 LO DIMOSTRANO OGNI GIORNO)

Per dimostrare che la velocità della luce è effettivamente una costante della natura sono stati condotti diversi esperimenti. Si tratta di un fatto molto importante, perché è uno degli assunti di base della Relatività.

Un modo per verificarlo è misurare la velocità della luce proveniente da un oggetto che si muove molto rapidamente: se non fosse costante, le velocità si sommerebbero in senso newtoniano e la velocità della luce proveniente dall'oggetto sarebbe quella della luce più quella dell'oggetto. Per esempio, se l'oggetto si muovesse a una velocità prossima a quella che pensiamo essere il valore costante di quella della luce, la luce che emette dovrebbe avere una velocità quasi doppia. D'altra parte, se la luce ha velocità costante, quella della luce emessa dall'oggetto non potrà essere superiore. Gli esperimenti confermano che la velocità della luce è sempre la stessa, indipendentemente dall'oggetto da cui proviene (v. figura 1.7).

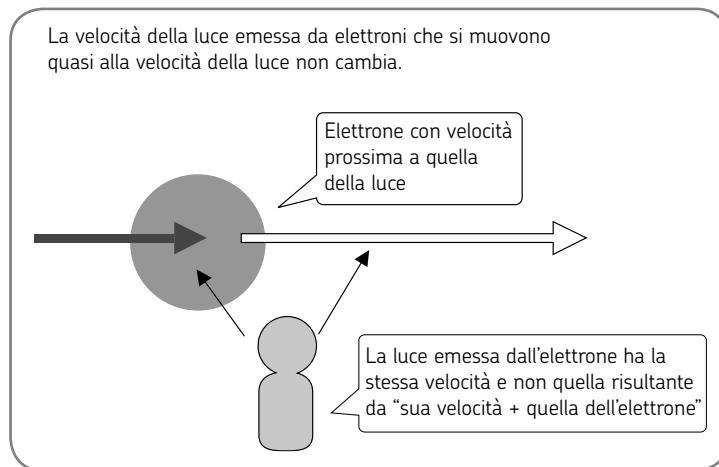


Figura 1.7 - Come a SPring-8 si verifica la costanza della velocità della luce

Imprimere a degli oggetti una velocità vicina a quella della luce per eseguire questi esperimenti è estremamente difficile ed è per questo che servono strutture scientifiche altamente specializzate.

SPring-8 è un acceleratore a luce di sincrotrone situato in Giappone, nella Prefettura di Hyogo, ed è in grado di fare scontrare tra loro elettroni a velocità elevatissime (99,999998% di quella della luce). Oltre a verificare la costanza della velocità della luce, questi esperimenti permettono agli scienziati di conoscere meglio i costituenti di base della materia.

COSA È SIMULTANEO E COSA NO? DIPENDE A CHI LO CHIEDI! (RELATIVITÀ DELLA SIMULTANEITÀ)!

Se partiamo dall'assunto che "la velocità della luce è costante", noteremo diversi strani fenomeni. Uno di questi è la relatività della simultaneità, cioè il fatto che eventi contemporanei per me non lo sono per te.

Immagino già quello che state pensando: "Cosa diavolo vuoi dire?". Torniamo quindi per un attimo sul concetto di "simultaneo". Confronteremo il caso della somma newtoniana delle velocità (somma non relativistica) con quello in cui la velocità della luce è costante (somma relativistica delle velocità).

Mr A sta viaggiando su un razzo a velocità costante rispetto a Mr B, che lo osserva da una stazione spaziale. Supponiamo che Mr A si trovi nel punto medio del razzo, alle due estremità del quale sono stati collocati dei sensori. Mr A lancia delle palle (o emette degli impulsi luminosi) su e giù per il razzo. Cercheremo di analizzare in quale modo (o gli impulsi luminosi) colpiscono i sensori a un capo e all'altro del razzo.

SOMMA NEWTONIANA DELLE VELOCITÀ (CASO NON RELATIVISTICO)

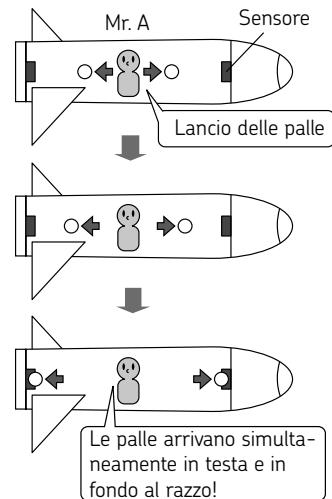
Per cominciare, prima di passare alla Relatività, useremo il moto delle palle per analizzare il caso in cui le velocità si sommano in accordo con la meccanica di Newton.

Per prima cosa, diamo un'occhiata a Mr A (figura 1.8): dal suo punto di vista il razzo è immobile, e le palle – che dal centro del razzo si muovono alla stessa velocità verso i due estremi – raggiungono i sensori "simultaneamente".

Dal punto di vista di Mr B, a bordo della stazione spaziale, il razzo procede nella propria direzione di viaggio. In altre parole, usando come riferimento il punto di partenza delle palle (linea tratteggiata), la parte anteriore del razzo si allontana dalla linea tratteggiata, mentre il retro si avvicina. Ma poiché la velocità del razzo si somma a quella della palla lanciata in avanti, secondo la formula di addizione classica la velocità della palla aumenta e alla fine raggiunge la punta del razzo. D'altra parte, alla velocità della palla lanciata verso la parte posteriore viene sottratta quella del razzo (indicata in figura dalla freccia corta) e il fondo del razzo raggiunge la palla. Pertanto anche Mr B vede le palle arrivare in cima e in fondo al razzo "simultaneamente".

Somma non relativistica:

Mr A osserva il moto delle palle dall'interno del razzo.



Somma non relativistica:

Mr B osserva il moto delle palle dalla stazione spaziale. Siccome le palle sono "solidali" (cioè si muovono insieme) al razzo, nella parte anteriore del razzo la velocità di quest'ultimo si somma a quella della palla, mentre nella parte posteriore si sottrae. Le palle arrivano pertanto "simultaneamente" (le lunghezze delle frecce indicano la differenza di velocità delle palle).

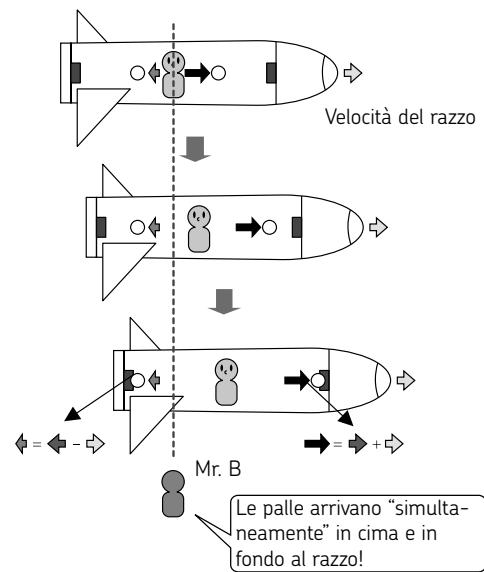


Figura 1.8 – Somma newtoniana delle velocità

SE LA VELOCITÀ DELLA LUCE È COSTANTE (CASO RELATIVISTICO)

Consideriamo ora il caso in cui la velocità della luce è costante. Invece di lanciare delle palle, mentre viaggia a una velocità prossima a quella della luce, Mr A emetterà un raggio di luce (v. figura 1.9).

Supponiamo che la velocità della luce sia costante: Mr A osserva il moto della luce all'interno del missile.

Di nuovo il caso della velocità della luce costante: Mr B osserva il moto della luce dalla stazione spaziale. Siccome la velocità della luce è costante, arriverà prima in fondo al razzo e solo molto dopo in cima.

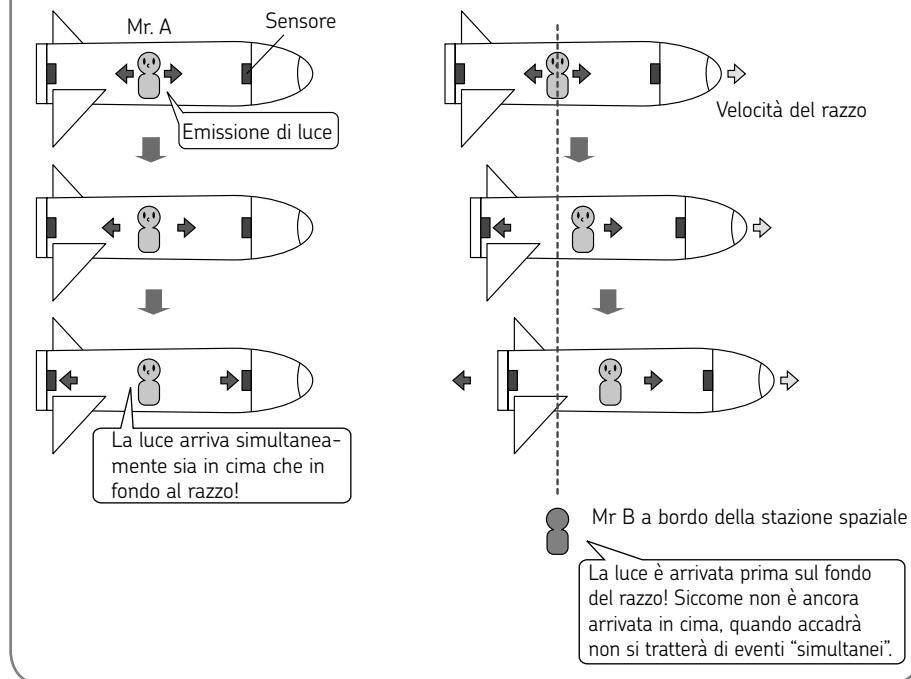


Figura 1.9 – Il caso di velocità della luce costante (somma relativistica delle velocità).

Avrete già capito qual è il punto: l'osservazione di Mr B sarà diversa da quella di Mr A.

Per Mr A, anche se la velocità della luce è costante, la luce arriverà “simultaneamente” in fondo e in cima al razzo.

Al contrario, dal punto di vista di Mr B la luce diretta verso la cima del razzo arriverà molto dopo: deve prima “superare” il razzo, che si muove a una velocità di poco inferiore. Di conseguenza, la luce arriverà in fondo al razzo prima di arrivare in cima.

Esatto: se l'osservazione viene effettuata da Mr B, la luce non arriva “simultaneamente”.

La simultaneità degli eventi dipende dal punto di vista dell'osservatore. È quello che si chiama *relatività della simultaneità*.

IL PRINCIPIO DI RELATIVITÀ E LE TRASFORMAZIONI GALILEIANE

Il Principio di Relatività di Galileo afferma che “dato un sistema di coordinate dal quale vengono effettuate le osservazioni, le leggi della fisica sono sempre le stesse, sia che il sistema sia in quiete o si muova a velocità costante” rispetto all’osservatore. In altre parole, la meccanica newtoniana (le leggi fisiche che regolano il moto) è la medesima nelle due situazioni. Questo principio fu stabilito da Galileo in seguito a un esperimento nel quale una sfera di ferro veniva lasciata cadere dall’albero di una nave, come in figura 1.10 La sfera cadeva ai piedi dell’albero sia che – rispetto alla riva – la nave fosse ferma, sia che si muovesse con velocità costante.

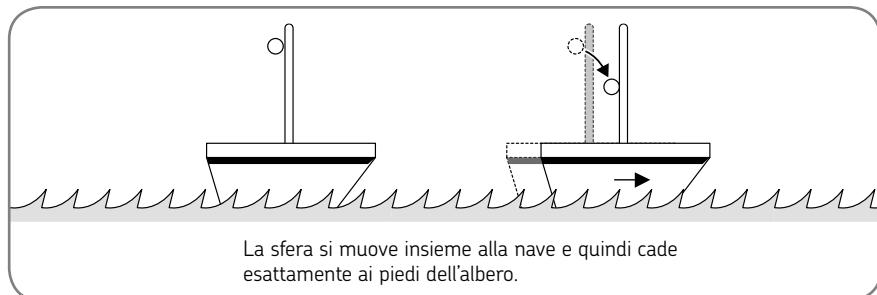


Figura 1.10 – Princípio di Relatività galileiano

Se le leggi della fisica sono le stesse in ogni sistema di riferimento inerziale, in maniera semplice e diretta Galileo giunse a descrivere in quale modo cambiano le osservazioni a seconda del sistema nel quale vengono effettuate.

Oggi usiamo equazioni chiamate trasformazioni galileiane per capire cosa vuol dire che le velocità si “sommano”.

Consideriamo due sistemi, uno con coordinate (x, t) e uno con coordinate (x', t') , dove x e x' indicano la posizione, t e t' il tempo. Conoscendo la velocità relativa dei due sistemi possiamo passare dall’uno all’altro:

$$x' = x - vt$$
$$t' = t$$

Queste equazioni esprimono la relazione tra le coordinate di un sistema a riposo e quelle di un sistema che relativamente a esso si sposta con velocità costante v : le trasformazioni di Galileo collegano tra loro i sistemi inerziali. Confrontandoli per mezzo dell’equazione del moto di Newton, troveremmo che assume la stessa forma in ogni sistema inerziale. In altre parole, il principio di relatività galileiano implica la meccanica newtoniana.

DIFFERENZE TRA IL PRINCIPIO DI RELATIVITÀ GALILEIANO E LA RELATIVITÀ RISTRETTA DI EINSTEIN

Come abbiamo appena visto, il Princípio di Relatività galileiano fa sì che la meccanica newtoniana si applichi in tutti i sistemi inerziali, collegati dalle trasformazioni di Galileo.

D'altra parte, il postulato che la velocità della luce sia costante in tutti i sistemi di riferimento inerziali costrinse gli scienziati a riscrivere le trasformazioni di Galileo in modo che fossero in accordo con la nuova Relatività. Le nuove trasformazioni si chiamano *trasformazioni di Lorentz*.

Sono rappresentate dalle formule in mezzo alla pagina e dicono come passare dalle coordinate di un sistema a riposo a uno che si muove con velocità v rispetto al primo. Le variabili col segno di apice ('') rappresentano le coordinate osservate dal sistema a riposo; quelle senza l'apice sono le coordinate osservate dal sistema in moto con velocità v . Notiamo subito che nelle formule compare la velocità della luce c ; un'altra cosa importante è che il tempo t viene trasformato in maniera simile a quanto accade a una lunghezza: il tempo non esiste in maniera indipendente ma deve essere considerato insieme allo spazio.

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$$
$$t' = \frac{t - \frac{vx}{c^2}}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$$

EHI, UN MOMENTO... COSA SUCCIDE QUANDO SOMMIAMO LE VELOCITÀ?

Se supponiamo che la velocità della luce sia una costante c , cosa succede quando prendiamo in considerazione le velocità?

Secondo il Princípio di Relatività, applicando le trasformazioni di Lorentz la somma delle velocità è data dall'equazione seguente:

$$w = \frac{u + v}{1 + \frac{vu}{c^2}}$$

L'equazione dice che se abbiamo un razzo che viaggia rispetto a terra con velocità v , che spara un missile con velocità (relativamente al razzo) u , la somma w delle due velocità – cioè la velocità del missile misurata da terra – è data da questa espressione. La situazione è riassunta dalla figura 1.11. La differenza è evidente se confrontiamo questa formula con la normale somma (non relativistica) $w = u + v$

Se sostituiamo alcuni valori numerici particolari per le velocità, otteniamo dei risultati interessanti.

Nel caso non relativistico, quando sulla stazione spaziale Mr B osserva il missile sparato dal razzo, se v è la velocità del razzo e u quella del missile osservato dal razzo, allora la somma delle velocità è $w = u+v$.

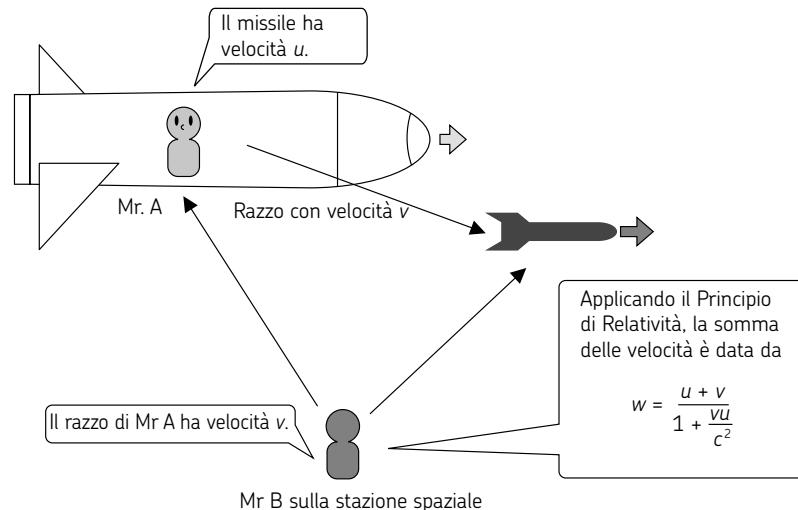


Figura 1.11 - Somma delle velocità

Per esempio, se la velocità del razzo è il 50% di quella della luce ($0,5c$) e quella u del missile rispetto al razzo è anch'essa il 50% di quella della luce ($0,5c$), allora la velocità del missile w , osservata da Mr B sarà l'80% di quella della luce ($0,8c$).

$$w = \frac{(0.5c + 0.5c)}{\left(1 + \frac{(0.5c)^2}{c^2}\right)} = \frac{c}{1.25} = 0.8c$$

Questa equazione fornisce un risultato molto interessante anche quando u e v assumono il valore massimo: se entrambe le velocità sono il 100% di quella della luce (in pratica, per un oggetto dotato di massa, come un razzo, sarà impossibile che $v=c$), allora la velocità w osservata da Mr B sarà la velocità della luce.

$$w = \frac{(c + c)}{\left(1 + \frac{c^2}{c^2}\right)} = \frac{2c}{2} = c$$

In nessun caso è possibile superare la velocità della luce!



COSA VORREBBE DIRE CHE
IL TEMPO RALLENTA?

WOW... CHE CALDO!

DAVVERO COMPLIMENTI...
USARE UNO STUDENTE
COME MAGGIORDOMO
PERSONALE E MANDAR-
LO A COMPRARE UN
GHIACCIOL.

FIUUU

EHI, PERÒ CON
I MIEI SOLDI TI SEI AN-
CHE COMPRATO DEL
MONAKA!

E COMUNQUE VEDI DI NON
LAMENTARTI, VISTO CHE TI STO
INSEGNANDO COMPLETAMENTE
GRATIS! E SENZA FRETTA, MI RAC-
COMANDO, MR TARTARUGA!

NON PUOI PARLARE
IN QUESTO MODO A
UNO STUDENTE...

MA VA BENE. ALLA FINE
C'È QUALCOSA DI FRE-
SCO ANCHE PER ME...
FUORI FA SEMPRE
PIÙ CALDO.

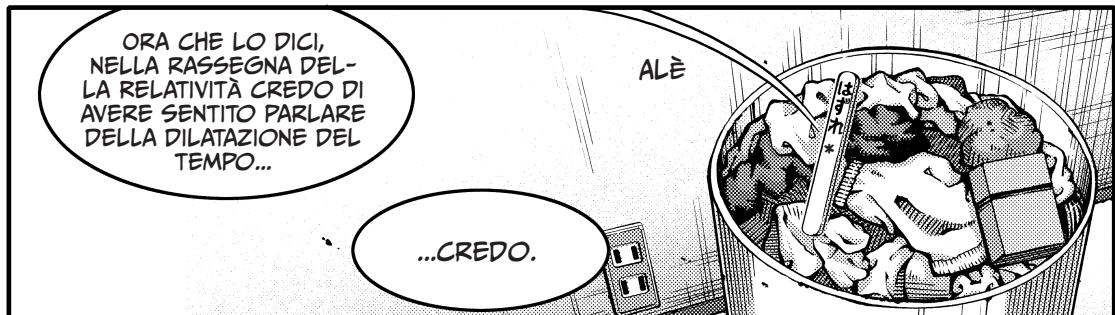
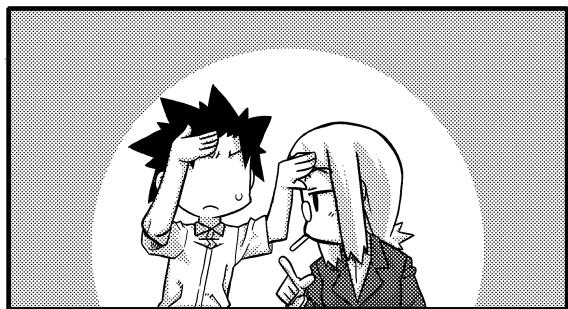
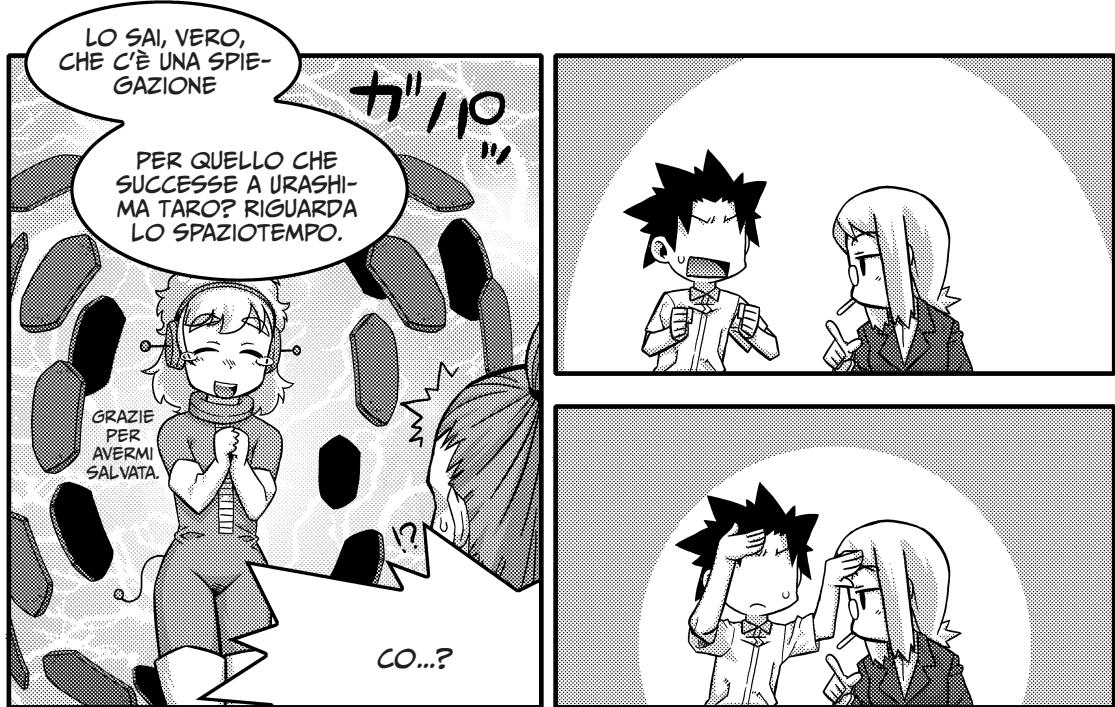
GIÀ. E A PROPOSITO
DI TARTARUGHE, LA
CONOSCI LA STORIA
DI URASHIMA TARO?

UH? ASPETTA...

URASHIMA TARO ERA
QUEL TIPO CHE AVEVA SAL-
VATO UNA TARTARUGA E POI
ERA ANDATO AL PALAZZO
SOTTO IL MARE DEL DIO
DRAGONE.

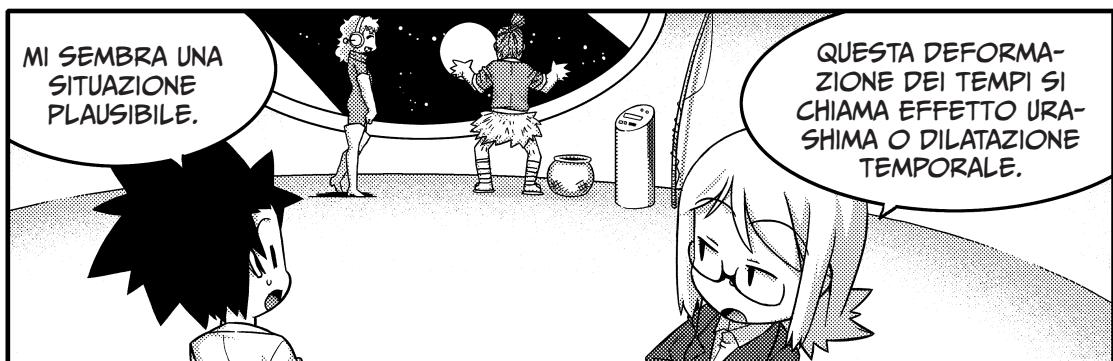
QUANDO
QUALCHE GIORNO DOPO
FECE RITORNO A CASA,
SCOPRÌ CHE SULLA
TERRAFERMA ERANO
PASSATI DEI SECOLI!

STOP!



* FALIMENTO
NDT: IN GIAPPONE, SUI BASTONCINI DEI
GHIACCIOLO CI SONO FRASI E PROVERBI

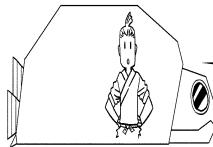
1. L'EFFETTO URASHIMA (LA DILATAZIONE TEMPORALE)



SUPPONIAMO PER ESEMPIO CHE UN'ASTRONAVE DA 10 TONNELLATE LUNGA 100 METRI STIA VOLANDO AL 99,6% DELLA VELOCITÀ DELLA LUCE.

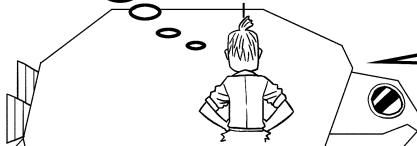
UN OSSERVATORE A BORDO DI UN'ASTRONAVE A RIPOSO PERCEPIRA' UNA CONTRAZIONE DELLA LUNGHEZZA A 9 METRI E UN AUMENTO DELLA MASSA A 110 TONNELLATE.

ESPLORATORE A BORDO DI UN RAZZO CHE VIAGGIA AL 99,6% DELLA VELOCITÀ DELLA LUCE



IL RAZZO DI QUESTO ESPLO-
RATORE SI ALLONTANA AL 99,6%
DI C DALL'ASTRONAVE GE-
MELLA, DOVE SI OSSERVA UNA
LUNGHEZZA DI 9 METRI E UNA
MASSA DI 110 TONNELLATE.

QUEL RAZZO STA
VIAGGIANDO AL 99,6%
DELLA VELOCITÀ DEL-
LA LUCE.



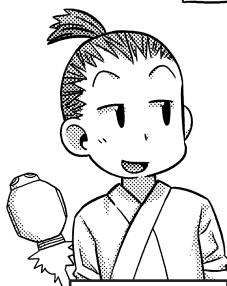
PER L'ASTRONAVE GEMELLA,
NATURALMENTE, LA PROPRIA
LUNGHEZZA È DI 100 METRI
E LA PROPRIA MASSA È DI 10
TONNELLATE.

ASTRONAVE GEMELLA A RIPOSO.

SUPPONIAMO CHE VIAGGI
LONTANO DALLA TERRA PER UN ANNO
(DEL PROPRIO TEMPO), E CHE POI
FACCIA RITORNO: SULLA TERRA SARAN-
NO PASSATI CIRCA 10 ANNI.

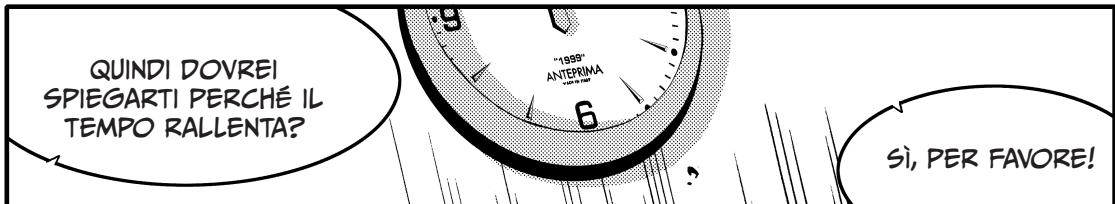
LA STESSA
ETÀ

IN ALTRE PAROLE,
A CAUSA DELL'EF-
FETTO URASHIMA, CI
SARÀ UNA DIFFEREN-
ZA DI 9 ANNI.



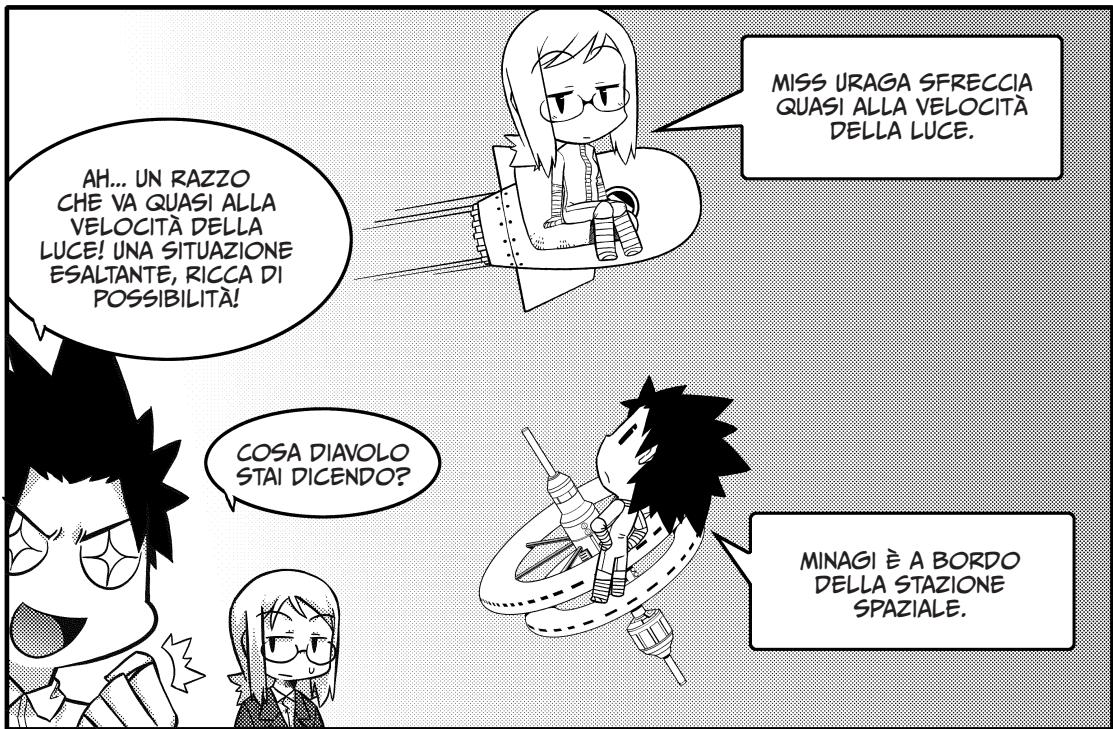


2. PERCHÉ IL TEMPO RALLENTA?





E CHE - QUASI ALLA
VELOCITÀ DELLA LUCE - TI
PASSI DAVANTI IL RAZZO
A BORDO DEL QUALE CI
SONO IO. UN PO' COME
NEL DISEGNO.



TAC!



E SAREBBE QUESTO
LO STRUMENTO PARTI-
COLARE?

SI CHIAMA
OROLOGIO-LUCE!

È UN CILINDRO
LUNGO CIRCA 30 CM
E SERVE A MISURARE
IL TEMPO USANDO
LA LUCE...

IN REALTÀ, È DEL
TUTTO IMMAGINARIO
E SERVE SOLO A
SEMPLIFICARE LA
SPIEGAZIONE!

DI SICURO NON
ASSOMIGLIA A UN
OROLOGIO.



È VERO, MA È
INDISPENSABI-
LE PER I NOSTRI
PROSSIMI ESPERI-
MENTI.

FUNZIONA COSÌ.
LA LUCE ESCE DAL FONDO
DEL DISPOSITIVO E VIENE
RIFLESSA DA UNO SPECCHIO
COLLOCATO IN CIMA, PER
POI TORNARE AL PUNTO DI
PARTENZA.

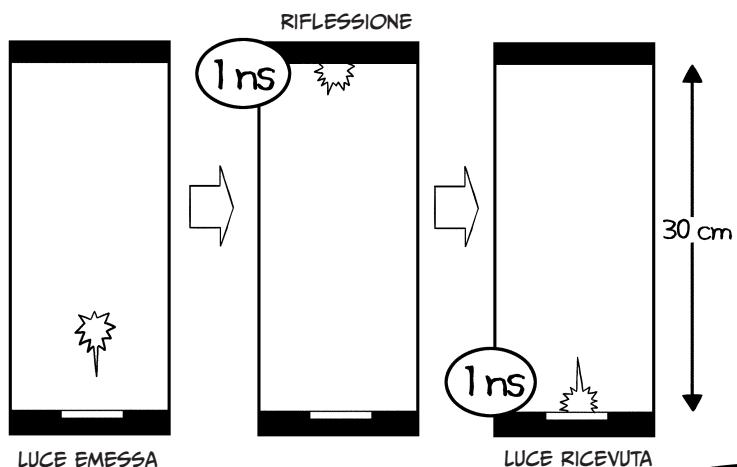


LA LUNGHEZZA DEL TUBO È 30 CENTIMETRI... QUINDI LA LUCE EMESSA IMPIEGA 1 NS (NANOSECONDO, CIOÈ UN MILIARDESIMO DI SECONDO) A RAGGIUNGERE LA CIMA...

E QUANDO VIENE RIFLESSO E TORNA SUL FONDO VIENE REGISTRATO UN ALTRO 1 NS.



FLUSSO TEMPORALE



QUINDI IL TEMPO VIENE MISURATO DAL MOVIMENTO DELLA LUCE, GIUSTO?

SIA MINAGI (A BORDO DELLA STAZIONE SPAZIALE) CHE IO (A CAVALLO DEL RAZZO) ABBIAMO UNO DI QUESTI OROLOGI E ORA VERIFicheremo COME SCORRE IL TEMPO PER CIASCUNO DI NOI.

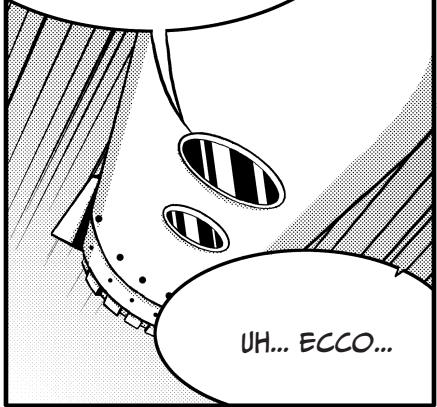
OKAY.

QUANDO OSSERVI L'OROLOGIO A BORDO DELLA STAZIONE SPAZIALE, SEMPLICEMENTE VEDI LA LUCE ANDARE SU E GIÙ.



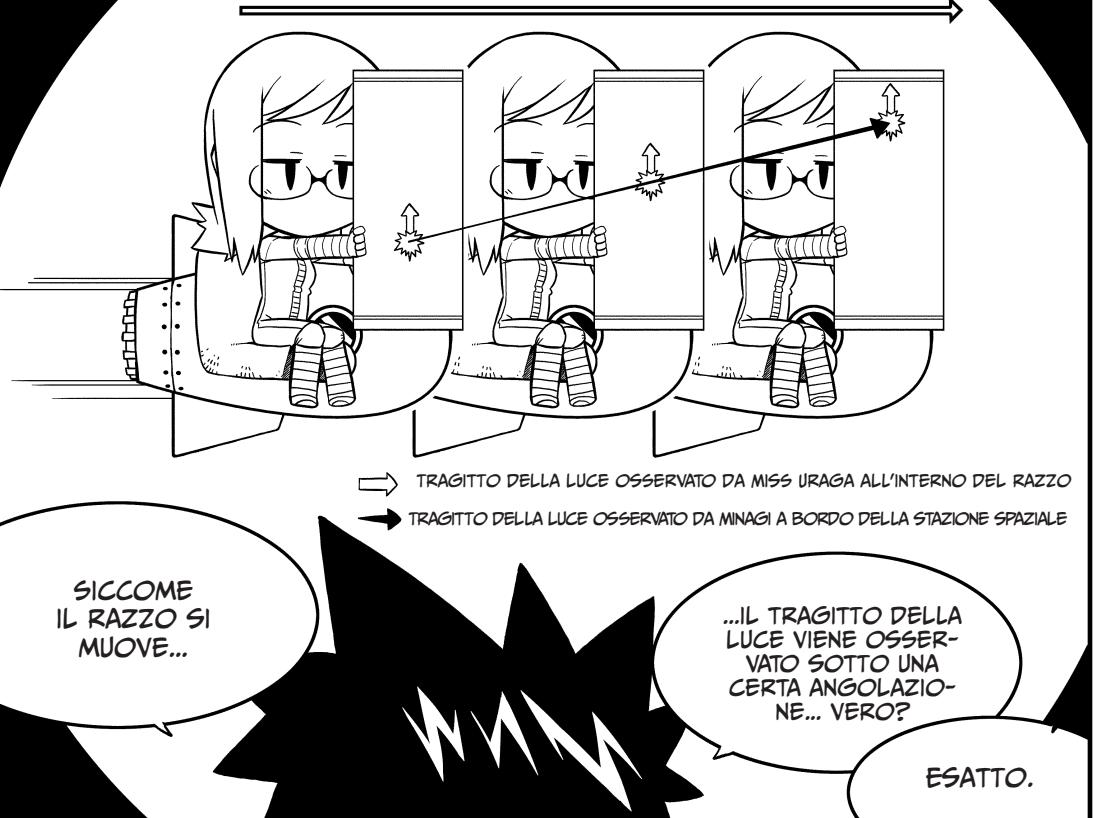
IN EFFETTI
È QUELLO CHE
SEMBRA.

E COSA SUCCIDE SE
OSSERVI L'OROLOGIO-LUCE A BORDO
DEL RAZZO SU CUI
VIAGGIO IO?



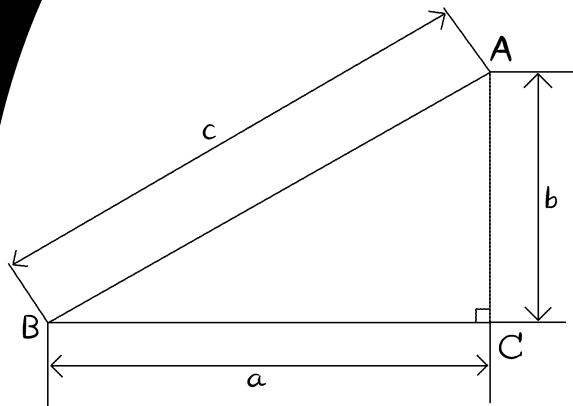
UH... ECCO...

DIREZIONE DEL VIAGGIO...



MINAGI VEDA LA LUCE ALL'INTERNO DEL SUO OROLOGIO ANDARE SU E GIÙ, MA QUELLA ALL'INTERNO DEL MIO LA VEDA PERCORSERE UN TRAGITTO PIÙ LUNGO, SECONDO UN CERTO ANGOLO.

SI SPIEGA FACILMENTE COL TEOREMA DI PITAGORA.



TEOREMA
DI PITAGORA

$$c^2 = a^2 + b^2$$

SECONDO IL TEOREMA DI PITAGORA, "IL QUADRATO DELLA LUNGHEZZA DELL'HIPOTENUSA È UGUALE ALLA SOMMA DEI QUADRATI DELLE LUNGHEZZE DEGLI ALTRI DUE LATI" ... IN ALTRE PAROLE...

È IL TEOREMA
PER CUI NEL TRIANGOLO RETTANGOLARE ABC
VALE LA RELAZIONE
 $c^2 = a^2 + b^2$, OKAY?

SE APPLICHIAMO IL TEOREMA DI PITAGORA ALLE OSSERVAZIONI DEGLI OROLOGI-LUCE, SCOPRIAMO CHE LA LUCE CHE SI MUOVE LUNGO L'IPOTENUSA PERCORRE UNA DISTANZA MAGGIORE ALL'ALTEZZA DELL'OROLOGIO, GIUSTO?

È VERO!

RICORDIAMO CHE SECONDO IL PRINCIPIO DI COSTANZA DELLA VELOCITÀ DELLA LUCE, "LA VELOCITÀ DELLA LUCE È SEMPRE LA STESSA, INDIPENDENTEMENTE DA CHI LA OSSERVA".

QUINDI QUANDO MINAGI OSSERVA L'OROLOGIO A BORDO DELLA STAZIONE SPAZIALE E STABILISCE CHE È TRASCORSO 1 NS, LA LUCE NON AVRÀ ANCORA RAGGIUNTO LA PARTE SUPERIORE DELL'OROLOGIO A BORDO DEL RAZZO.

LA LUCE VIENE EMESSA NELLO STESSO ISTANTE.

UH?

VUOI DIRE CHE LA LUCE NON È ANCORA ARRIVATA IN CIMA ALL'OROLOGIO A BORDO DEL RAZZO?

NON È ANCORA ARRIVATA

EPPURE QUA SÌ.

LO POSSIAMO RAPPRESENTARE COSÌ.

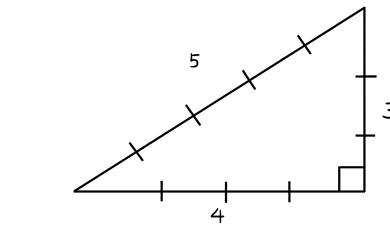


DAVVERO LE COSE VANO COSÌ!?

QUANDO MINAGI VEDE CHE LA LUCE NELL'OROLOGIO A BORDO DEL RAZZO È TORNATA SUL FONDO, SUL SUO OROLOGIO SONO TRASCORSI PIÙ DI 2 NS.

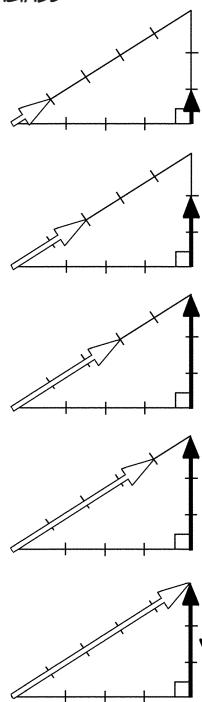
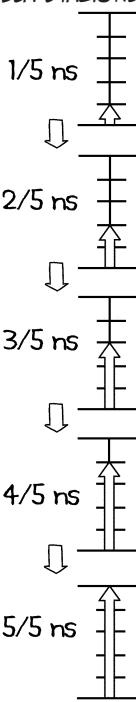
IN ALTRE PAROLE,
SUL RAZZO IL TEMPO
TRASCORRE PIÙ
LENTAMENTE.

ANCHE SE SUONA DAVVERO STRANO,
QUESTO È QUELLO CHE ACCADE.



USIAMO COME ESEMPIO UN TRIANGOLO RETTANGOLARE DI LATI 3, 4 E 5.

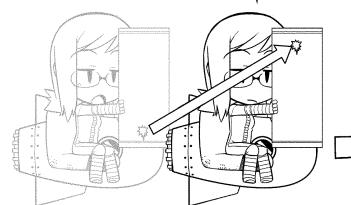
TEMPO TRASCORSO (E TRAGITTO PERCORSO DALLA LUCE) OSSERVATO DA MINAGI, SULLA STAZIONE SPAZIALE



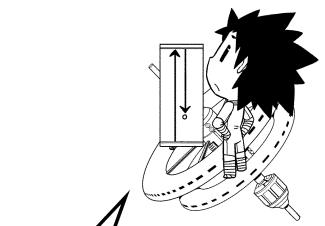
LUCE SULLA STA-
ZIONE SPAZIALE
(OSSERVATA DA
MINAGI)

1/5 ns
2/5 ns
3/5 ns
4/5 ns
5/5 ns

LUCE SUL RAZZO (OS-
SERVATA DA MINAGI)



IL TRAGITTO DELLA LUCE ALL'INTERNO DEL RAZZO, OSSERVATO DALLA STAZIONE SPAZIALE.



IL TRAGITTO DELLA LUCE ALL'INTERNO DELLA STAZIONE SPAZIALE, OSSERVA-
TO DALLA STAZIONE SPAZIALE.

3. IL RALLENTAMENTO DEL TEMPO INFLUENZA ALLO STESSO MODO ENTRAMBI GLI OSSERVATORI

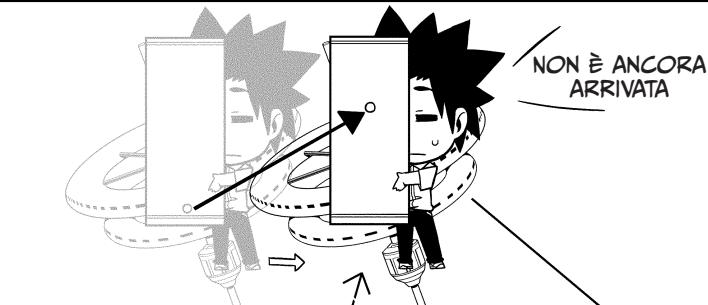


QUESTO PERCHÉ,
VISTA DAL RAZZO, LA STA-
ZIONE SPAZIALE SFRECCIA A
UNA VELOCITÀ PROSSIMA A
QUELLA DELLA LUCE.

ZOOOM!

MMM... E QUANDO
L'OSSERVATRICE È MISS Uraga,
LA LUCE ALL'INTERNO DELL'O-
ROLOGIO DELLA STAZIONE SI
SPOSTA CON UN CERTO
ANGOLÒ...

IN ALTRE PAROLE,
È IL TEMPO DELLA STA-
ZIONE SPAZIALE A RAL-
LENTARE, DICO BENE?



DAL MIO
PUNTO DI
VISTA, SEI
TU CHE TI
ALLONTANI
DA ME!

ARRIVATA!

ESATTO!

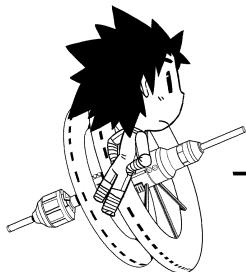
SECONDO QUESTA ANALISI, L'OS-
SERVATORE A BORDO DEL RAZZO
E L'OSSERVATORE SULLA STAZIONE
SPAZIALE PENSERANNO ENTRAMBI
CHE L'OROLOGIO DELL'ALTRO SIA
PIÙ LENTO DEL PROPRIO.

UH?

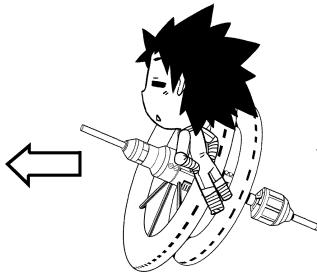
ASPETTA UN
ATTIMO! ...E QUESTO
COSA...?!

CHE SUCCIDE?

OSSERVATO DALLA STAZIONE SPAZIALE, È IL RAZZO CHE SI SPOSTA.



PER IL PRINCIPIO DI RELATIVITÀ, NON C'È
MODO DI DISTINGUERE LE SITUAZIONI



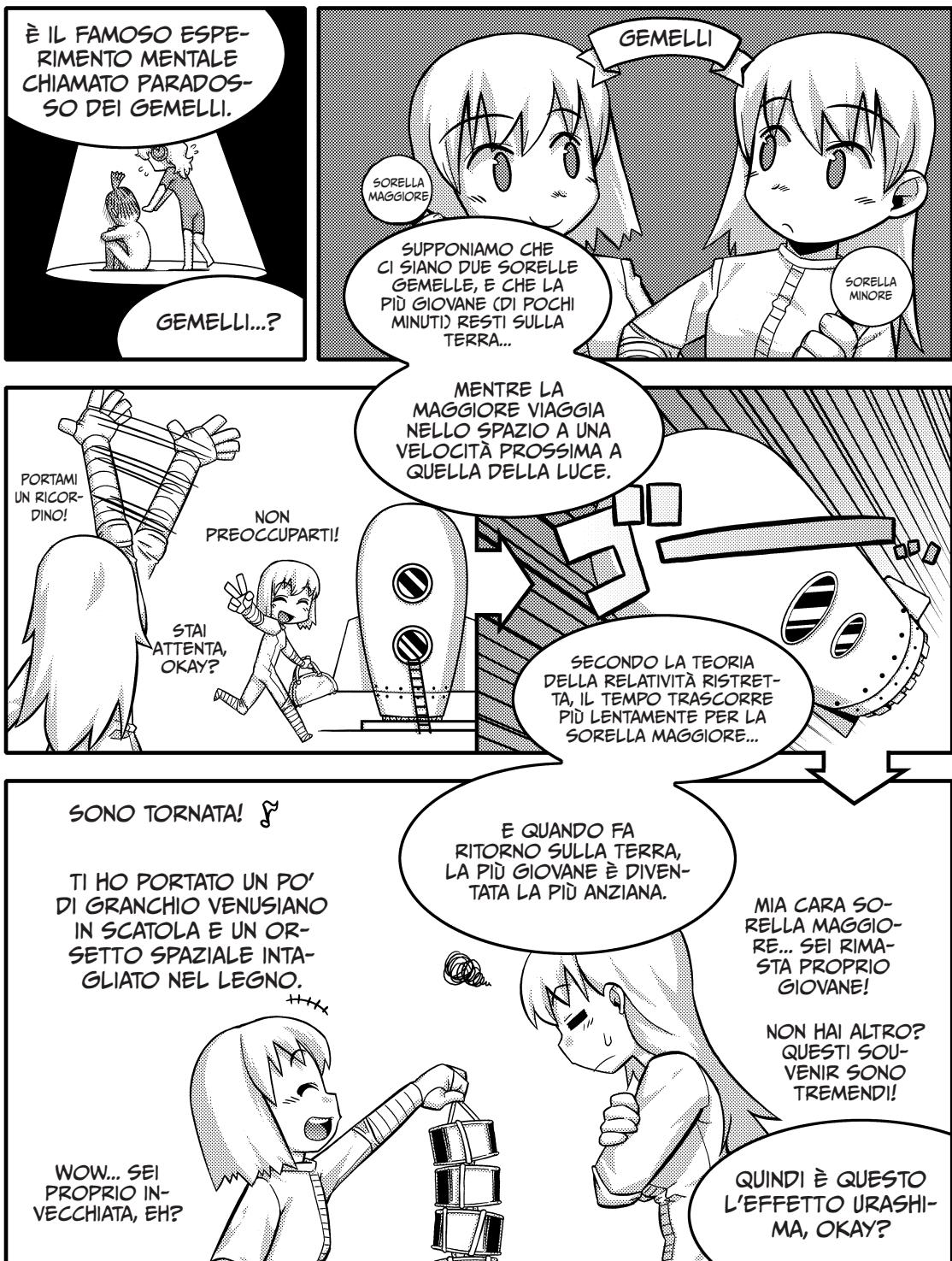
OSSERVATA DAL RAZZO, È LA STAZIONE SPAZIALE CHE SI SPOSTA.

QUESTO VORREBBE DIRE
CHE NON C'È NESSUN
EFFETTO URASHIMA?! È
UNA BUGIA! UNA TRUFFA!

QUANDO L'OSSERVATORE SULLA
STAZIONE SPAZIALE E QUELLO SUL
RAZZO SI INCONTRANO UNA VOLTA
CHE IL RAZZO È TORNATO, NON È
POSSIBILE CHE ENTRAMBI OSSER-
VINO CHE A ESSERE INVECCHIATO È
L'ALTRO. UNO DEI DUE DEVE
PER FORZA SBAGLIARS!

TRUFFA?!

ESATTO! NON È UNA
COSA STRANA?!



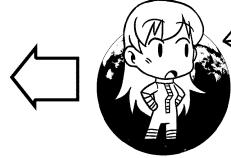
MA DAL PUNTO DI VISTA DELLA SORELLA MAGGIORI, LA TERRA - DOVE È RIMASTA LA PIÙ GIOVANE - SEMBRA MUOVERSI QUASI ALLA VELOCITÀ DELLA LUCE. MI SEMBRA CHE CI SIA UNA CONTRADDIZIONE.

CAPISCO COSA VUOI DIRE...

LA SORELLA PIÙ GIOVANE SOSTIENE CHE, POICHÉ IL RAZZO SI MUOVE, "IL TEMPO DELLA MIA SORELLA MAGGIORA RALLENTA".



ENTRAMBE SOSTENGONO CHE IL TEMPO DELL'ALTRA GEMELLA "RALLENTA". E QUESTO È UN PARADOSSO.



SECONDO LA TEORIA, IL TEMPO RALLENTA PER LA SORELLA MAGGIORI, IN VIAGGIO A BORDO DEL RAZZO, E AL SUO RITORNO SULLA TERRA LA SORELLA MINORE SARÀ PIÙ ANZIANA.

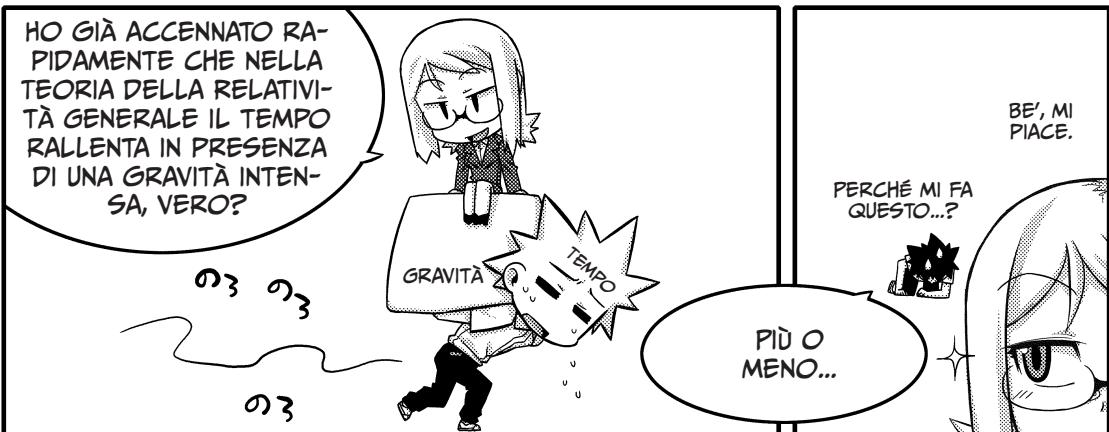
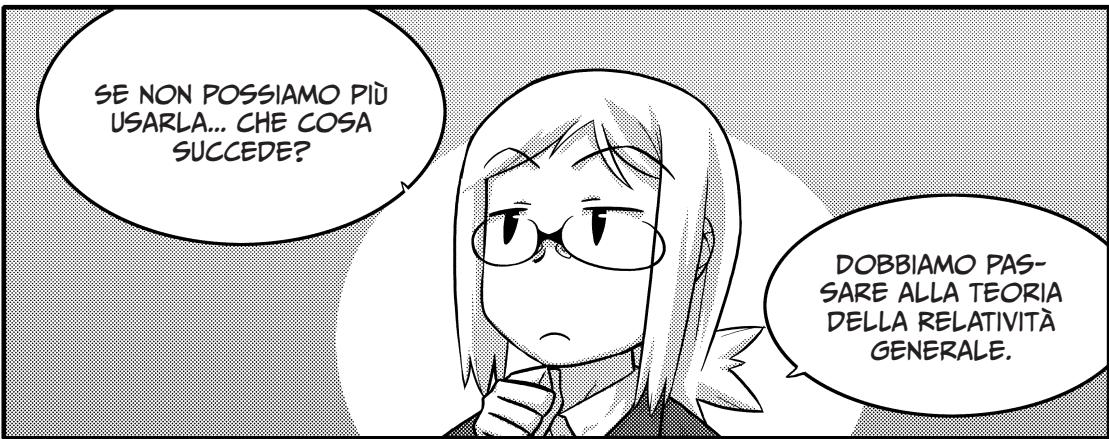
LA SORELLA MAGGIORA SOSTIENE CHE, POICHÉ LA TERRA SI MUOVE, "IL TEMPO DELLA MIA SORELLA MINORE RALLENTA".

IN REALTÀ IL GRANCHIO È DELIZIOSO.

NON TROVI ANCHE TU?

NE AVANZA UN PO'?





PER CERCARE DI RENDERE LE COSE PIÙ SEMPLICI, METTEREMO A PUNTO UN TIPO DI RAZZO PARTICOLARE.

È PERFETTAMENTE SFERICO, CON DEI MOTORI ORIENTATI SIA DAVANTI CHE DIETRO.

SISTEMA DI COORDINATE IN CUI LA TERRA È IN QUIETE.



VELOCITÀ

IL RAZZO SI SPOSTA A VELOCITÀ COSTANTE



ACCELERAZIONE
LA VELOCITÀ DIMINUISCE

IL RAZZO ATTIVA I MOTORI PER DECELERARE E INVERTIRE LA DIREZIONE



LA VELOCITÀ DIVENTA NULLA

IL RAZZO INVERTE LA DIREZIONE



LA VELOCITÀ AUMENTA NELLA DIREZIONE DEL RIENTRO



IL RAZZO SPEGNE I MOTORI UNA VOLTA RAGGIUNTA UNA DETERMINATA VELOCITÀ DI RIENTRO SULLA TERRA, CHE RESTERÀ COSTANTE

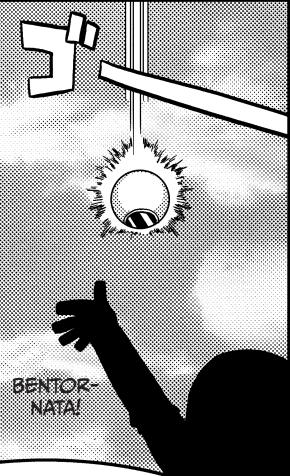
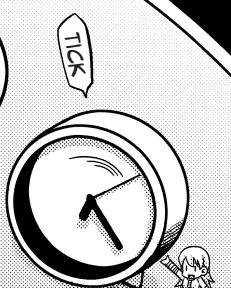
QUANDO IL RAZZO INverte la rotta per tornare sulla Terra...



LA GEMELLA MAGGIORE Vede che a CAUSA DI QUEL CAMPO GRAVITAZIONE LA TERRA INverte LA SUA DIREZIONE. IN ALTRE PAROLE, LA OSSERVA CADERE VERSO DI SE.

DAL SUO PUNTO DI VISTA, È LA TERRA CHE CADE VERSO DI LEI!

A QUESTO PUNTO, VIDE
L'OROLOGIO SULLA TERRA
AVANZARE PIÙ RAPIDAMENTE
DEL SUO.



L'"ACCELERAZIONE"
DELL'OROLOGIO DELLA
TERRA È MAGGIORE DEL "RAL-
LENTAMENTO" CHE LA SORELLA
MAGGIORE HA OSSERVATO MEN-
TRE LA TERRA PROCEDEVA A
VELOCITÀ COSTANTE.

L'ACCELERAZIONE DEL
RAZZO È ANCHE UNA
GRAVITÀ?

PER ORA TI RISPAR-
MIERÒ SPIEGAZIONI
COMPLICATE, MA
DICIAMO CHE...

...IL PRINCIPIO DI EQUIVALENZA
AFFERMA CHE LA FORZA APPA-
RENTE A CUI È SOGGETTA UNA
PERSONA A BORDO DEL RAZZO
A CAUSA DELL'ACCELERAZIONE
È INDISTINGUIBILE DA UN
CAMPO GRAVITAZIONALE.

SI TRATTA DI UN
ASSUNTO FONDAMEN-
TALE FORMULATO DA
EINSTEIN CREANDO LA
TEORIA DELLA RELATI-
VITÀ GENERALE.

PERTANTO, IL TEMPO DELLA SORELLA MAGGIORE RALLENTAVA. E QUESTO VUOL DIRE...

...CHE SI ERA VERIFICATO L'EFFETTO URASHIMA (DILATAZIONE TEMPORALE).

4. L'EQUAZIONE DEL TEMPO CHE RALLENTA

IL TEMPO RALLENTA

PER UN OGGETTO CHE SI MUOVE VELOCE QUASI QUANTO LA LUCE. E INOLTRE...

FRUSC

UH? HO CAPITO BENE?

...BEN PRESTO VENNE RICAVATA L'EQUAZIONE PER CALCOLARE QUESTO RALLENTAMENTO. POSSIAMO FARLO ANCHE NOI, RICORRENDO AL TEOREMA DI PITAGORA.

SICURO. ECCOLA.

TEMPO
DELL'OGGETTO
IN MOVIMENTO

=
TEMPO
DELL'OGGETTO
A RIPOSO

$$\sqrt{1 - \frac{\text{VELOCITÀ DELL'OGGETTO IN MOVIMENTO}}{\text{VELOCITÀ DELLA LUCE}}^2}$$

NON TROVI CHE SIA UN'EQUAZIONE SORPRENDENTEMENTE SEMPLICE?



SÌ,
SICURAMENTE.

PER ESEMPIO, UNO SPACE SHUTTLE VOLA A CIRCA 8 KM/S. SE NELL'EQUAZIONE SOSTITUIAMO QUESTO VALORE A "VELOCITÀ DELL'OGGETTO IN MOVIMENTO"...

...ED ESEGUIAMO I CALCOLI, LA FRAZIONE SOTTO RADICE QUADRATA VARRÀ PRATICAMENTE ZERO E IL VALORE DELLA RADICE SARÀ SOSTANZIALMENTE 1.



IN ALTRE PAROLE,
IN PRATICA NON CI ACCORGEREMO DEL RALLENTAMENTO DEL TEMPO.

MA SE NEI CALCOLI UTILIZZIAMO UNA VELOCITÀ CHE È IL 90% DI QUELLA DELLA LUCE, CIOÈ 270.000 KM/S, LA RADICE QUADRATA...

SU, FALLO TU, MINAGI.

UH... ECCO...
10...



$$1 - \left(\frac{270000}{300000} \right)^2$$

PERTANTO...

0.43588989

BENE, BENE.

ORA HAI CAPITO,
VERO?

NON SONO TUTTE CIFRE SIGNIFICATIVE... MA SEI STATO BRAVO.

UN ANNO SONO 60 SECONDI X 60 MINUTI X 24 ORE X 365 GIORNI = 31.536.000 SECONDI

SE CALCOLIAMO $31.536.000 \times 0,4358898943$ TROVIAMO CHE IL TEMPO DELL'OGGETTO A RIPOSO È DI 13.746.223 SECONDI.

...SONO CIRCA 159.

ハハ
ハハ
ハハ

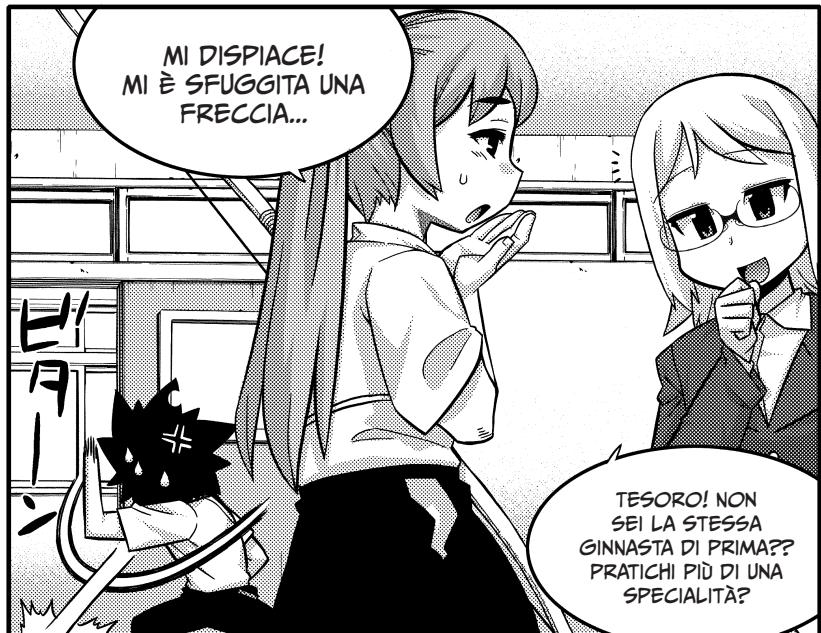
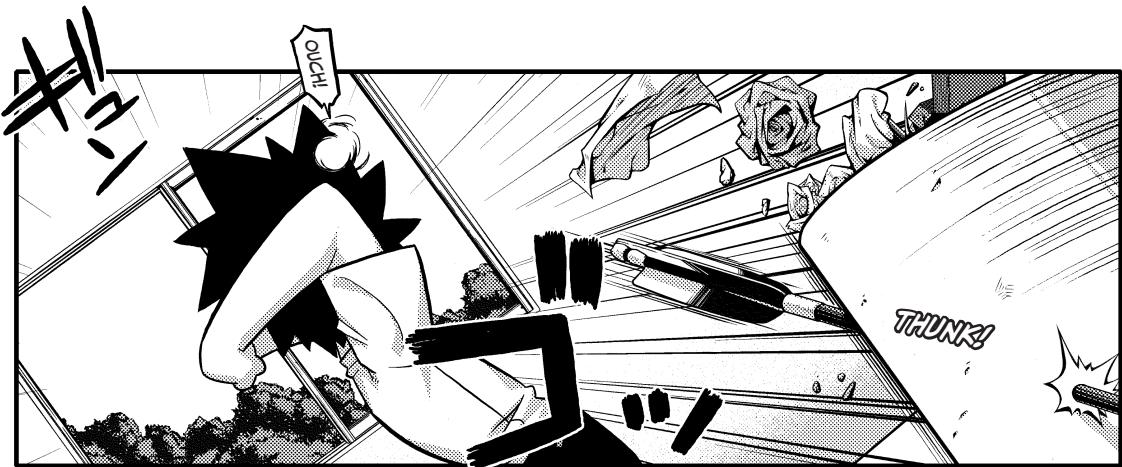
TRASFORMAN-
DO I SECONDI IN
GIORNI...

PROPORTIONALMENTE,
SCORRE PIÙ LENTAMENTE DI 2,29 VOLTE.

UN ANNO PER UNA PERSONA FERMA È MENO DELLA METÀ PER UNA PERSONA CHE SI SPOSTA QUASI ALLA VELOCITÀ DELLA LUCE?

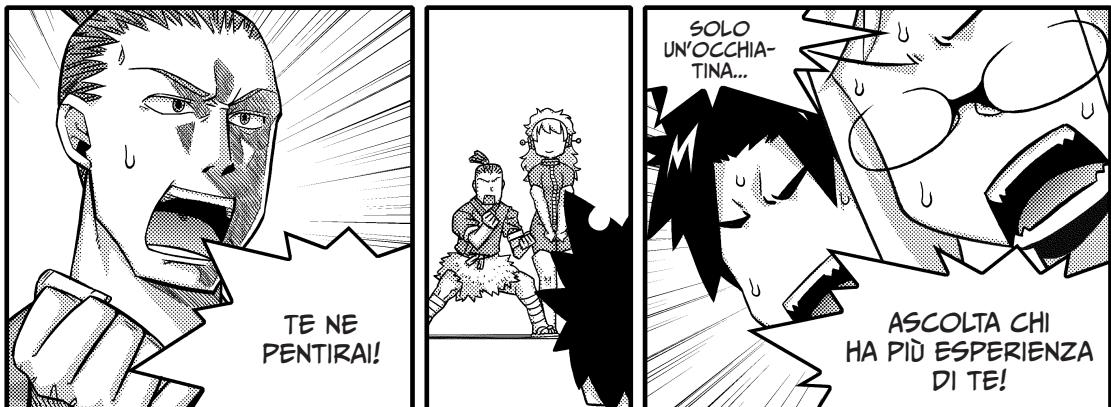
AH.

OH?



* FALLIMENTO





DIMOSTRIAMO LA DILATAZIONE DEI TEMPI COL TEOREMA DI PITAGORA

Abbiamo visto come per la Teoria della Relatività, nel caso di un corpo in moto con velocità prossima a quella della luce, il tempo rallenti. Ma di quanto? Usando il Teorema di Pitagora, abbiamo cercato di capire la questione usando un triangolo. Ora lo faremo con una formula matematica precisa.

Sia t il tempo trascorso per un osservatore a bordo della stazione spaziale che osservi l'orologio-luce a bordo del razzo, e t' il tempo trascorso per l'osservatore a bordo del razzo, come gli risulta osservando lo stesso orologio-luce, il proprio (v. figura 2.1).

t : tempo misurato sulla stazione spaziale

t' : tempo misurato sul razzo

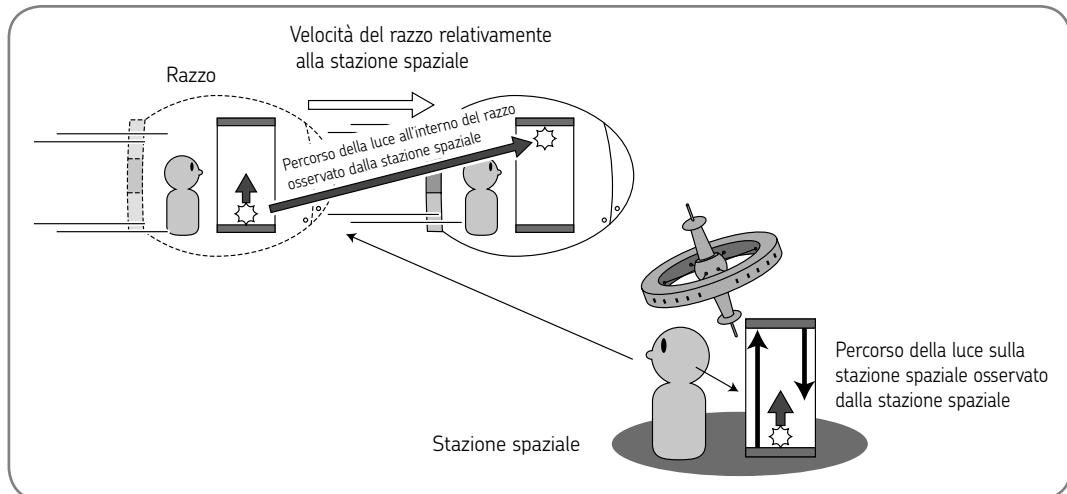


Figura 2.1- Il razzo e la stazione spaziale

Quando l'astronauta a bordo del razzo osserva il proprio orologio-luce, vede la luce andare su e giù perché l'orologio si muove insieme a lui. Pertanto, se la velocità della luce è c , una volta che la luce avrà percorso una distanza pari alla lunghezza dell'orologio, questa distanza sarà ct .

Se ora l'astronauta a bordo della stazione spaziale osserva la luce all'interno dell'orologio a bordo del razzo, la luce si muoverà – naturalmente – alla velocità c lungo un percorso inclinato verso l'alto, accompagnando lo spostamento del razzo. La linea inclinata è orientata verso lo specchio (in cima) dell'orologio del razzo. Misurata usando il tempo t dell'osservatore a bordo della stazione spaziale, questa distanza risulterà essere ct . Analogamente, poiché l'osservatore a bordo della stazione spaziale vede il fondo dell'orologio-luce del razzo (da cui la luce viene emessa) spostarsi orizzontalmente alla velocità v del razzo, il fondo percorrerà una distanza vt verso destra nel tempo t che la luce impiega per raggiungere la cima dell'orologio.

Da cui i tre lati del triangolo in figura 2.2.

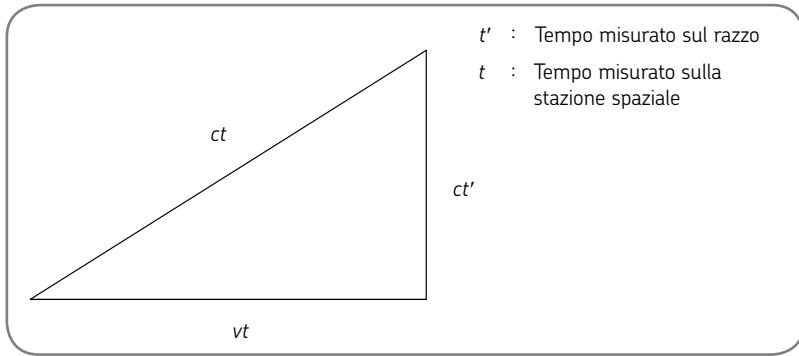


Figura 2.2 – Le distanze percorse dalla luce osservata dal razzo e dalla stazione spaziale sono i lati di un triangolo rettangolo

Pertanto, per il Teorema di Pitagora, abbiamo, $c^2 t^2 = c^2 t'^2 + v^2 t^2$ spostando il termine v^2 al primo membro:

$$(c^2 - v^2)t^2 = c^2 t'^2$$

Scambiando primo e secondo membro,

$$c^2 t'^2 = (c^2 - v^2)t^2$$

E dividendo per c^2 ricaviamo:

$$t'^2 = \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)t^2$$

Estraendo la radice quadrata di entrambi i membri, e conservando la soluzione positiva, otteniamo:

$$t' = \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \times t$$

Questa è la relazione tra il tempo dell'astronauta a bordo del razzo t' e il tempo dell'astronauta a bordo della stazione spaziale t .

Osserviamo a questo punto che $t' < t$ poiché $\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} < 1$

Un secondo (1s) misurato dall'orologio del razzo corrisponde quindi a un tempo più lungo misurato sulla stazione spaziale. L'astronauta a bordo della stazione vede quindi l'orologio del razzo scandire i secondi più lentamente del proprio. In altre parole, a bordo del razzo il tempo scorre più lentamente che a bordo della stazione spaziale.

Osservando il termine

$$\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

è anche chiaro che il rallentamento del tempo è tanto maggiore quanto più v è prossima a c .

Con questa formula possiamo calcolare la dilatazione temporale di un oggetto che si sposta a una qualsiasi velocità relativa v .

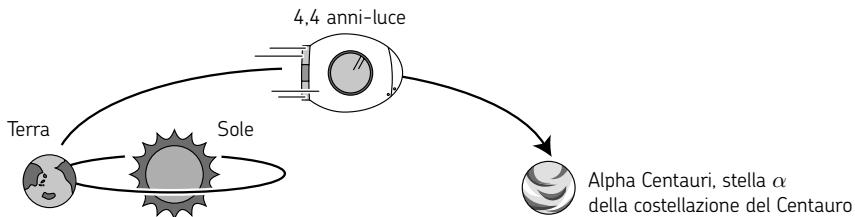
MA DI QUANTO RALLENTA IL TEMPO?

Abbiamo visto che per un corpo in movimento il tempo rallenta. Ora vedremo esattamente di quanto e come esempio per i nostri calcoli useremo i viaggi nello spazio.

Come sappiamo, il rallentamento del tempo dipende dalla velocità dell'oggetto che si muove; inoltre, maggiore è la velocità e maggiore sarà il rallentamento.

Come destinazione del nostro viaggio sceglieremo Alpha Centauri, la stella più vicina al nostro Sole (v. figura 2.3). Se ne avessimo scelta una all'interno del Sistema Solare non avremmo messo veramente alla prova la Teoria della Relatività, perché con la tecnologia attuale possiamo raggiungere Marte o Venere in pochi anni, senza avvicinarci neppure lontanamente alla velocità della luce.

Se prendessimo un treno ad Alta Velocità a 300 km/h ci vorrebbero 15.840.000 anni.



A bordo di razzo lanciato al 90% della velocità della luce, il tempo terrestre necessario sarebbe di $4,4 \text{ anni-luce} / 0,9c = 4,9 \text{ anni}$ e il tempo trascorso a bordo del razzo sarebbe di 2,1 anni.

A bordo del razzo,

$$\begin{aligned}t' &= \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \times 4.9 \text{ anni} \\&= \sqrt{1 - \frac{(0.9c)^2}{c^2}} \times 4.9 \text{ anni} \\&= 2.1 \text{ anni}\end{aligned}$$

Figura 2.3 – In viaggio verso Alpha Centauri

Un anno-luce è la distanza percorsa dalla luce nel tempo di un anno e corrisponde ad approssimativamente 9.460.800.000.000 km.* Percorrela a bordo di un treno ad Alta Velocità richiederebbe circa 15.840.000 anni, ma al 90% di c il viaggio durerà soltanto 2,1 anni. Questo mentre sulla Terra ne passeranno 4,9! Anche se degli astronauti inviati su Alpha Centauri facessero immediatamente ritorno sulla Terra una volta arrivati, le notizie dalla Terra continuerebbero a raggiungerli per circa 10 anni ma accorrendo a dare loro il bentornato, i loro cari li troverebbero invecchiati di soli 4,2 anni.

Il rallentamento relativistico del tempo è quindi tanto maggiore quanto più aumenta la velocità.

Per capirlo bene, supponiamo di viaggiare dalla Via Lattea – la galassia a cui appartiene il nostro Sole – fino alla Galassia di Andromeda (M31), una delle più vicine alla Via Lattea. Si trova a circa 2.500.000 anni-luce e siccome la sua luce impiega 2.500.000 anni per raggiungerci, la Galassia di Andromeda che vediamo è in effetti quella di 2.500.000 anni fa. Se oggi vi avvenisse un'esplosione, non lo sapremmo per 2.500.000 anni, perché questo è il tempo necessario alla luce per raggiungerci.

Se degli astronauti cercassero di raggiungerla al 99,999999999% della velocità della luce, a loro viaggio richiederebbe 11,2 anni, mentre sulla terra ne trascorrerebbero 2.500.000! Pertanto, al loro ritorno gli astronauti sarebbero invecchiati di 22,4 anni ma gli esseri umani che li accoglierebbero sulla Terra sarebbero quelli del nostro futuro di 5 milioni di anni.

Vediamo di ricavare questi numeri usando le formule: il tempo t' degli astronauti, quello che trascorre a bordo del razzo, può essere calcolato usando la formula della dilatazione temporale che abbiamo ricavato, visto che conosciamo il tempo (terrestre!) necessario, e cioè $t = 2.500.000$ e la velocità del razzo ($v=0,9999999999c$).

$$t' = \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \times t$$

$$t' = \sqrt{1 - \left(\frac{0.9999999999c}{c} \right)^2} \times t$$

$$t' = 11,2 \text{ anni}$$

* I conti in dettaglio:

$$\frac{300.000 \text{ km}}{1 \text{ secondo}} \times \frac{60 \text{ secondi}}{1 \text{ minuto}} \times \frac{60 \text{ minuti}}{1 \text{ ora}} \times \frac{24 \text{ ore}}{1 \text{ giorno}} \times \frac{365 \text{ giorni}}{1 \text{ anno}} \\ = 9.460.800.000 \text{ km!}$$

Quindi, come abbiamo anticipato, per gli astronauti a bordo del razzo il viaggio di andata e ritorno per Andromeda richiederebbe 22,4 anni, come illustrato in figura 2.4. Per chi è rimasto sulla Terra, gli astronauti saranno invecchiati soli di 22,4 anni anche se erano partiti 5 milioni di anni prima!

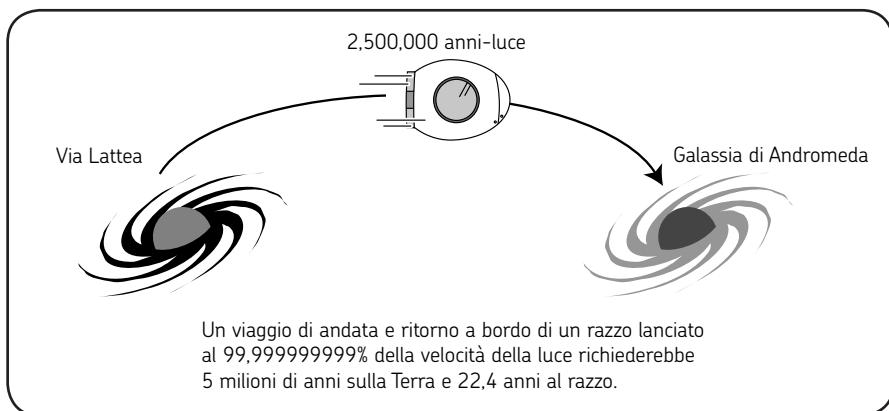
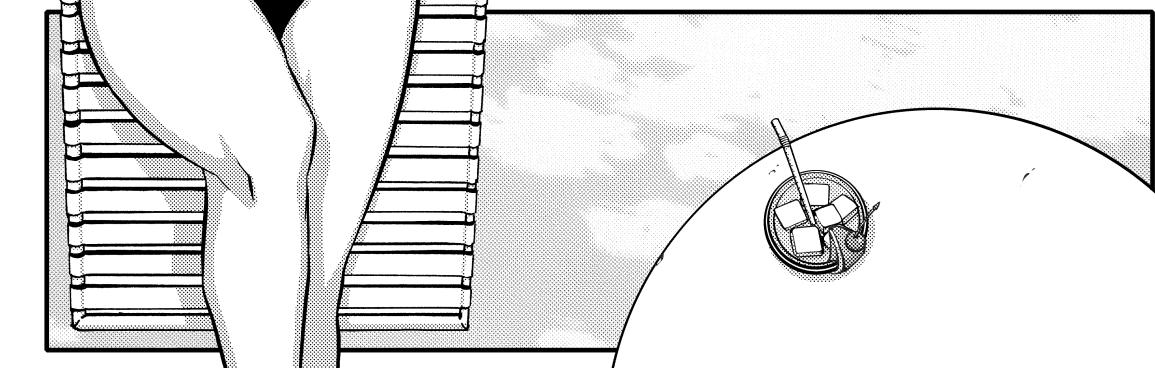
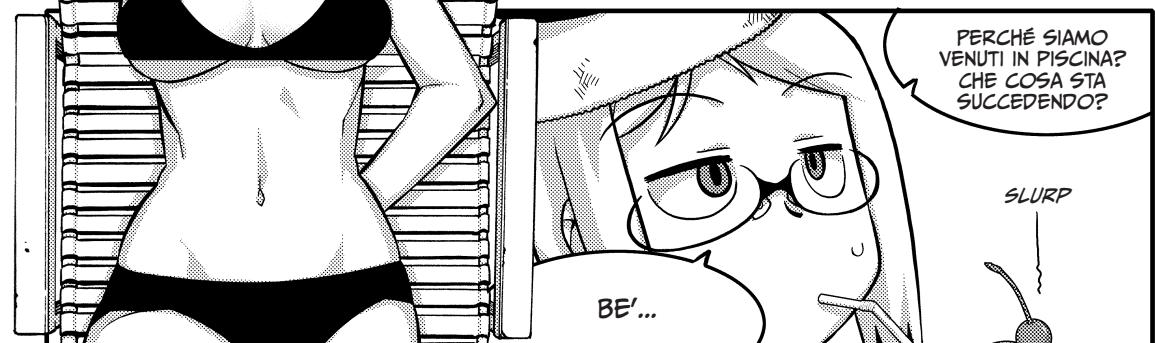


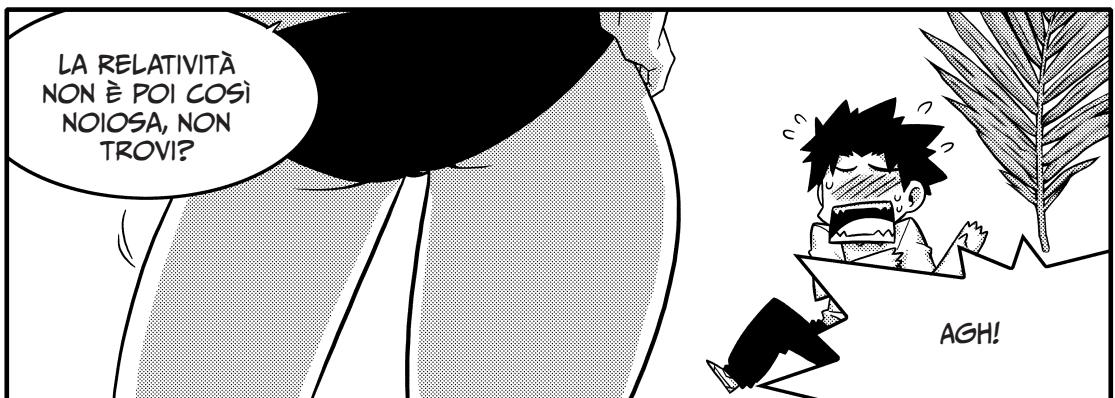
Figura 2.4 – Verso la Galassia di Andromeda



MA DAVVERO PIÙ UN CORPO
È VELOCE E PIÙ DIVENTA
CORTO E PESANTE?



FUMO ↑



1. PERCHÉ ANDANDO PIÙ VELOCI LE LUNGHEZZE DIMINUISCONO?

LA SOSTANZA È CHE OS-
SERVANDO UN OGGETTO
CHE SI MUOVE A VELOCITÀ
PROSSIMA A QUELLA DELLA
LUCE, LO VEDREMO CON-
TRARSI NELLA DIREZIONE
DEL MOTO.

QUESTO VUOL DIRE CHE SI
ACCORCIA PER VIA DELLA
RESISTENZA DELL'ARIA
O ROBA DEL GENERE,
GIUSTO?

SQUEAK
SQUEAK

NO! NON È
QUESTO QUELLO
CHE SUCCIDE!

È LO SPAZIO IN SÉ CHE
SI CONTRAE DAL PUNTO DI
VISTA DI UN OSSERVATORE
A RIPOSO.

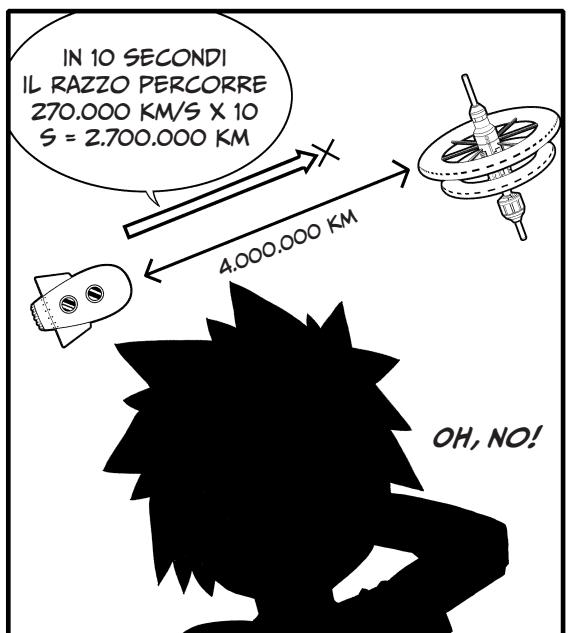
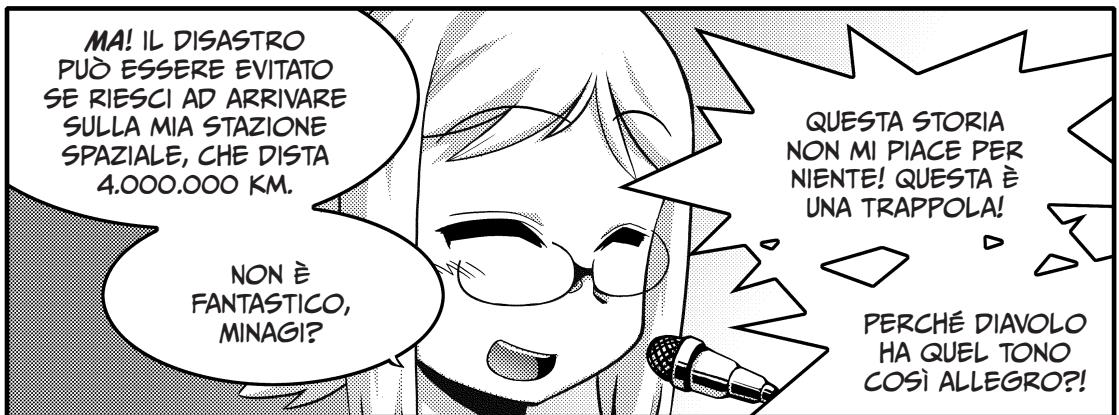
PIÙ O MENO CAPISCO
CHE PIÙ O MENO NON
STO CAPENDO...

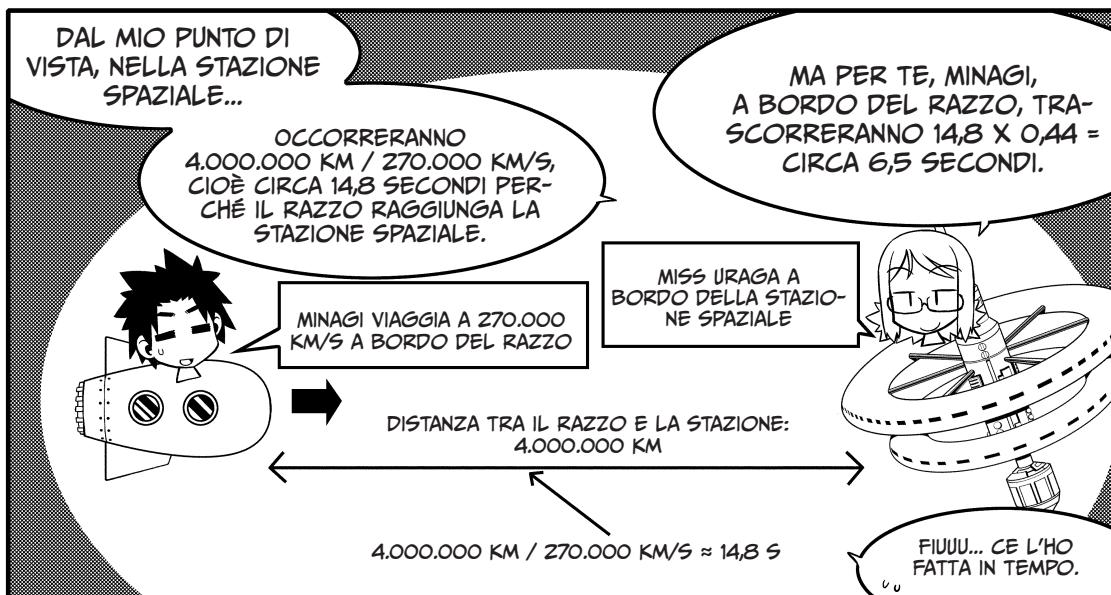
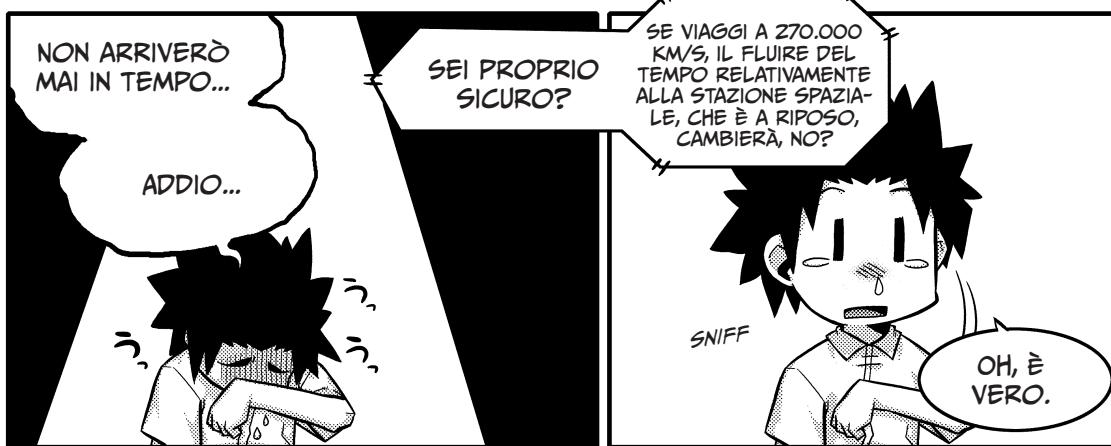
TI RACCONTERÒ
UNA STORIA. VIENI
QUA.

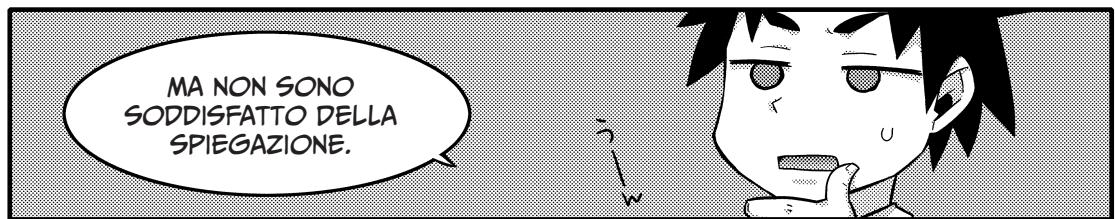
OKAY, COSA DIA...

CALCIO!

SLAM!







LA CONTRAzione
È DATA DA QUESTA
EQUAZIONE.

$$\text{LUNGHEZZA DELL'OGGETTO IN MOVIMENTO} = \text{LUNGHEZZA DELL'OGGETTO A RIPOSO} \times \sqrt{1 - \frac{\text{VELOCITÀ DELL'OGGETTO IN MOVIMENTO}}{\text{VELOCITÀ DELLA LUCE}}}$$

SEMBRA PROPRIO
QUELLA DELLA
DILATAZIONE
TEMPORALE.

LA LUNGHEZZA È
PROPORZIONALE ALLA VELOCITÀ:
 $L=vt$. PERCHÉ LA VELOCITÀ RESTI LA
STESMA OCCORRE QUINDI CHE LA
LUNGHEZZA SI CONTRAGGA ESATTA-
MENTE DELLO STESSO FATTORE DI
CUI SI DILATA IL TEMPO.

PRECISAMENTE... È
QUESTO IL PUNTO.

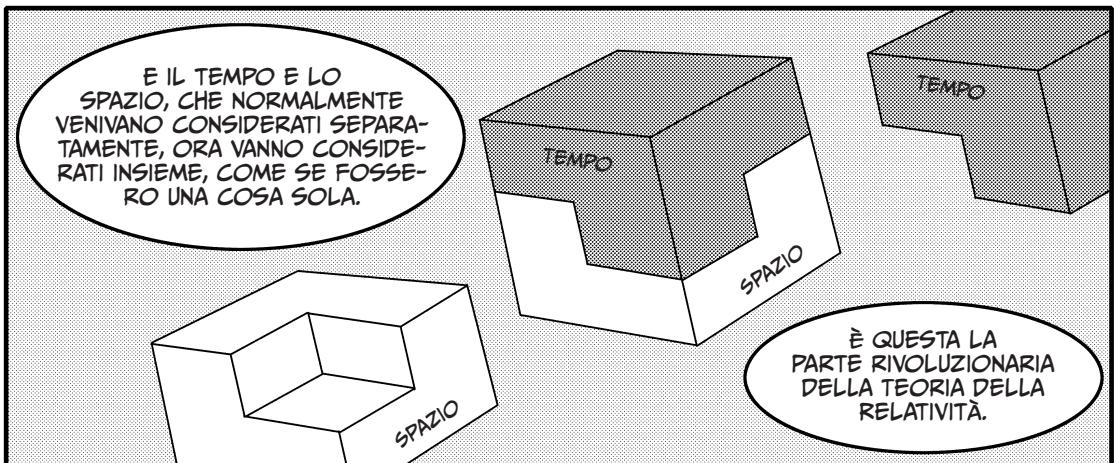
E CIOÈ?

DAL PUNTO DI VISTA
DAL RAZZO...

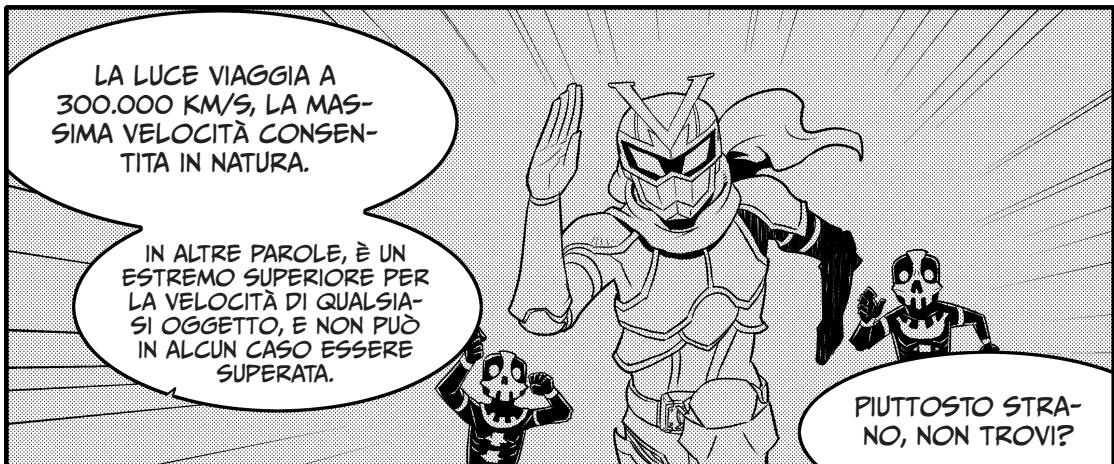
...LO SPAZIO VUOTO CIR-
COSTANTE PUÒ ESSERE
PENSATO IN MOVIMENTO E
LA STAZIONE SPAZIALE IN
AVVICINAMENTO.

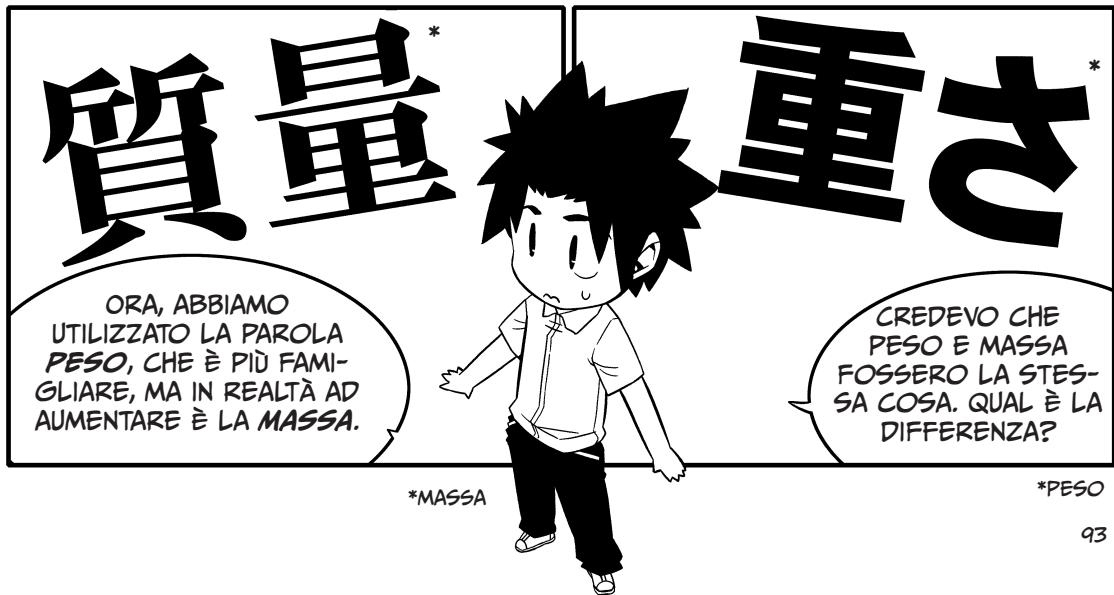
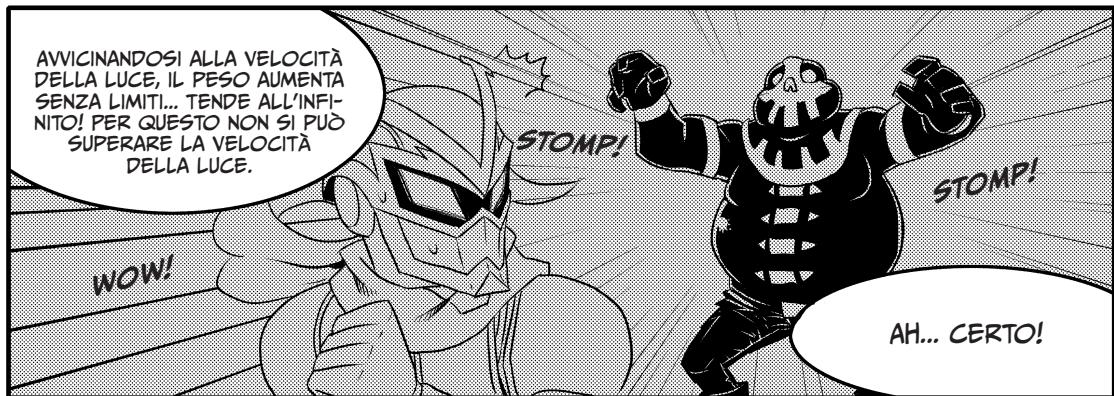
ガ"ラ ガ"ラ

QUESTO PERCHÉ
PER IL PRINCIPIO DI
RELATIVITÀ POSSIAMO
CONSIDERARE IL RAZZO
A RIPOSO, DICO BENE?



2. PERCHÉ PIÙ VADO VELOCE
PIÙ DIVENTO PESANTE?





NELLA VITA DI TUTTI I GIORNI,
POTREMMO ANCHE IDENTIFI-
CAR MASSA E PESO...

...MA SICCOME, IN REALTÀ,
IL PESO È LA FORZA GRAVITAZIO-
NALE ESERCITATA SULLA MASSA
DI UN OGGETTO, IL PESO SULLA
TERRA SARÀ DIVERSO DA QUELLO
SULLA LUNA.

SULLA
SUPERFICIE
LUNARE MINAGI
PESA CIRCA
12 KG



LA GRAVITÀ
DELLA LUNA È
1/6 DI QUELLA
TERRESTRE.

SULLA TERRA
MINAGI PESA
72 KG.

CAPISCO... MA
LA MASSA?

A GRAVITÀ ZERO, ANCHE
IL PESO È ZERO MA È
COMUNQUE RICHIEDA
UNA FORZA PER MODIFI-
CAR LA VELOCITÀ DI UN
OGGETTO, GIUSTO?



CERTO, MA...?



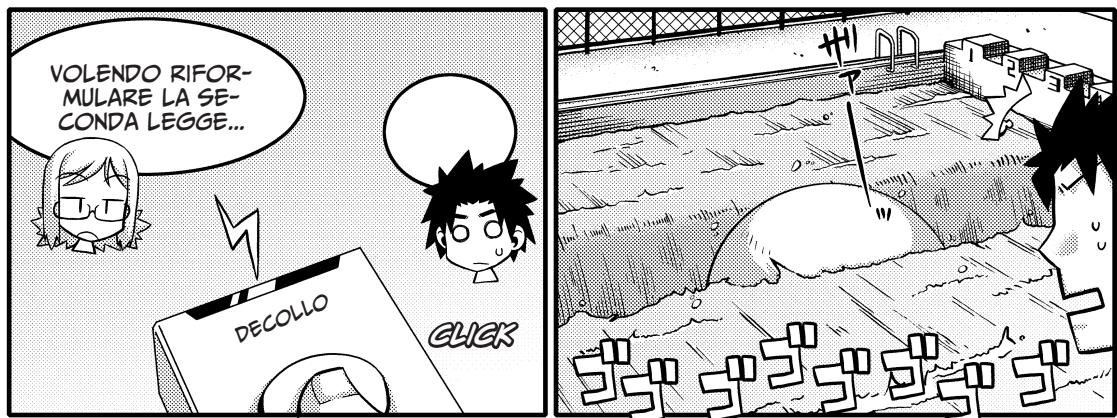
LA MASSA È UNA
MISURA DELL'INERZIA DI
UN CORPO, CIOÈ DELLA
RESISTENZA INTRINSECA A
MODIFICARNE LA VELOCITÀ.



NELL'EQUAZIONE DEL MOTO DI NEWTON, LA MASSA È INVERSA- MENTE PROPORTZIONALE ALL'AC- CELERAZIONE, CIOÈ ALLA VARIA- ZIONE DELLA VELOCITÀ.

ORA CHE MI CI FAI PENSARE, ME LA RI- CORDO...

LE TRE LEGGI DI NEWTON	
Prima legge: principio di inerzia	Un oggetto non soggetto ad alcuna forza conserva il proprio stato di quiete o di moto rettilineo uniforme
Seconda legge: l'equazione del moto ($F=ma$)	L'accelerazione di un oggetto è direttamente proporzionale alla forza applicata e inversamente proporzionale alla massa
Terza legge: principio di azione e reazione	Se su un oggetto si esercita una forza, l'oggetto eserciterà una forza di eguale intensità nella direzione opposta.



SUPPONIAMO CHE
NON CAMBI LA FORZA
PROPULSIVA APPLICATA A
UN RAZZO CHE DECOLLI
CON UN'ACCELERAZIONE
DI 10 m/s^2 ...

...MA CHE
RADDOPPI LA SUA
MASSA. L'ACCELERA-
ZIONE DIVENTERÀ
DI 5 m/s^2 .

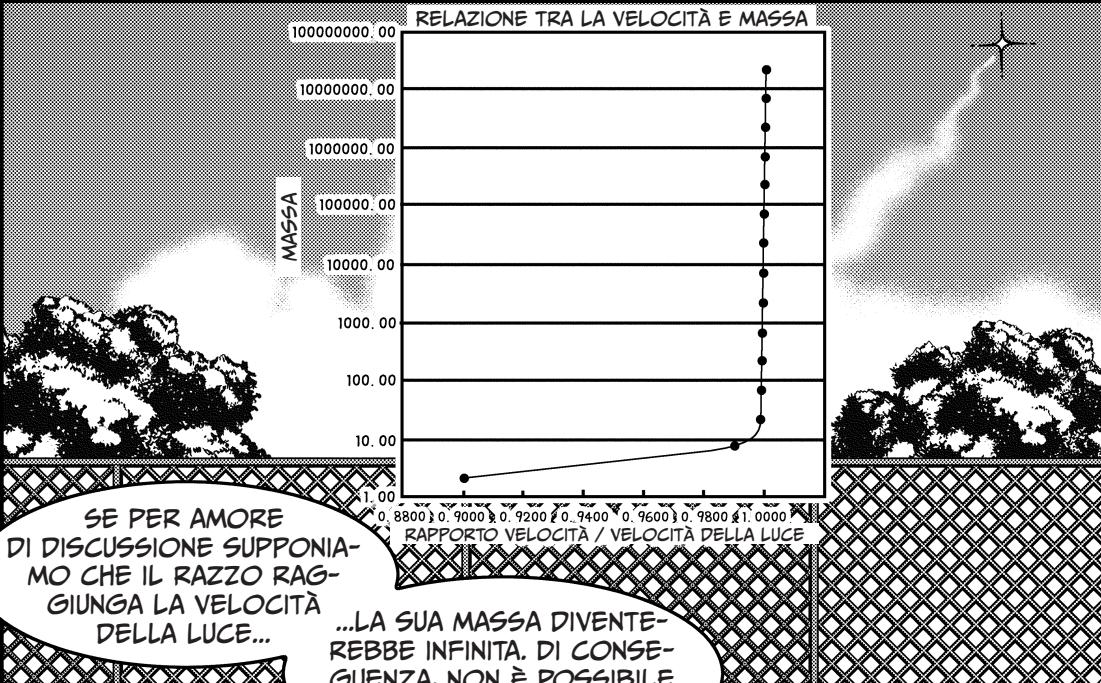
VUOI DIRE CHE
SE LA MASSA
AUMENTA, ACCE-
RARLA DIVENTA PIÙ
DIFFICILE.

PIÙ IL RAZZO SI
AVVICINA ALLA VELOCI-
TÀ DELLA LUCE E
PIÙ LA SUA MASSA
AUMENTA...

...E ACCELERANDO
ULTERIORMENTE IL
RAZZO, CONTINUANDO
AD APPLICARE UNA
FORZA...

...ANCHE LA MASSA AU-
MENTERÀ E ACCELERAR-
LA DIVENTERÀ SEMPRE
PIÙ DIFFICILE.

CONTINUANDO IN QUESTO
MODO, LA MASSA AUMENTERÀ
OLTRE OGNI LIMITE PREFIS-
SATO, A MANO A MANO CHE IL
RAZZO SI AVVICINA ALLA VELO-
CITÀ DELLA LUCE.





SE PER ESEMPIO BRUCIAMO DELLA LANA D'ACCIAIO IN UNA BOTTIGLIA SIGILLATA PIENA D'OSSIGENO, QUEST'ULTIMO E IL FERRO SI COMBINERANNO IN OSSIDO DI FERRO.

MA LA MASSA TOTALE ALL'INTERNO DEL CONTENITORE SARÀ SEMPRE LA STESSA, PRIMA E DOPO LA REAZIONE.

HA ASSOLUTAMENTE SENSO!



...E IL PRINCIPIO DI CONSERVAZIONE DELL'ENERGIA? CHE COS'E?

IL PRINCIPIO DI CONSERVAZIONE DELL'ENERGIA AFFERMA CHE NEANCHE LA QUANTITÀ TOTALE DI ENERGIA CAMBIA MAI, ANCHE SE PUÒ PASSARE DA UNA FORMA ALL'ALTRA.

IL TRASFORMATORE A BORDO DI UNA BICICLETTA TRASFORMA L'ENERGIA CINETICA IN ENERGIA ELETTRICA MA LA QUANTITÀ TOTALE DI ENERGIA NON CAMBIA.

MA CERTO!

QUANDO PEDALO (IL PIÙ POSSIBILE) LA DINAMO TRASFORMA L'ENERGIA CINETICA IN ENERGIA ELETTRICA.

POI LA LAMPADINA TRASFORMA L'ENERGIA ELETTRICA IN LUCE (E CALORE).

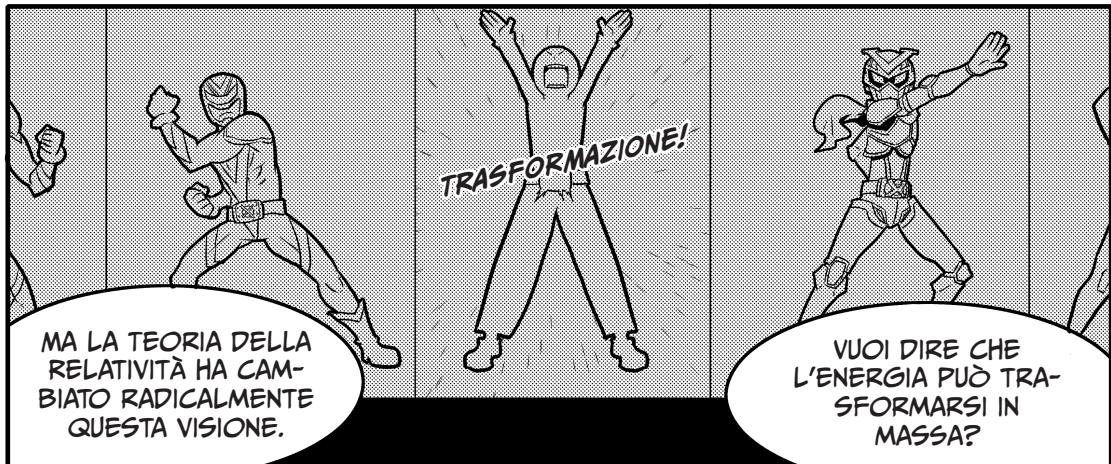
SONO IN RITARDO PER LA RIUNIONE DEL CLUB!



*MASSA

*ENERGIA

ESATTO.



COSA DIAVOLO SONO
 E , m E c ?



E È L'ENERGIA,
 m LA MASSA E
 c È LA VELOCITÀ
DELLA LUCE.

L'EQUAZIONE DICE
CHE "L'ENERGIA È UGUALE
ALLA MASSA MOLTIPLICATA
PER IL QUADRATO DELLA
VELOCITÀ DELLA LUCE".

ENERGIA

AL QUADRATO

MASSA

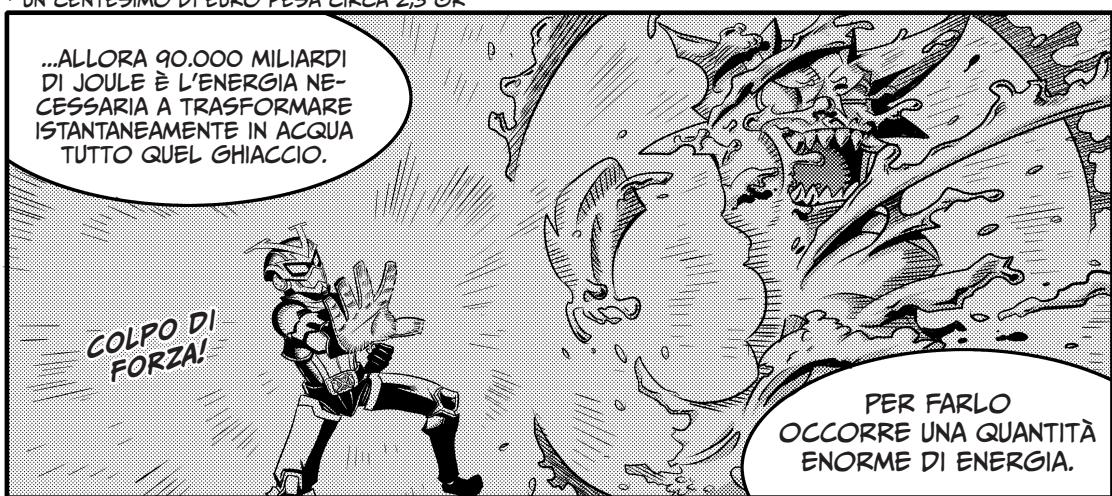
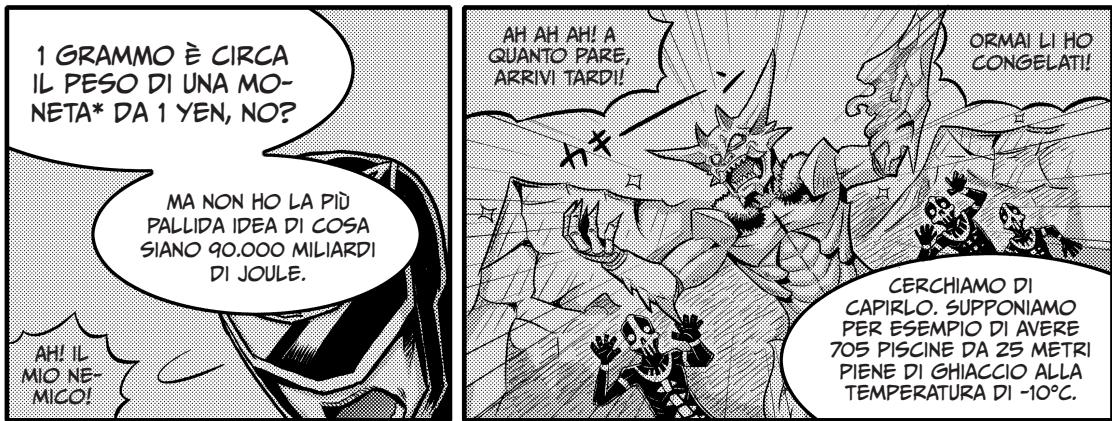
VELOCITÀ DELLA
LUCE

MA CERTO!
LA CINTURA DELLA
METAMORFOSI!

MACCHÉ
CINTURA E CINTURA!

DALL'EQUAZIONE SI CAPISE
SUBITO CHE ANCHE UN SOLO
GRAMMO DI MATERIA POTREB-
BE ESSERE CONVERTITO IN UNA
QUANTITÀ SPAVENTOSA DI ENER-
GIA... 90.000 MILIARDI
DI JOULE.

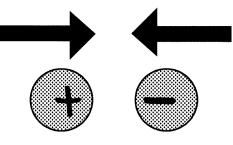
90.000
MILIARDI DI
JOULE?!



PER ESEMPIO, QUANDO UN ELETTRONE E UN POSITRONE SI SCONTRANO, SI ANNICHILISCONO E DIVENTANO LUCE.

E UN POSITRONE CHE COSA SAREBBE?

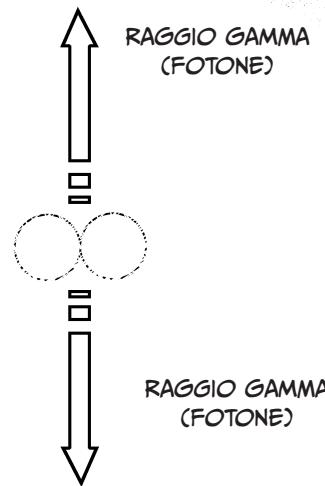
UN POSITRONE È L'ANTIPARTICELLA DI UN ELETTRONE.



POSITRONE

ELETTRONE

ANNICHILAZIONE!



RAGGIO GAMMA (FOTONE)

LA SUA MASSA E LE SUE ALTRE CARATTERISTICHE SONO LE STESSE DELL'ELETTRONE...

...MA POSSIEDE UNA CARICA ELETTRICA POSITIVA, MENTRE QUELLA DELL'ELETTRONE È NEGATIVA.

UH...

QUANDO UNA PARTICELLA E UN'ANTIPARTICELLA COLLIDONO, CIOÈ SI SCONTRANO, SI ANNICHILISCONO.

UN FENOMENO DETTO ANNICHILAZIONE DI COPPIA.

ALLORA QUANDO UNA PARTICELLA E UN'ANTIPARTICELLA COLLIDONO SCOMPAIONO?

PARTICELLA

ANTIPARTICELLA

NON "SVANISCONO" SEMPLICEMENTE. SI TRASFORMANO IN UNA QUANTITÀ EQUIVALENTE DI ENERGIA.

LA MASSA DELL'ELETTRONE E DEL PROTONE ANNICHILITI VENE CONVERTITA IN ENERGIA SECONDO LA FORMULA $E=MC^2$ PRODUCENDO...

PARTICELLA

...RADIAZIONI ELETROMAGNETICHE CHIAMATE RAGGI GAMMA E AVENTI ESATTAMENTE LA STESSA ENERGIA.

ANTIPARTICELLA

CAPISCO!

MMM... MI SEMBRA
DI CAPIRE UN PO'
DI PIÙ, ADESSO.

PANT PANT
PANT

EHI! NON È IL
VICEPRESIDE
QUESTO?

PANT
PANT

PANT PANT
PANT

È CORSO VIA.

SEMPRAVA DAVVERO
ACCALDATO, UH?

MISS URA-
GA...?

SE N'È ANDATO?

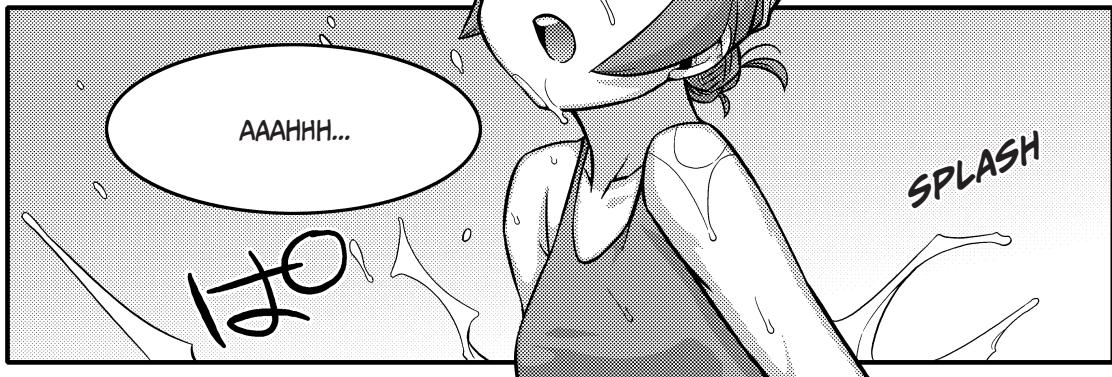
OSSANTOCIELO! MA
PERCHÉ SI NASCONDE
IN QUESTO MODO?!

NON DEVE VEDERCI! NON
DEVONO SAPERE CHE
STIAMO STUDIANDO IN
PISCINA!

MA COSA
IMPORTA...?!

STRIZZ

SPLASH



COME CALCOLARE LA CONTRAZIONE DELLE LUNGHEZZE: L'EQUAZIONE DI LORENTZ

Vediamo ora di quantificare la contrazione delle lunghezze.

Supponiamo che un razzo voli a velocità costante v (v. figura 3.1)

All'interno del razzo, Mr A pensa di trovarsi a riposo.

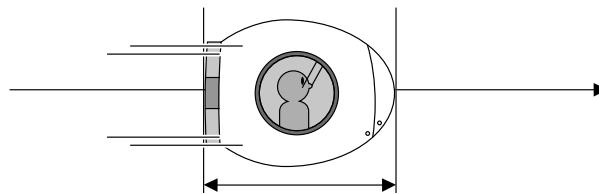


Figura 3.1 – Una persona che viaggia a bordo di un razzo misura la posizione della base e della punta del razzo.

Un osservatore a bordo del razzo ne misura la posizione x'_2 della punta e x'_1 dell'estremo posteriore. La lunghezza del razzo misurata a bordo del razzo è quindi $l_0 = x'_2 - x'_1$

Cosa succede se osserviamo la stessa situazione dall'esterno del razzo, per esempio dalla stazione spaziale nella figura 3.2?

Direzione del moto

Velocità v

Mr. B a bordo
della stazione
spaziale

$x'_1 \quad l_0 \quad x'_2$

Figura 3.2 – Il razzo visto dalla stazione spaziale

Per calcolare la contrazione della lunghezza del razzo che sfreccia davanti a un osservatore a una velocità prossima a quella della luce, prendiamo in considerazione i due punti x'_1 e x'_2 nel sistema di riferimento del razzo e, usando le trasformazioni di Lorentz che abbiamo introdotto a pagina 48, possiamo calcolare i risultati x_1 e x_2 della misura effettuata dall'osservatore sulla posizione degli estremi anteriore e posteriore del razzo, nel proprio sistema di riferimento. La lunghezza osservata dall'osservatore esterno al razzo sarà inferiore a quella misurata dall'astronauta a bordo. Questo effetto viene detto contrazione relativistica delle lunghezze ed è il risultato della contrazione dello spazio per corpi che si muovono a velocità prossime a quella della luce.

Con la trasformazione di Lorentz $x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$, calcoliamo le posizioni.

$$x'_1 = \frac{x_1 - vt_1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$$

$$x'_2 = \frac{x_2 - vt_2}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$$

Se $l = x_2 - x_1$ è la lunghezza del razzo osservata dall'esterno, allora poiché

$$l_0 = x'_2 - x'_1 = \frac{x_2 - vt_2}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} - \frac{x_1 - vt_1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} = \frac{(x_2 - x_1) - (t_2 - t_1)v}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$$

viene misurata nel medesimo istante, $t_1 - t_2 = 0$ poiché $t_2 = t_1$, e per l_0 abbiamo

$$l_0 = \frac{(x_2 - x_1) - (t_2 - t_1)v}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} = \frac{(x_2 - x_1)}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} = \frac{l}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$$

La lunghezza del razzo misurata dalla stazione spaziale:

$$l = l_0 \sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}$$

è quindi inferiore alla lunghezza l_0 del razzo misurata a bordo.

Questo perché il coefficiente

$$\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2} < 1$$

è inferiore a 1 dato che la velocità v è necessariamente inferiore alla velocità della luce ($v < c$).

LA LONGEVITÀ DEI MUONI

Il rallentamento del tempo e la contrazione delle lunghezze non sono affermazioni puramente teoriche o "metafore": si tratta di effetti di fenomeni fisici che oggi siamo in grado di osservare normalmente.

Ogni giorno la Terra viene colpita dai *raggi cosmici*, particelle elementari ad alta energia che arrivano dallo spazio. Quando i raggi cosmici entrano in collisione con le molecole della parte superiore dell'atmosfera, esiste una determinata probabilità che si generino dei *muoni*, particelle elementari simili agli elettroni. La vita di un muone è di circa 2 milionesimi di secondo in un laboratorio collocato a riposo sulla superficie terrestre. Pertanto, quando un muone viene prodotto nell'atmosfera, a molte decine o centinaia di chilometri di altezza da terra, percorrerà un tragitto di soli $300.000 \text{ km/s} \times 2/1.000.000 \text{ s} = 0,6 \text{ km}$, anche se lo farà a una velocità quasi pari a quella della luce. Sulla base di questi calcoli, concluderemmo che non dovrebbe raggiungere la superficie terrestre, dove però vengono regolarmente osservati! Questo evento apparentemente impossibile ha luogo perché secondo la Teoria della Relatività Ristretta la vita del muone si allunga (v. figura 3.3). L'allungamento della vita del muone a causa della dilatazione dei tempi è stata verificata in laboratorio accelerando i muoni fino quasi alla velocità della luce.

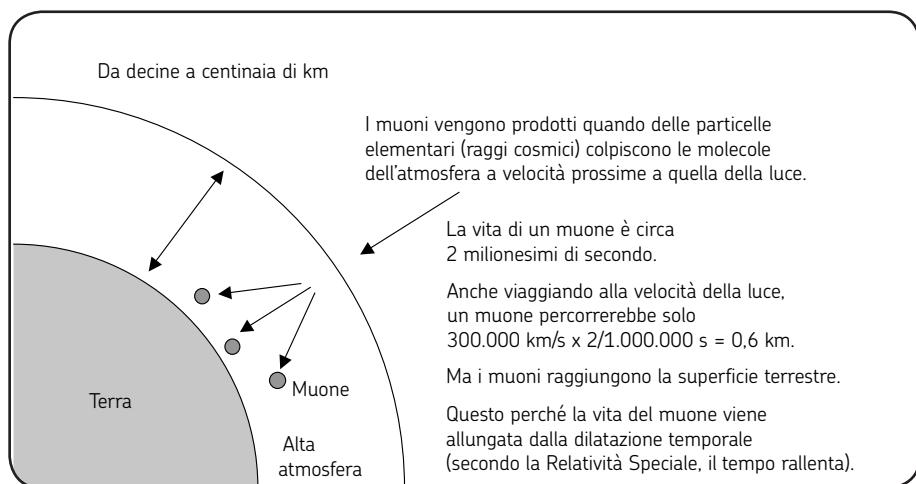


Figura 3.3 – La durata della vita del muone

Analizziamo ora il fenomeno della contrazione delle lunghezze nel caso del muone. Nel suo sistema di riferimento, la vita del muone non si allunga: è sempre di 2 milionesimi di secondo. Dal punto di vista del muone (cioè nel suo sistema di riferimento), la Terra si sta avvicinando a una velocità di poco inferiore a quella della luce e la distanza che li separa si contrae, come in figura 3.4: è proprio per questo motivo che il muone vive abbastanza da raggiungere la Terra.

La dilatazione dei tempi dal punto di vista della Terra e la contrazione delle lunghezze dal punto di vista del muone sono perfettamente coerenti e in accordo con la Teoria della Relatività.

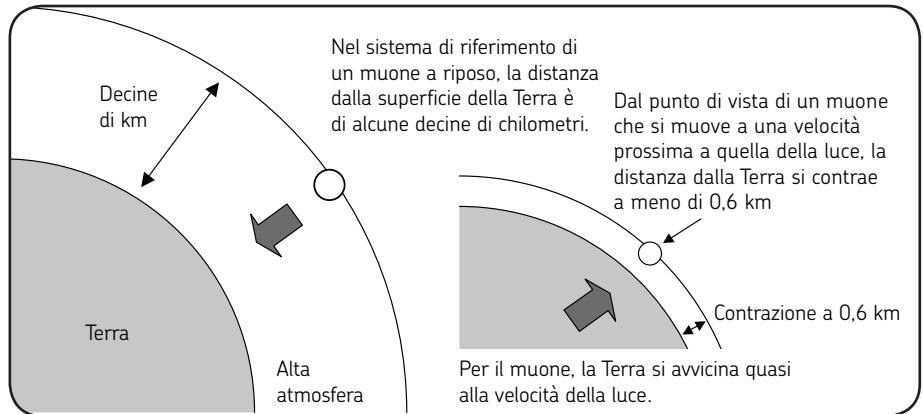


Figura 3.4 – Oltre al tempo, si contraggono anche le distanze

MASSE IN MOVIMENTO

Vediamo ora di capire in che modo la massa di un oggetto dipende dalla sua velocità, cominciando con un rapido ripasso delle leggi del moto. Prima della Relatività di Einstein, i moti venivano descritti dalle trasformazioni di Galileo e dalle leggi di Newton.

TRASFORMAZIONI GALILEIANE

Le trasformazioni galileiane permettono di passare da un sistema all'altro, quando la velocità relativa v tra i due sistemi è costante:

$$x' = x - vt \quad \text{e} \quad t' = t$$

dove x' e t' rappresentano posizione e tempo, rispettivamente, in un sistema, e x , v e t posizione, velocità e tempo, rispettivamente, nell'altro sistema.

LA SECONDA LEGGE DI NEWTON

Possiamo scriverla come:

$$f = ma = m \frac{d^2x}{dt^2},$$

dove f rappresenta la forza, m la massa e a l'accelerazione. Possiamo pertanto considerare quest'ultima come la derivata seconda della posizione rispetto al tempo:

$$a = \frac{d^2x}{dt^2}$$

Secondo il Principio di Relatività di Galileo, le leggi della fisica sono le stesse in due sistemi inerziali, cioè – possiamo anche dire – a riposo o in moto relativo che sia rettilineo e uniforme. In altre parole, se lanciamo in aria una palla all'interno di un ascensore a riposo o all'interno di un ascensore che si muove a velocità costante, la palla salirà e ci tornerà in mano nello stesso modo.

Analizziamo ora le leggi della fisica nei due sistemi di riferimento e verifichiamo che, se non prendiamo in considerazione la Relatività, queste restano le stesse. Prenderemo in considerazione il sistema di riferimento a riposo, dove la posizione della palla è x , e quello dell'ascensore in movimento, dove la posizione della palla è x' (v. figura 3.5).

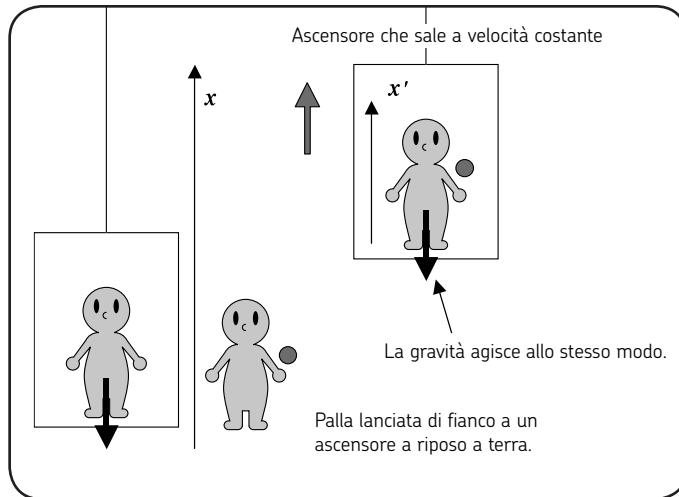


Figura 3.5 – Un ascensore che si muove a velocità costante

In questo caso, la velocità della palla – che all'interno dell'ascensore si muove nella direzione x' – è data da

$$\frac{dx'}{dt'}$$

Se sostituiamo la trasformazione galileiana $x' = x - vt$ otteniamo:

$$\frac{dx'}{dt'} = \frac{d}{dt'}(x - vt) = \frac{dx}{dt'} - v \frac{dt}{dt'} = \frac{dx}{dt} - v$$

Poiché $\frac{dt'}{dt} = 1$ abbiamo sfruttato il fatto che $dt' = dt$.

Derivando ancora, otteniamo:

$$\frac{d^2x'}{dt'^2} = \frac{d}{dt'} \left(\frac{dx}{dt} - v \right) = \frac{d^2x}{dt^2}$$

Poiché l'unica forza che agisce sulla palla è quella di gravità, indicandola con g abbiamo:

$$g = f = ma = m \frac{d^2x}{dt^2}$$

Osserviamo che in questa equazione g è una forza e non l'accelerazione dovuta alla gravità. Se indichiamo con a' l'accelerazione all'interno dell'ascensore – che si muove a velocità costante – e con f' la forza, otteniamo:

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = m \frac{d^2x'}{dt'^2} = ma' = f' = g$$

e la forma della legge del moto resta la stessa: questo vuol dire che le leggi della fisica non cambiano.

Vediamo adesso come cambia questa situazione passando alla Relatività Speciale e sostituendo le trasformazioni di Galileo con quelle di Lorentz.

LE TRASFORMAZIONI DI LORENTZ

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$$

$$t' = \frac{t - \frac{v}{c^2}x}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$$

Come abbiamo già visto in questo capitolo, nel contesto della Relatività Ristretta il tempo e lo spazio non sono più distinguibili ed è questo il motivo per cui, specificando le coordinate di un corpo, non è più sufficiente darne semplicemente la posizione (x,y,z) nello spazio tridimensionale ma occorre anche specificare il tempo t . Le unità di misura di spazio e tempo sono diverse (metri e secondi, rispettivamente) e quindi per riuscire a esprimere tutte e quattro le coordinate di un corpo nella stessa unità di misura (una lunghezza) moltiplicheremo il tempo per la velocità c della luce. Ora possiamo dimostrare che i sistemi di riferimento si trasformano l'uno nell'altro e che tempo e spazio vengono trasformati contemporaneamente.

$$(ct, x, y, z) \leftrightarrow (ct', x', y', z')$$

Seguendo la stessa logica, se estendiamo l'equazione del moto in modo che la forma non cambi una volta applicata una trasformazione di Lorentz, ne consegue che la massa – che nella meccanica di Newton è una costante – assume una forma molto simile alla trasformazione di Lorentz:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$$

Qui, m_0 , che viene detta *massa a riposo* o *massa invariante*, è la massa misurata in un sistema di coordinate a riposo ($v=0$).

LA RELAZIONE TRA MASSA ED ENERGIA

Analogamente, se consideriamo l'energia in una forma compatibile con le trasformazioni di Lorentz, l'espressione che troviamo è:

$$E = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$$

Se la sostituiamo nell'espressione precedente,

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$$

ricaviamo la famosa relazione tra massa ed energia: $E = mc^2$.

Se ora per $|x| \ll 1$, utilizziamo l'approssimazione $(1+x)^\alpha \approx 1 + \alpha x$ con

$$\left(\frac{v}{c}\right)^2 \ll 1$$

(possiamo farlo quando la velocità v è molto piccola, o trascurabile rispetto a quella della luce) otteniamo

$$E = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} = m_0 c^2 \left[1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2\right]^{-\frac{1}{2}} \cong m_0 c^2 \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{v}{c}\right)^2\right] = m_0 c^2 + \frac{1}{2} m_0 v^2$$

L'energia totale di un oggetto è la somma della sua energia cinetica

$$E_k = \frac{1}{2} m_0 v^2$$

e della sua energia a riposo ($E=mc^2$). Questo significa che quando il corpo non si muove, alla sua massa resta comunque associata un'energia. Osserviamo che la forma dell'espressione per l'energia a riposo $E=mc^2$ assomiglia a quella dell'energia cinetica nella meccanica di Newton.

LA LUCE HA MASSA ZERO?

L'equazione che abbiamo ricavato per la massa di un corpo in movimento

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$$

ci dice che a mano a mano che la velocità del corpo si avvicina a quella della luce, la sua energia va all'infinito (v. figura 3.6). Pertanto, la luce può avere soltanto massa nulla.

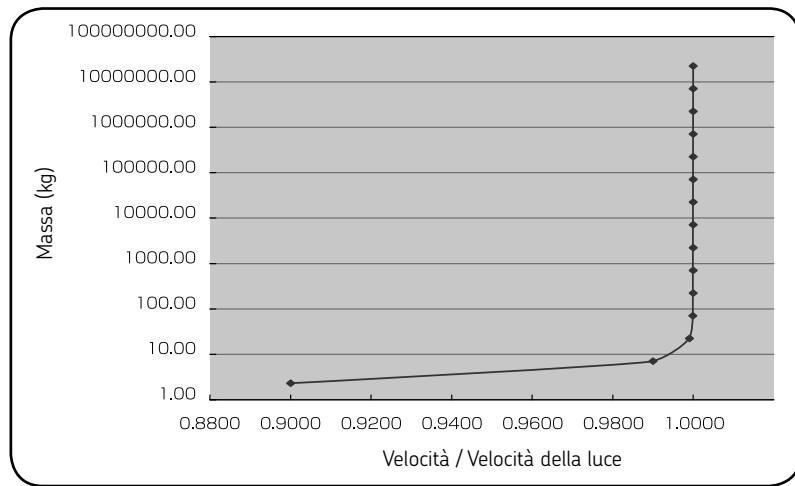


Figura 3.6 – Rapporto tra massa e velocità



CHE COS'È LA
RELATIVITÀ GENERALE?

COME VA,
MINAGI?

ANCORA SULLA
RELATIVITÀ?

GIÀ! E VOI,
RAGAZZI?

CON QUESTO
CALDO, NON ABBA-
MO VOGLIA DI FARE
NIENTE!

E NON È CHE NON
NE AVREMMO! CI SONO
LE RIUNIONI DEL CLUB E
TONNELLATE DI COMPITI
A CASA!

AH AH!

IL RAPPRE-
SENTANTE DEGLI
STUDENTI CHE LOTTA
PER TUTTI NOI! NON
VI SEMBRO
NOBILE?

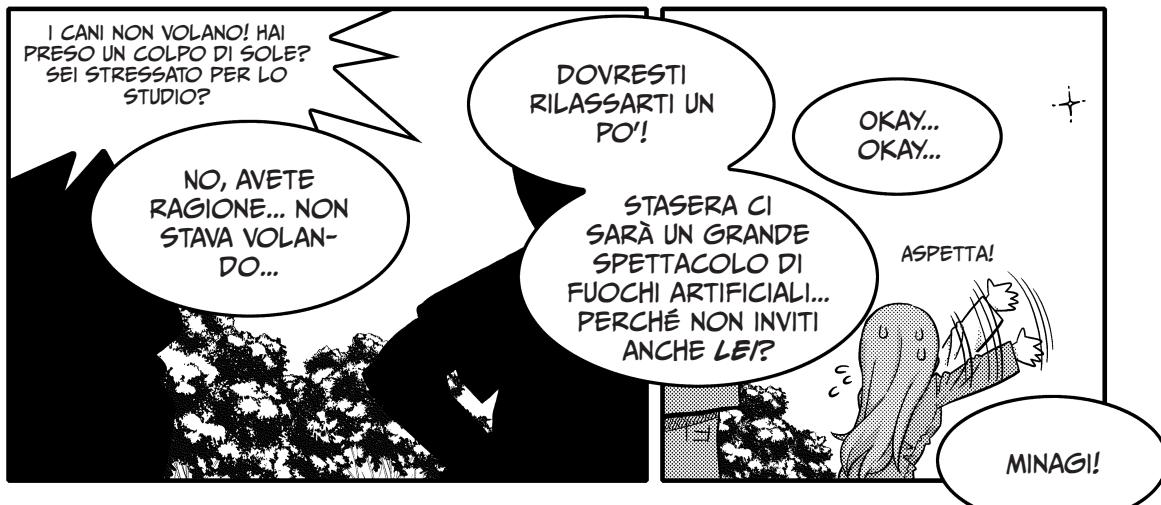
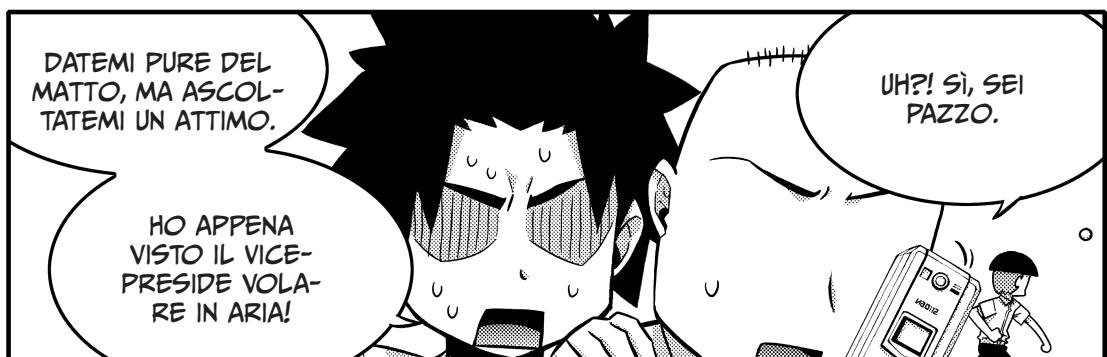
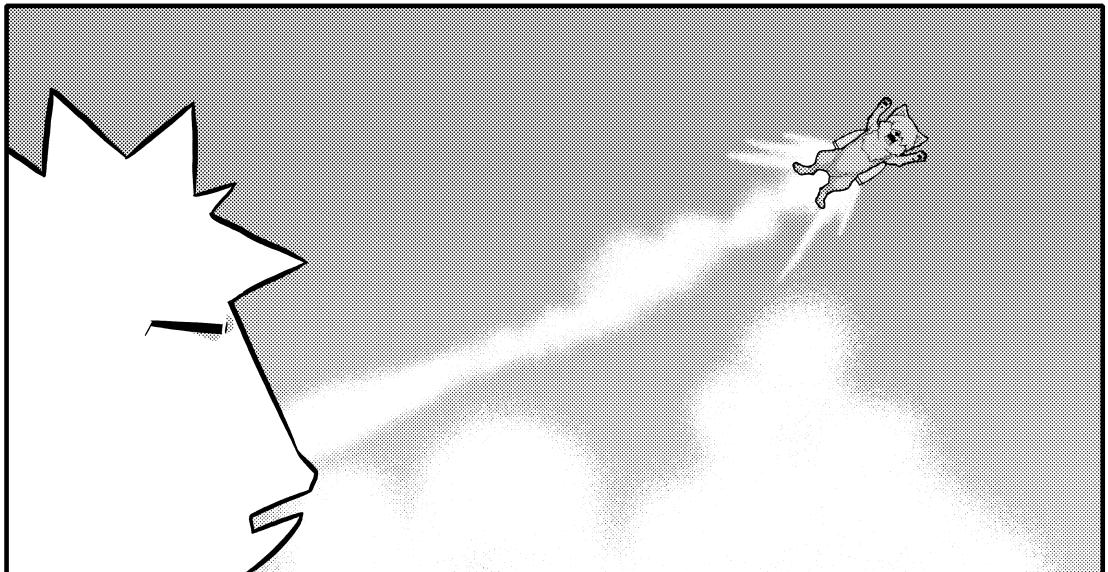
NON
PROPRIO.
MA GRAZIE
A TE...

...LE VACANZE
SONO SALVE,
QUINDI...

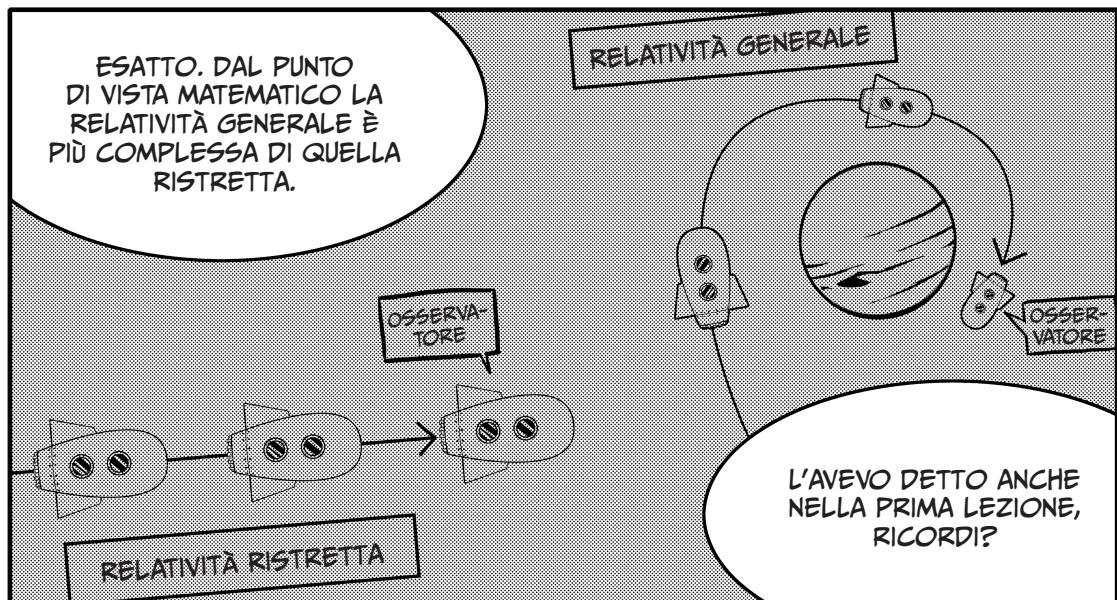
ANDIAMO

WOOSH!

?







1. PRINCIPIO DI EQUIVALENZA

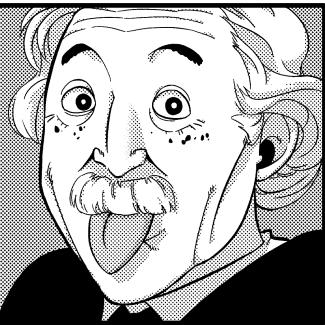
LA RELATIVITÀ RISTRETTA VALE PER SISTEMI DI COORDINATE IN ASSENZA DI GRAVITÀ O DI ACCELERAZIONE. QUEI SISTEMI CHE CHIAMIAMO INERZIALI.

MA IN REALTÀ UNA SIMILE SITUAZIONE IDEALE NON ESISTE.

POCO MA SICURO!

PERTANTO, EINSTEIN SAPEVA DI DOVERE INCORPORARE GRAVITÀ E ACCELERAZIONE NELLA SUA TEORIA...

ED EBBE UN'IDEA BRILLANTISSIMA, CHIAMATA PRINCIPIO DI EQUIVALENZA, CHE POSSIAMO CONSIDERARE LA PIETRA ANGOLARE DELLA RELATIVITÀ GENERALE.



IL PRINCIPIO AFFERMA CHE "LA FORZA INERZIALE AVVERTITA DURANTE UN MOTO ACCELERATO È INDISTINGUIBILE DALLA GRAVITÀ. LE DUE FORZE SONO PERTANTO LA MEDESIMA COSA."

EQUIVALENZA



ARRRGHH!

È LA STESSA SENSAZIONE
CHE AVVERTIAMO QUANDO
IL TRENO COMINCIA A MUO-
VERSÌ E VENIAMO SPINTI
INDIETRO, VERO?

CIUF CIUF
CIUF CIUF

ESATTO. QUESTA
FORZA VIENE DETTA INERZIA-
LE. E VISTO CHE L'HA NOMI-
NATO, CONTINUEREMO A USA-
RE L'ESEMPIO DEL TRENO.

ALLA PARTENZA, IL
TRENO ACCELERA IN
AVANTI, NELLA DIREZIONE
DEL MOTO.

NEL SISTEMA DI RIFERI-
MENTO DEL TRENO, IL TUO
CORPO AVVERTE UNA FOR-
ZA INERZIALE ESERCITATA
NELLA DIREZIONE OPPosta
A QUELLA DELL'ACCE-
LERAZIONE.

SECONDO LA PRIMA LEGGE DI NEWTON,
UN CORPO CONSERVA IL PROPRIO STATO
DI QUIETE O DI MOTO UNIFORME SE SU
DI ESSO NON VIENE ESERCITATA UNA
FORZA. QUANDO IL TRENO ACCELERA,
AVVERTI LA FORZA ESERCITATA DAL
SEDILE SULLA TUA SCHIENA.

MOVIMENTO DEL TRENO.

CAPISCO!

IN ALTRE PAROLE, QUESTO ACCADE PERCHÉ IL TUO CORPO SEGUE LE LEGGI DELL'INERZIA.

PER QUESTO CHIAMMO INERZIALE LA FORZA CHE AVVERTI IN QUEL MOMENTO.

FORZA INERZIALE

LA FORZA INERZIALE VIENE AVVERTITA SOLO DA CHI SI TROVA A BORDO DEL TRENO.

CHI SI TROVA IN STAZIONE, SULLA BANCHINA, NON LA PERCEPISCE.

CREEEK

OSSANTOCIELOOO...



ANALOGAMENTE, QUANDO IL TRENO DECELERA, LA FORZA INERZIALE VIENE AVVERTITA IN DIREZIONE OPPosta A QUELLA DELLA DECELERAZIONE.

LO CAPISCI BENE QUANDO CASCHI IN AVANTI, PERCHÉ IL TUO CORPO CERCA DI CONSERVARE LA VELOCITÀ A CUI TI STAI MUOVENDO.

SCREEECH!



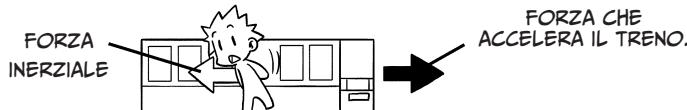
QUANDO IL TRENO ACCELERA O
DECELERA, LA FORZA INERZIALE
AGISCE CON LA STESSA INTENSITÀ,
IN DIREZIONE OPPosta.



TRENO A RIPOSO



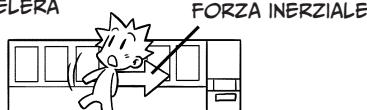
TRENO CHE ACCELERA



TRENO IN MOTO
A VELOCITÀ COSTANTE



TRENO CHE DECELERA

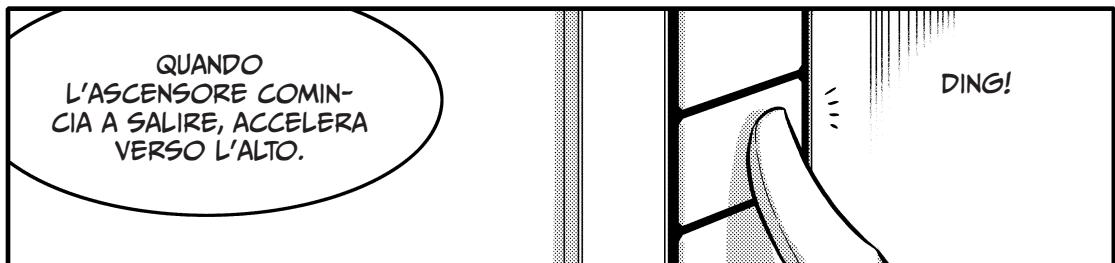
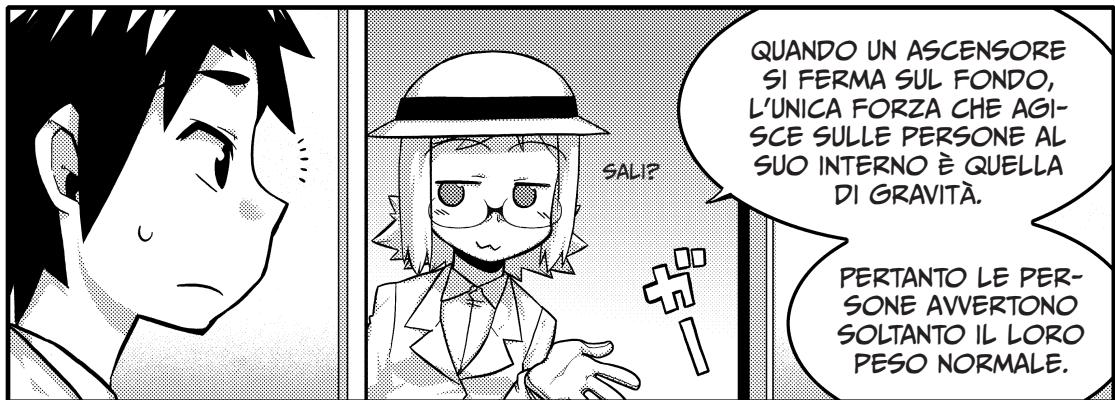


TRENO A RIPOSO



E ADESSO VEDIAMO
COSA SUCCIDE QUANDO
C'È DI MEZZO ANCHE
LA GRAVITÀ. COME
ESEMPIO USEREMO UN
ASCENSORE.

UN
ASCENSORE?



ED ECCO CHE
COSA SUCCIDE!

SICCOME LA FORZA
INERZIALE SI SOMMA ALLA
GRAVITÀ, CHE AGISCE NELLA STESSA
DIREZIONE, PER LE PERSONE ALL'IN-
TERNO DELL'ASCENSORE È COME SE
I LORO CORPI DIVENTASSERO PIÙ
PESANTI.

E QUANDO L'ASCENSORE
TORNA A SALIRE A VELOCITÀ
COSTANTE AVVERTONO CHE
IL LORO PESO Torna ALLA
NORMALITÀ.

A VELOCITÀ CO-
STANTE, NON VIENE
ESERCITATA NESSUNA
FORZA INERZIALE.

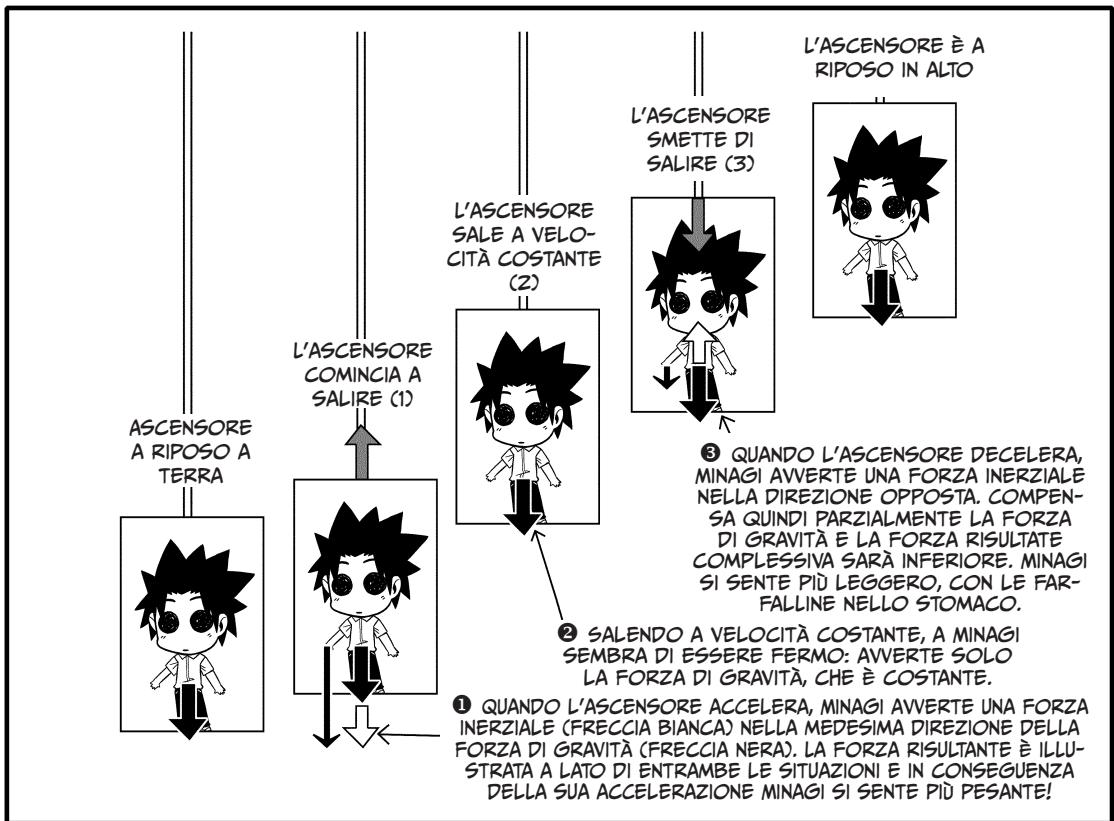
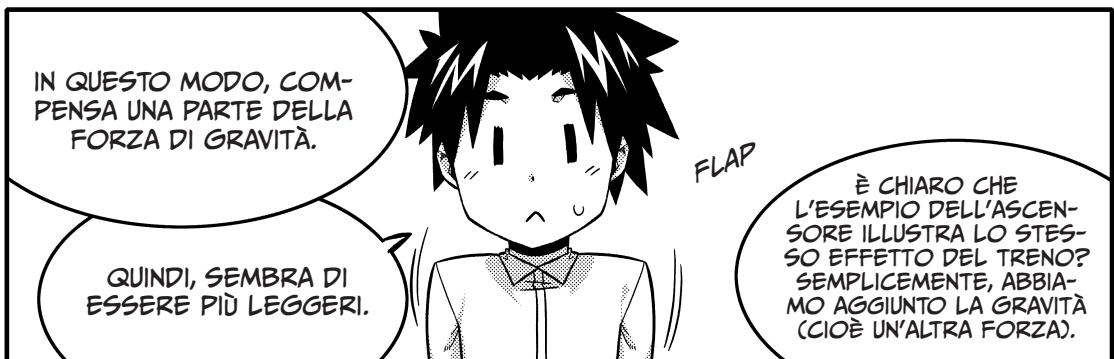
OOOHHH

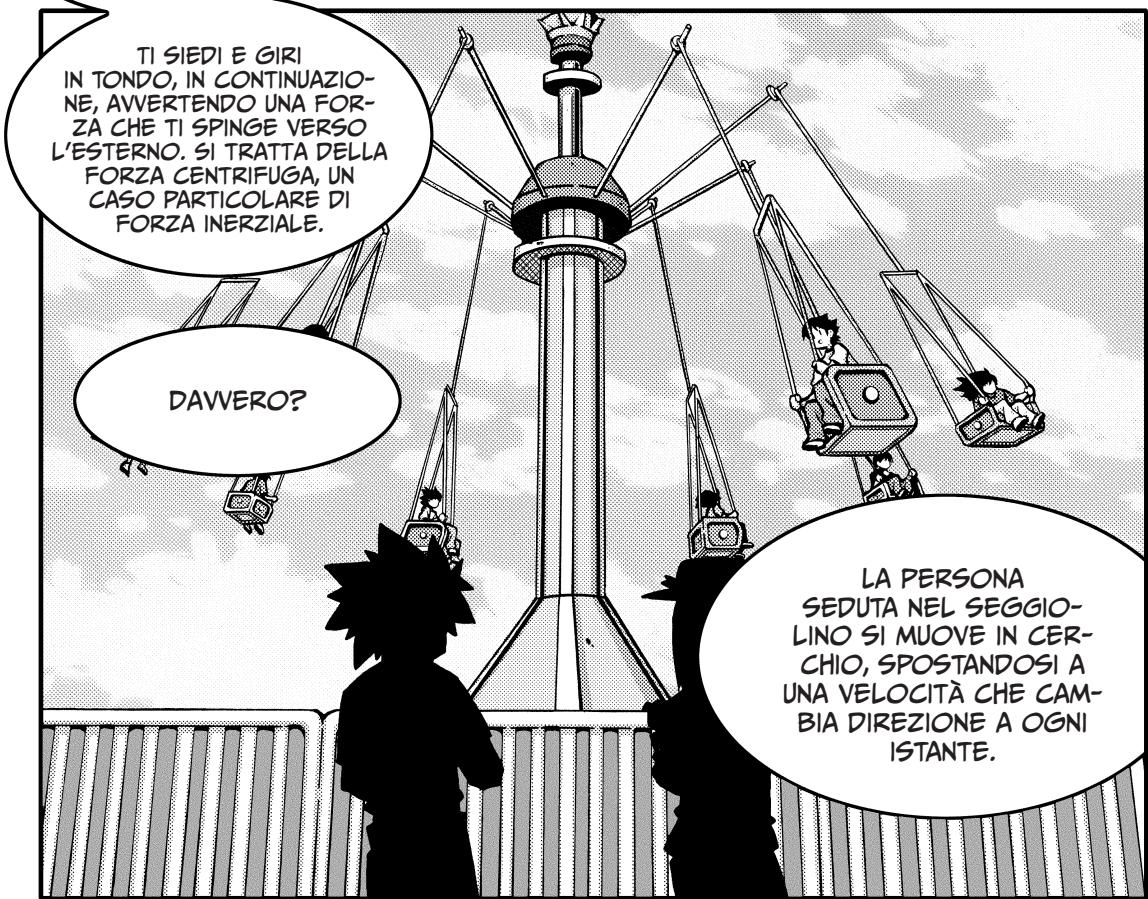
CHE TORNA AD AGIRE IN DIREZIO-
NE OPPOSTA QUANDO L'ASCEN-
SORE COMINCIA A FERMARSI.
SICCOME ORA DECELERA, LA
FORZA INERZIALE SI APPLICA IN
DIREZIONE OPPOSTA.

1 2 3 4 5 6 7 8 9

DING







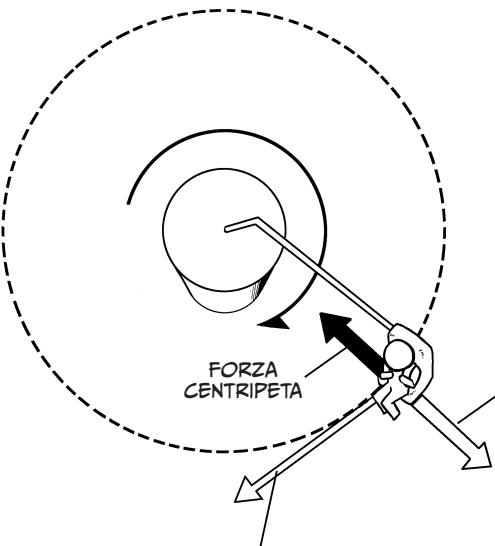
PENSA ALLO SPACE SHUTTLE...

LA GRAVITÀ TERRESTRE AGISCE SUI PASSEGGERI A BORDO E LO SHUTTLE SI SPOSTA DI MOTO ROTATORIO ATTORNO ALLA TERRA.

PER UN'ASTRONAVEM IN ORBITA STAZIONARIA ATTORNO ALLA TERRA, LA GRAVITÀ E LA FORZA CENTRIFUGA DERIVANTE DAL MOTO DI ROTAZIONE SI ANNULLANO ESATTAMENTE A VICENDA. E PRODUCONO NEGLI ASTRONAUTI IL SENSO DELL'ASSENZA DI PESO.

IN SOSTANZA, ANCHE SE A BORDO UN PASSEGGERO CAMMINASSE IN LINEA RETTA, SAREBBE SOGGETTO A UNA FORZA DIRETTA VERSO IL CENTRO DI ROTAZIONE, CHE CAMBIA LA SUA VELOCITÀ.

GIOSTRA DEL PARCO DIVERTIMENTI



ALL'INTERNO DELLO SHUTTLE NON C'È PESO, PERCHÉ LA GRAVITÀ E LA FORZA CENTRIFUGA SI BILANCINO.



TORNIAMO ORA A
BORDO DEL RAZZO.

SE UN RAZZO A GRAVITÀ
ZERO ACCELERA CON LA
MEDESIMA ACCELERAZIONE
CON CUI LA GRAVITÀ ATTIRA
GLI OGGETTI VERSO
LA TERRA...

VERSO
L'ALTO

STO VOLANDO!?

...A MINAGI VERRÀ
APPLICATA UNA FORZA
INERZIALE IDENTICA
ALLA GRAVITÀ.

ACCELERAZIONE DEL
RAZZO $9,8 \text{ m/s}^2$

GRAVITÀ ZERO

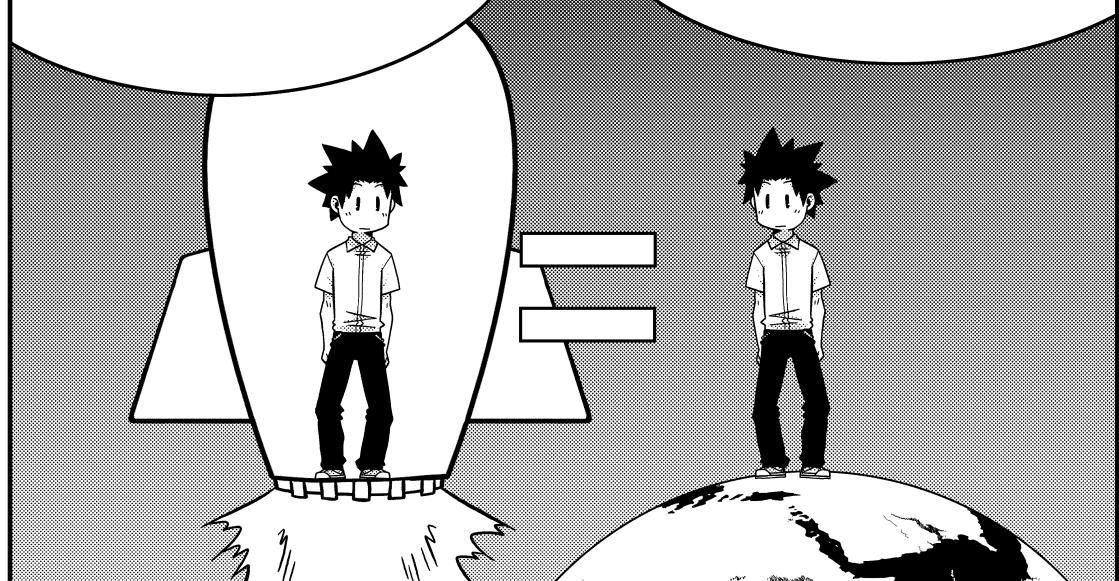
LA FORZA INER-
ZIALE FA SÌ CHE
SEM布RI DI ESSERE
IN PRESENZA DI
QUELLA GRAVITA-
ZIONALE.

SE NON POTESSIMO
VEDERE ALL'ESTERNO DEL
RAZZO, PENSEREMMO DI NON
AVERE MAI LASCIATO LA TERRA,
PROPRIO PERCHÉ LA FORZA
DELL'ACCELERAZIONE È
IDENTICA A QUELLA
DI GRAVITÀ.

OKAY, IMMAGINO
CHE ABbia SENSO.

ALL'INTERNO DEL RAZZO È IMPOSSIBILE DISTINGUERE TRA GLI EFFETTI DELLA GRAVITÀ E QUELLI DI UN RAZZO CHE ACCELERA.

EINSTEIN FECE PROPRIO QUESTA OSSERVAZIONE, CHE CHIAMÒ PRINCIPIO DI EQUIVALENZA, SECONDO CUI GRAVITÀ E ACCELERAZIONE SONO LA STESSA COSA.



CONSIDERANDO LA COSA AL CONTRARIO, POSSIAMO FARE SCOMPARIRE LA GRAVITÀ.

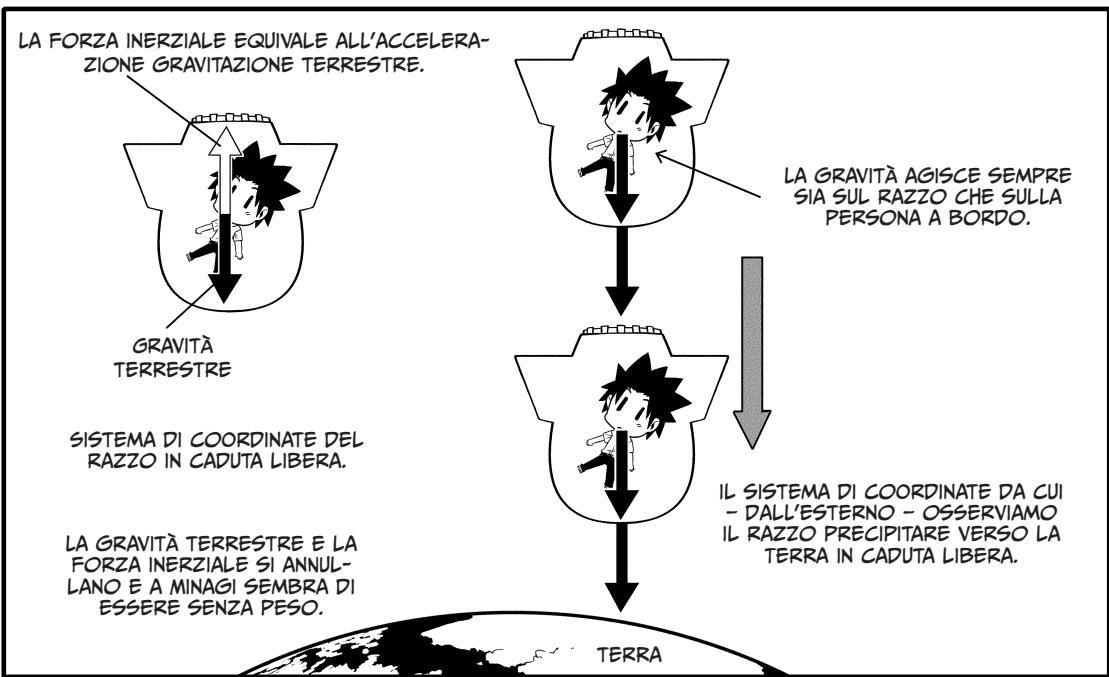
PUF
GRAVITÀ

CHE COSA SIGNIFICA?

SUPPONIAMO CHE IL RAZZO DI CUI PARLAVAMO PRIMA ARRIVI SULLA TERRA.

AL SUO INGRESSO NEL CAMPO GRAVITAZIONALE, LA GRAVITÀ COMINCEREbbe A FARSI SENTIRE SU MINAGI, A BORDO.

ESATTO.



2. LA GRAVITÀ AGISCE SULLA LUCE

LA GRAVITÀ È NEUTRALIZZATA DALLA FORZA INERZIALE ALL'INTERNO DEL RAZZO IN CADUTA LIBERA.

IN ALTRE PAROLE...

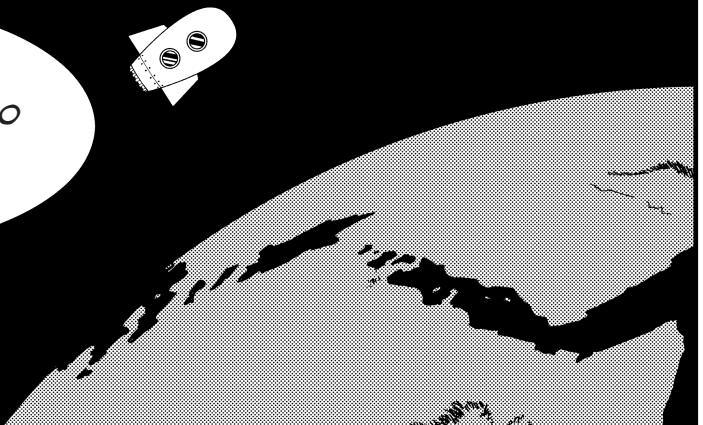
...POSSIAMO CONSIDERARE L'INTERNO DEL RAZZO COME UN SISTEMA INERZIALE NON SOGGETTO ALLA GRAVITÀ.



PERTANTO, COLPENDO LEGGERMENTE UNA PALLA, LA FAREMO VOLARE A VELOCITÀ COSTANTE.

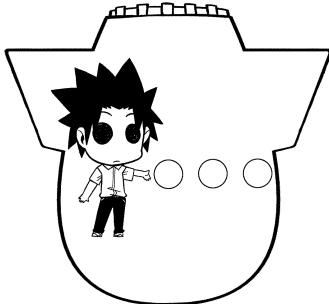
ESATTO.

MA CHE COSA
SUCCIDE SE OSSERVIAMO
LA STESSA SITUAZIONE
DALLA TERRA?

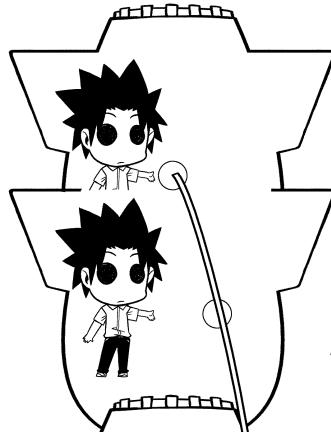


VUOI DIRE, SE UNA PERSONA SULLA TERRA OSSERVA LA PALLA ALL'INTERNO DEL RAZZO?

PRECISAMENTE.



OSSERVATA DALL'INTERNO DEL RAZZO, LA PALLA SI MUOVERÀ DI MOTO RETTILINEO UNIFORME.

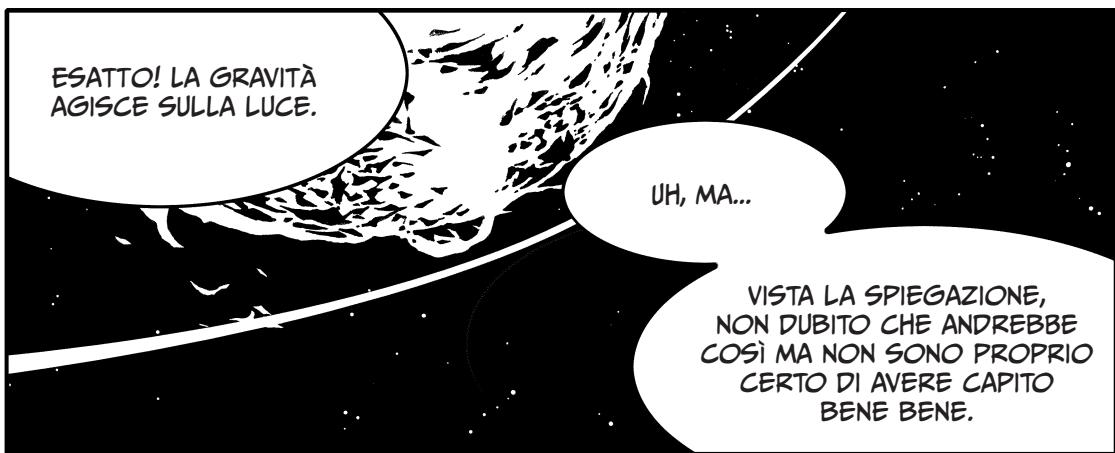


MA UNA PERSONA SULLA TERRA VEDRÀ LA PALLA CHE TRACCIA UNA PARABOLA.



SI TRATTA DI UNA SITUAZIONE ALTAMENTE IMMAGINARIA, MA SUPPONIAMO PER IL MOMENTO CHE ACCADA EFFETTIVAMENTE: DA TERRA IO E IL RAZZO PRECIPITIAMO IN VERTICALE MENTRE LA PALLA SEMBRERÀ UNA PARABOLA.

QUESTO PERCHÉ DA TERRA IO E IL RAZZO PRECIPITIAMO IN VERTICALE MENTRE LA PALLA SI SPOSTA ANCHE LATERALMENTE.



QUESTO PERCHÉ
LO SPAZIO VIENE
DEFORMATO DALLA
GRAVITÀ.

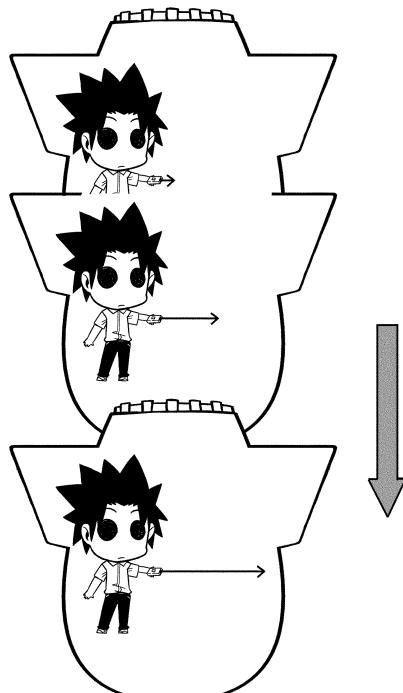
YUGA YUGA
YUA... BENEVE-
NUTI NEL MIO
SPAZIO DEFOR-
MATO!

QUELLA VOCE...
È BARON YU-
GAMI! È OPERA
TUA?

QUESTO FATTO
DELLA GRAVITÀ CHE DE-
FORMA LO SPAZIO NON
È MOLTO NOTO.

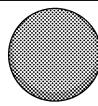
PROVIAMO
A SPIEGARLO PER
GRADI.

PER COMINCIARE,
SE ALL'INTERNO DI UN
RAZZO IN CADUTA LIBERA
ACCENDI UN PUNTATORE
LASER...



...POICHÉ NEL SISTEMA
DI RIFERIMENTO DEL RAZ-
ZO POSSIAMO APPLICARE LA
RELATIVITÀ SPECIALE, IL LASER
VIAGGERÀ IN LINEA RETTA ALLA
VELOCITÀ DELLA LUCE.

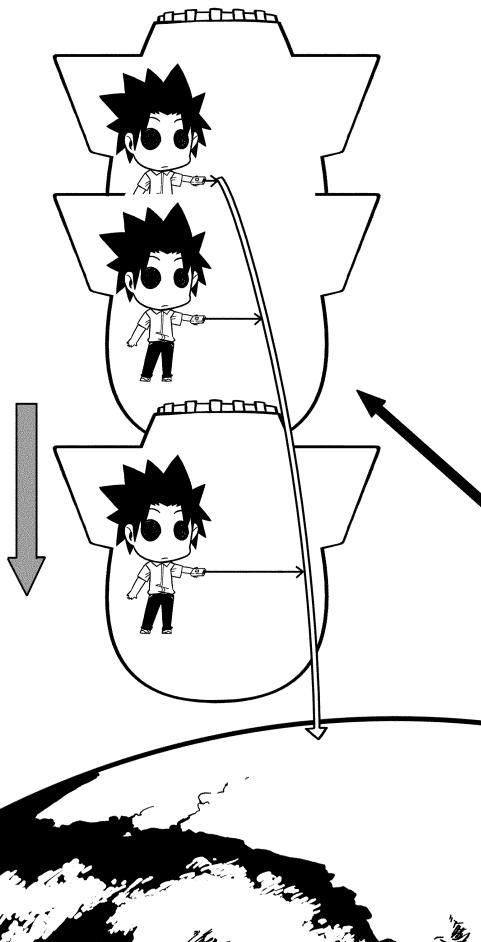
OSSERVATO DA TERRA, IL RAGGIO LASER ALL'INTERNO DEL RAZZO IN CADUTA LIBERA SEMBRERÀ TRACCIARE UNA PARABOLA.



OPLÀ

SECONDO LA RELATIVITÀ SPECIALE, NELLA DIREZIONE ORIZZONTALE LA LUCE SI MUOVE A VELOCITÀ COSTANTE.

SOTTOPOSTO A UNA FORZA DI GRAVITÀ COSTANTE, IL LASER CADE IN VERTICALE E I DUE MOVIMENTI COMBINATI PRODUONO UNA PARABOLA.



OSSERVATO DA TERRA, IL LASER PERCORRE UNA PARABOLA.

NATURALMENTE, LA LUCE È MOLTO PIÙ VELOCE DI UNA PALLA E QUINDI LA FIGURA NON È IN SCALA!



PROPRIO COME PER LA PALLA!

ALL'INTERNO DEL RAZZO
IN CADUTA LIBERA LA LUCE
PERCORRE LA MINOR DI-
STANZA POSSIBILE NELLO
SPAZIO DEL RIFERIMENTO
INERZIALE... IN ALTRE PARO-
LE, UNA LINEA RETTA.

SE INVECE OSSERVIAMO
L'INTERNO DEL RAZZO
DA TERRA... LA LUCE SI
PIEGA.

CI APPARE UN
PERCORSO CURVO CHE
CERTAMENTE NON SEM-
BRA PERCORRERE IL
TRAGITTO PIÙ BREVE.

QUINDI, OSSERVATA
DALL'INTERNO DEL RAZZO
OPPURE DA TERRA, LA LUCE
SEMPRE VIAGGIARE IN MODO
DIVERSO.

SI, È COSÌ,
MA...

SECONDO LA RELATIVITÀ
GENERALE, I FENOMENI
FISICI CHE, COME LA
LUCE, SI PROPAGANO
SEGUENDO IL CAMMINO
PIÙ BREVE NELLO SPA-
ZIOTEMPO...

...NON DOVREBBERO
DIPENDERE DAL
PUNTO DI VISTA.

NON SI TRATTA DI UNA
CONTRADDIZIONE?!

CALMA.

UH...

IN UN RIFERIMENTO
INERZIALE LO SPAZIOTEM-
PO È PIATTO E QUINDI LA
LUCE PROCEDE IN LINEA
RETTA... ED È QUELLO CHE
È SUCCESSO, NO?

QUANDO DA TERRA
OSSERVIAMO IL TRAGITTO
DELLA LUCE ALL'INTERNO DEL
RAZZO MENTRE STA ACCELERAN-
DO, LA LUCE DOVRÀ ATTRAVER-
SARE LO SPAZIO SEGUENDO IL
TRAGITTO PIÙ BREVE. MA L'AC-
CELERAZIONE DEL RAZZO RELA-
TIVAMENTE AGLI OSSERVATORI A
TERRA DEFORMA LO
SPAZIOTEMPO...

...E IL PERCORSO
PIÙ BREVE PER LA LUCE
DIVENTA UN ARCO DI PARA-
BOLA. È COSÌ CHE EIN-
STEIN RAZIONALIZZÒ LE
SUE INTUIZIONI.

CHE COSA?!

CHE NOZIONE
SCANDALOSA!

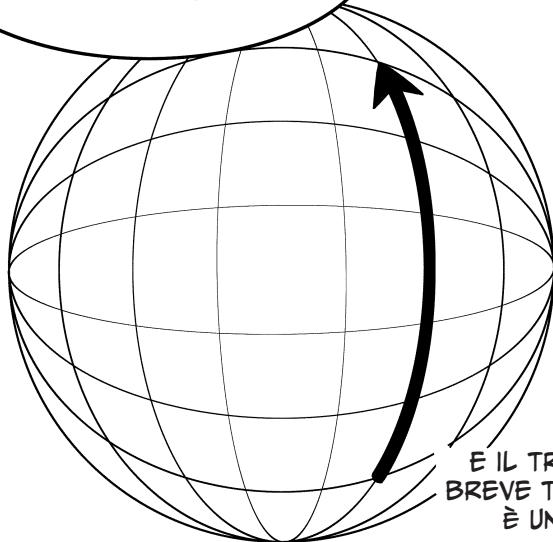
POCO MA SICURO.

EINSTEIN SI DOMANDÒ
INOLTRE SE LA CURVATU-
RA DELLO SPAZIOTEMPO
NON FOSSE ESSA STE-
SA LA GRAVITÀ.

IMMAGINARE UNO
SPAZIOTEMPO
CURVO È DAVVERO
DIFFICILE.

È VERO. PER ESEMPIO,
LA SUPERFICIE DELLA
TERRA È CURVA,
GIUSTO?

ANCHE SE NON È FACILE
IMMAGINARE UNO SPAZIOTEMPO
CURVO, IL TRAGITTO PIÙ BREVE
MUOVENDOSI SU UNA SUPERFICIE
COME QUELLA DELLA TERRA È UN
ARCO DI CERCHIO MASSIMO,
CIOÈ DI UN DIAMETRO.*



E IL TRAGITTO PIÙ
BREVE TRA DUE PUNTI
È UNA CURVA.

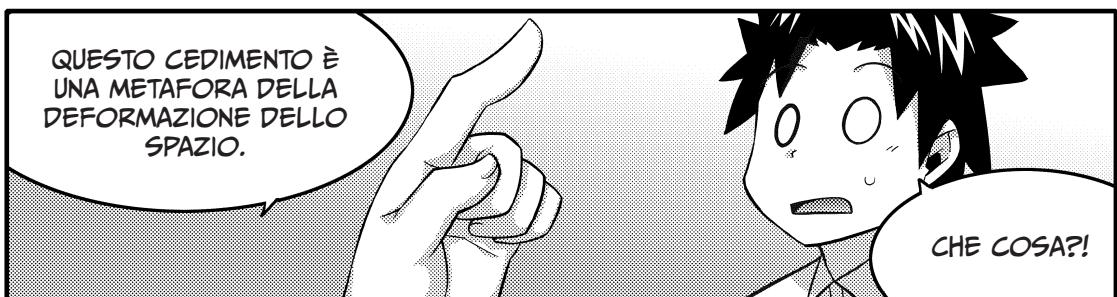
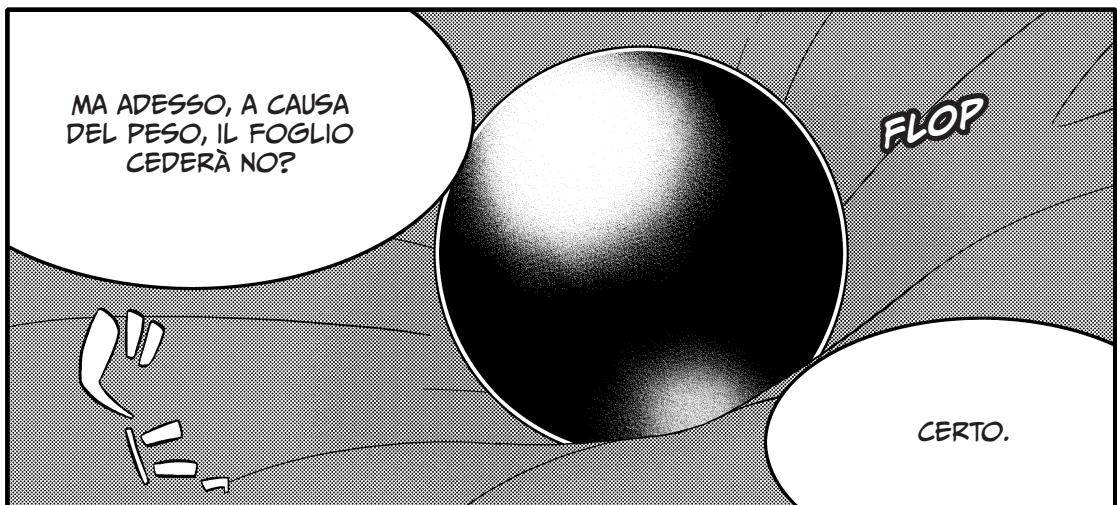


PER FARE LE COSE
UN PO' PIÙ SEMPLICI,
CONSIDERIAMO UNA
SUPERFICIE IN DUE
DIMENSIONI, CIOÈ PRIVA
DI SPESSORE.

LE COSE SI
COMPLICANO

S-SÌ... SEMPLICI!

* UN CERCHIO MASSIMO DIVIDE UNA SFERA IN DUE SEMISFERE
UGUALI. LA DISTANZA MINIMA TRA DUE PUNTI SU UNA SUPERFICIE
SFERICA È SEMPRE UNA PARTE (O ARCO) DI UN CERCHIO MASSIMO.



METTIAMOCI ANCHE UN'ALTRA PALLA.

IL FOGLIO CEDERÀ ANCORA DI PIÙ E LE DUE PALLE SI AVVICINERANNO L'UNA ALL'ALTRA.

LA DEFORMAZIONE DEL FOGLIO FA AVVICINARE LE DUE PALLE ESATTAMENTE COME LA CURVATURA PROVOCATA DALLA GRAVITÀ INDUCE GLI OGGETTI AD ATTRARSI A VICENDA.

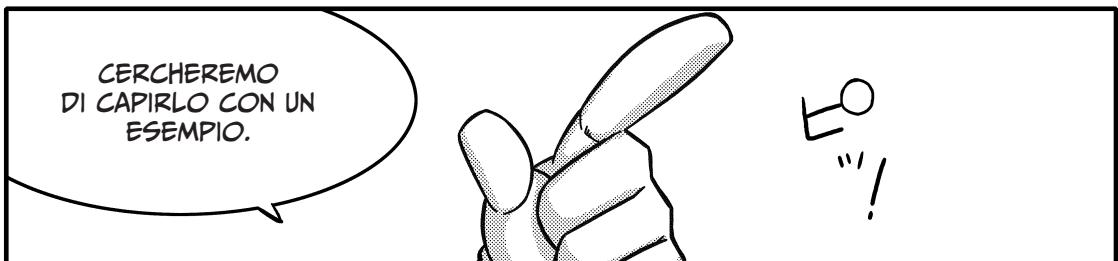
MA CERTO!

DOVUNQUE ESISTA MATERIA, LO SPAZIO CIRCOSTANTE SI DEFORMA COME QUESTO FOGLIO A CAUSA DELLE PALLE.

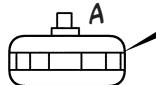
CHIAMIAMO "GRAVITÀ" QUESTO FENOMENO CHE SI PRODUCE NELLA DEFORMAZIONE.

CLICK

ORA CREDO DI AVERE CAPITO.



SUPPONIAMO CHE
CI SIA UNA TORRE
MOLTO ALTA.



IN CIMA ALLA
TORRE C'È MEGUMI
(MS A), A TERRA C'È
SAYAKA (MS B)...

...MENTRE RYOTA
(MR C) È ALL'INTER-
NO DI UN ASCENSORE
COSTRUITO A FIANCO
DELLA TORRE.*

B
TORRE

C
ASCENSORE

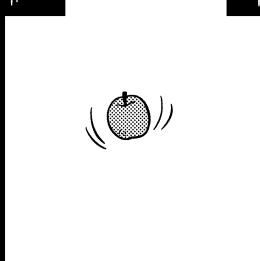
TUTTI E TRE HANNO LO
STESO MODELLO DI
OROLOGIO, CON UNA
LANCETTA SOLA.

POICHÉ LA GRAVITÀ
DEFORMA LO SPAZIOTEMPO,
NON SAPPIAMO SE IL TEMPO E
LA VELOCITÀ A CUI TRASCORRE
SONO GLI STESSI PER TUTTI.

* VE LI RICORDATE? LI ABBIAMO CONOSCIUTI NEL VOLUME 1
DEDICATO ALLA FISICA.

PER VERIFICARE GLI EFFETTI DELLA GRAVITÀ SUL TEMPO, CONFRONTEREMO VISIVAMENTE GLI OROLOGI DELLE TRE PERSONE MENTRE L'ASCENSORE È IN CADUTA LIBERA. TENIAMO BENE IN MENTE ALCUNE COSE:

1. ALL'INTERNO DELL'ASCENSORE IN CADUTA LIBERA GLI OGGETTI NON HANNO PESO.



2. VALE LA RELATIVITÀ RISTRETTA.



3. PERTANTO, L'OROLOGIO ALL'INTERNO DELL'ASCENSORE PROCEDE A INTERVALLI REGOLARI DI TEMPO.



ANALIZZIAMO LA SITUAZIONE IN MANIERA SISTEMATICA.

SICCOME MS A E MR C SI TROVANO ALLA STESSA ALTEZZA, SONO SOGGETTI ALLA MEDESIMA FORZA DI GRAVITÀ.



PERTANTO, IL TEMPO TRASCORRE ALLO STESSO MODO PER ENTRAMBI.



ESATTO.

SUPPONIAMO ORA DI TAGLIARE IL CAVO DELL'ASCENSORE...

...E CHE L'ASCENSORE COMINCI A PRECIPITARE.

COSA?!

EHI!

UN MOMENTO...

STAI BENE ATTENTO,
PERCHÉ ADESSO VIENE
LA PARTE IMPORTANTE...

MA GUARDA
QUANTO SI
ESALTA.

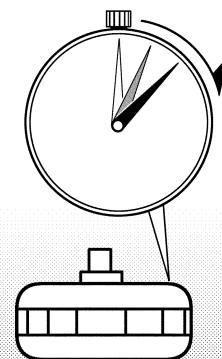


STRAP

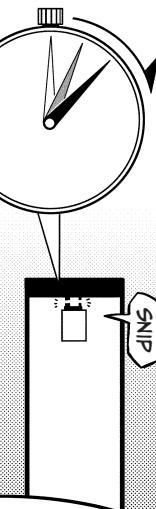


ALL'ISTANTE IN CUI IL CAVO VIENE TAGLIATO, LA VELOCITÀ È ANCORA ZERO E GLI OROLOGI DI MS A E MR C MISURANO LO STESSO TEMPO.

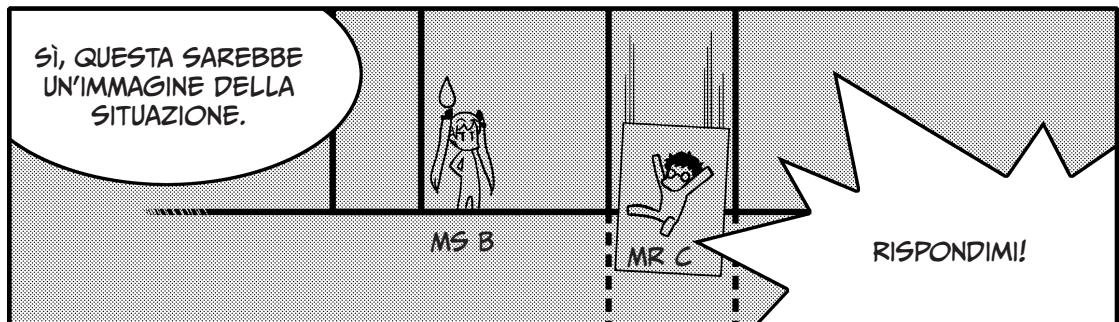
OROLOGIO
DI MS A



OROLOGIO
DI MR C



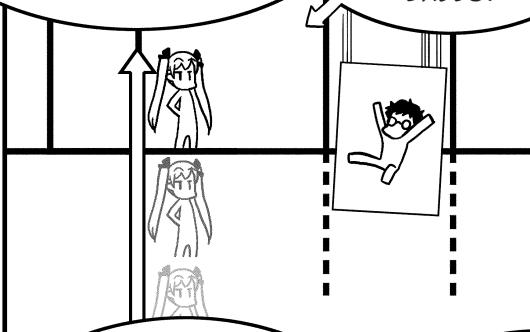
QUESTO PERCHÉ
L'ASCENSORE DEVE
ANCORA COMINCIARE
A CADERE.



SE DALL'INTERNO
DELL'ASCENSORE MR C
OSSERVA MS B, LA VEDA
MUOVERSI DAL BASSO
VERSO L'ALTO...

CIOÈ IL CONTRARIO
DEL PROPRIO MO-
VIMENTO IN CADUTA
DALL'ALTO DELLA
TORRE VERSO IL
BASSO.

SECONDO LA RELATIVITÀ
RISTRETTA, NELL'ISTANTE
IN CUI MR C SUPERÀ MS B,
A CAUSA DELLA DILATAZIO-
NE TEMPORALE NE VEDRA
RALLENTARE IL TEMPO (IL
TEMPO DI MS B).



SICCOME MR C
È IN CADUTA LIBERA IL
SUO SISTEMA DI RIFERI-
MENTO È INERZIALE E IL
SUO TEMPO PROCEDE
QUINDI A VELOCITÀ
COSTANTE.

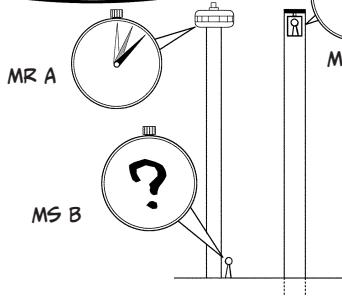
ORA METTIAMO UN
PO' D'ORDINE USANDO
MR C COME RIFERIMENTO.
QUANDO IL SUO ASCENSO-
RE HA COMINCIATO A PRE-
CIPITARE, I TEMPI DEGLI
OROLOGI DI MS A E MR C
ERANO ALLINEATI.

VEDIAMO COSA
INDICANO I TRE
OROLOGI QUANDO ALLA
FINE MR C ARRIVA A TERRA.
COME ABBIAMO GIÀ VISTO,
A CAUSA DELLA DILATAZIO-
NE TEMPORALE QUELLO DI
MS B È RIMASTO INDietro
RISPETTO A QUELLO
DI MR C.

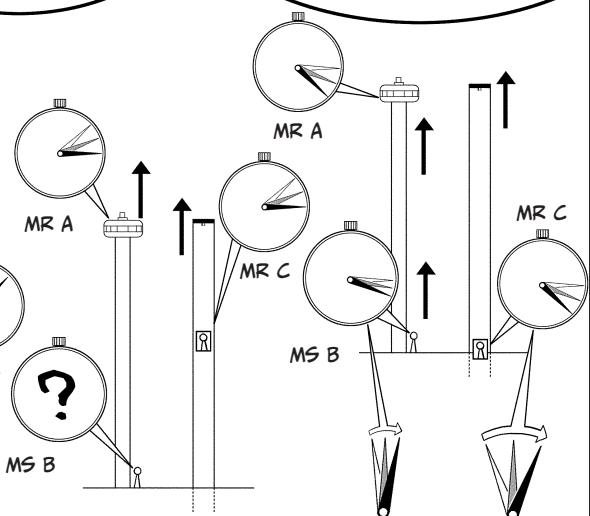
E POICHÉ GLI
OROLOGI DI MS A E MR C
SONO PARTITI ALLINEATI,
QUELLO DI MS B È RIMASTO
INDietro ANCHE RISPETTO
A QUELLO DI MS A.

IL TEMPO TRASCORRE
PIÙ LENTAMENTE DOVE LA
GRAVITÀ È FORTE!

ESATTO. IL TEMPO
TRASCORRE PIÙ LENTAMENTE IN
SISTEMI DI RIFERIMENTO PROSSIMI
ALLA SORGENTE DELLA GRAVITÀ,
COME PER ESEMPIO LA TERRA,
RISPETTO A PUNTI PIÙ LONTANI.



PIÙ PRECISAMENTE,
MINORE È IL POTENZIALE
GRAVITAZIONALE E PIÙ IL TEMPO
TRASCORRE LENTAMENTE.



DAL PUNTO DI VISTA
DI MR C, IL SUOLO SI
MUOVE VERSO DI LUI.

IL TEMPO DELL'ORO-
GIO DI MS B SCORRE PIÙ
LENTAMENTE RISPETTO
A QUELLO DELL'ORO-
GIO DI MR C.

4. LA RELATIVITÀ E L'UNIVERSO

LO SPAZIO E IL TEMPO... ANZI, LO SPAZIOTEMPO...

...CHE IN PASSATO VENIVA SEMPLICEMENTE CONSIDERATO UN CONTENITORE, UN RICETTACOLO PER LA MATERIA...

...NON PUÒ PIÙ ESSERE CONSIDERATO QUALCOSA DI DISTINTO DALLA MATERIA. OGGI SAPPIAMO CHE SONO LEGATI DA RELAZIONI DI INTERAZIONE RECIPROCA.

E ANCHE CON UNA BUONA COMPRENSIONE DELLA TEORIA, RESTA UNA COSA MOLTO STRANA.

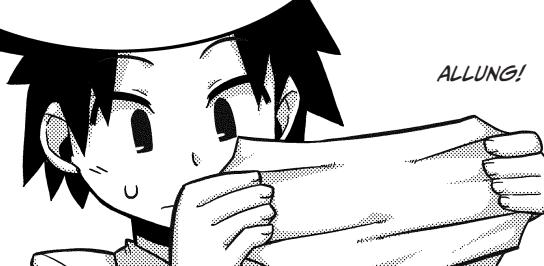
MA SI TRATTA DI UN CONCETTO CON RICADUTE IMPORTANTI SULLA NOSTRA PERCEZIONE DELLO SPAZIO CIRCONDANTE.

IN REALTÀ, LA COSMOLOGIA MODERNA DIPENDE INTEGRALMENTE DALLA RELATIVITÀ.

UH!



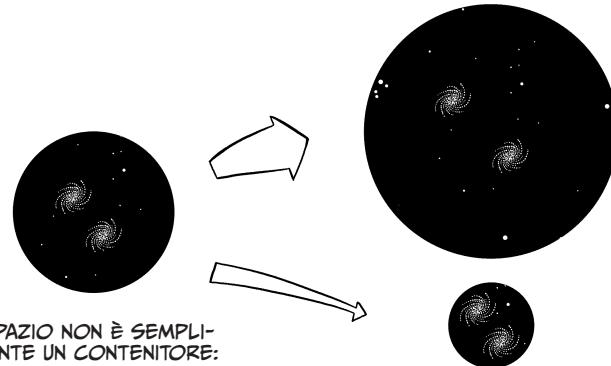
ANCHE SE ESISTONO DIVERSI MODELLI DI UNIVERSO, LA TEORIA DERIVATA DALLA RELATIVITÀ GENERALE...



...CHE SIN DALL'INIZIO SOSTENEVA CHE "L'UNIVERSO POTREBBE ESSERE IN ESPANSIONE"

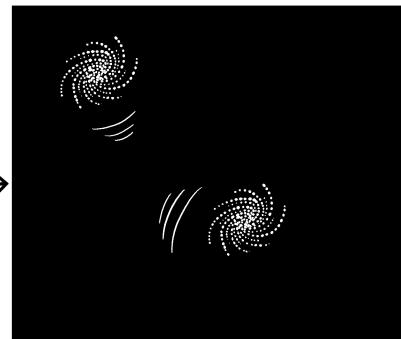
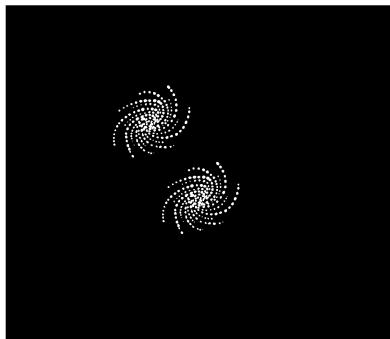
...SI IMPOSE COME IL MODELLO DOMINANTE..

OGGI SAPPIAMO CHE L'UNIVERSO, INTESO COME SPAZIOTEMPO, SI STA ESPANDENDO.



LO SPAZIO NON È SEMPLICEMENTE UN CONTENITORE: LE SUE DIMENSIONI SONO INFLUenzate DALL'INTERAZIONE CON LA MATERIA.

LA MECCANICA NEWTONIANA CONSIDERAVA LA MATERIA COME DISTRIBUITA IN UNO "SPAZIO" DI ESTENSIONE INFINTA E NON PREVEDEVA LA POSSIBILITÀ CHE LO SPAZIO STESSO POTESSE AMPLIARSI.

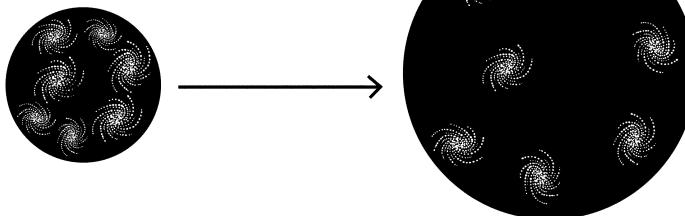


GRAZIE AD HUBBLE
SAPPIAMO CHE
L'UNIVERSO È IN
ESPANSIONE.

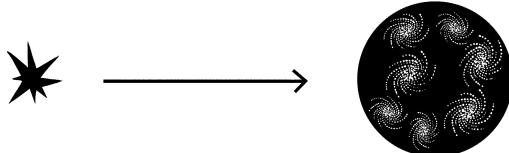
QUESTO FATTO
HA PORTATO ALLA
TEORIA DEL BIG
BANG, SECONDO
CUI...

HUBBLE OSSERVÒ CHE LA DISTANZA
TRA LE GALASSIE È IN AUMENTO.

"L'UNIVERSO
È INIZIATO CON UNA
GIGANTESCA ESPLO-
SIONE A PARTIRE DA
UN SINGOLO
PUNTO."



QUESTO PORTÒ A FORMULARE LA TEORIA DEL BIG BANG.



NE HO SENTITO
PARLARE! IL BIG
BANG...

UNA PAROLA
CHE TRABOCCA
DI UNA SORTA
DI MAGICO PO-
TERE!

SEI PROPRI
UN BAMBINO!

BRA-KOOM



HAI PROPRIO SGOTTATO, E TE LO MERITI.

NON FARE TARDI, OKAY?

UH...

ALMENO MI SEMBRERÀ DI ESSERE UN PO' IN VACANZA...

SCUSA SE TI HO FATTO ASPETTARE... AH, AH!

MISS Uraga è in ritardo anche se mi ha detto di non essere in ritardo.

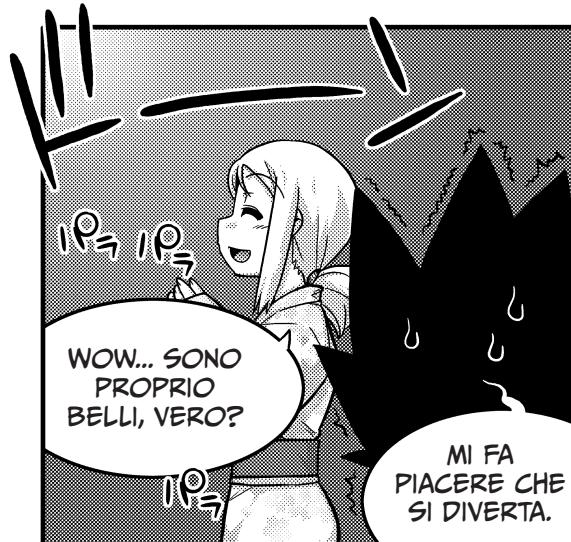
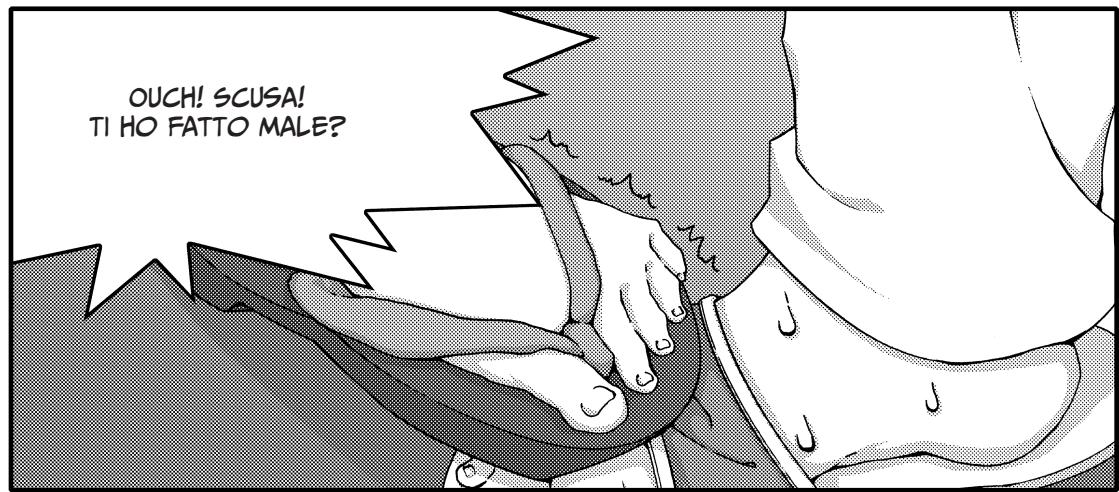
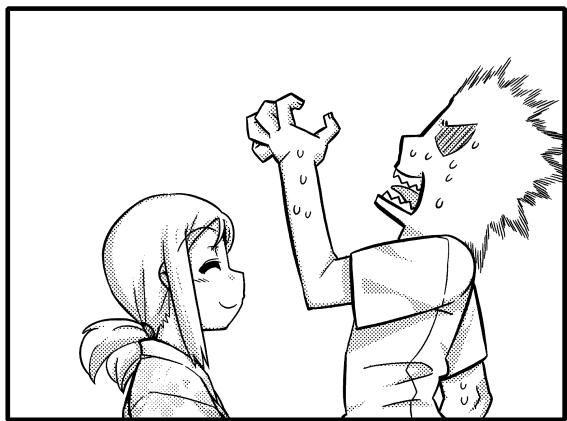
REFUSED

PREGO.

SI SERVA!

OH, BUONASERA!

CHE C'È?



GO MINAGI!
RELATIVITÀ!

*ALE, MINAGI! RELATIVITÀ!

MINAGI...? RELATIVITÀ? MA CHE COSA...?!

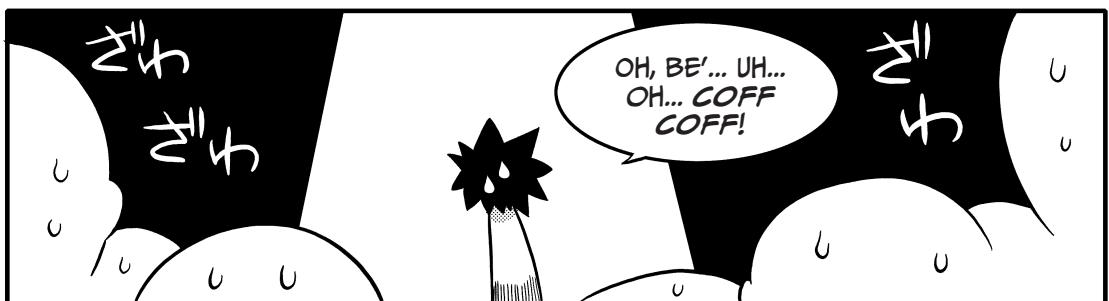
ALE!

WOW!
GUARDATE
LÀ!

FOR-ZA! FOR-ZA!
FOR-ZA MI-NA-GI!

VAI! VAI!
VAI!

LO SAPEVO CHE
DOVEVI ESSERCICI TU
DI MEZZO!



IL RALLENTAMENTO DEL TEMPO NELLA RELATIVITÀ GENERALE

Vediamo, con un po' di equazioni, di capire meglio il rallentamento del tempo di cui si è parlato nella storia.

Assumeremo anche noi che Ms A si trovi in cima alla torre, Ms B ai piedi della torre e Mr C all'interno dell'ascensore costruito di fianco alla torre, come nella figura 4.1.

Ipotizzeremo anche che le tre persone abbiano orologi identici, anche se – a causa della deformazione dello spaziotempo operata dalla gravità – non sappiamo se i rispettivi tempi e le loro velocità siano i medesimi.

Verificheremo pertanto la velocità con cui il tempo trascorre, a causa della gravità, tenendo conto dei tre fatti seguenti:

1. All'interno dell'ascensore in caduta libera, ci troviamo in una condizione di assenza di peso;
2. All'interno dell'ascensore possiamo applicare la Relatività Ristretta, perciò il tempo avanza a velocità costante;
3. L'orologio di Ms A in cima alla torre e di Ms B a terra procedono a velocità costante ma diversa.

Per verificare l'influenza della gravità sul trascorrere del tempo, applicheremo la seguente procedura:

1. Allineiamo i tempi dell'orologio di Mr C all'interno dell'ascensore e di Ms A, all'inizio della discesa;
2. Confrontiamo i tempi dell'orologio di Mr C all'interno dell'ascensore e di Ms A, alla fine della discesa.

All'inizio, poiché Ms A e Mr C si trovano alla stessa altezza, sono soggetti alla stessa gravità.

Sia z l'altezza e ϕ_1 il potenziale gravitazionale, cioè il rapporto tra l'energia potenziale e la massa di un oggetto. Per esempio, l'energia potenziale gravitazionale sulla superficie terrestre è mgh , e il potenziale gravitazionale è gh .

Allineiamo quindi i tempi di Ms A e Mr C, e le velocità a cui trascorrono: siano $\Delta\tau_1$, $\Delta\tau_2$ e $\Delta\tau_3$ gli intervalli di tempo che trascorrono per Ms A, Ms B e Mr C, rispettivamente.

Supponiamo poi di tagliare il cavo dell'ascensore: in questo istante, la sua velocità (quella alla quale Ms A sale verso l'alto, dal punto di vista di Mr C) è $v=0$, gli orologi di Ms A e Mr C segneranno lo stesso tempo:

$$\textcircled{1} \quad \Delta\tau_1 = \Delta\tau_3$$

L'ascensore è attratto dalla gravità e la sua velocità aumenta: sia v quella a cui passa davanti a Ms B.

Se in quell'istante, dall'interno dell'ascensore, Mr C osservasse Ms B, la vedrebbe muoversi verso l'alto, verso di sé, in direzione opposta alla propria (Mr C sta cadendo verso terra), come in figura 4.2.

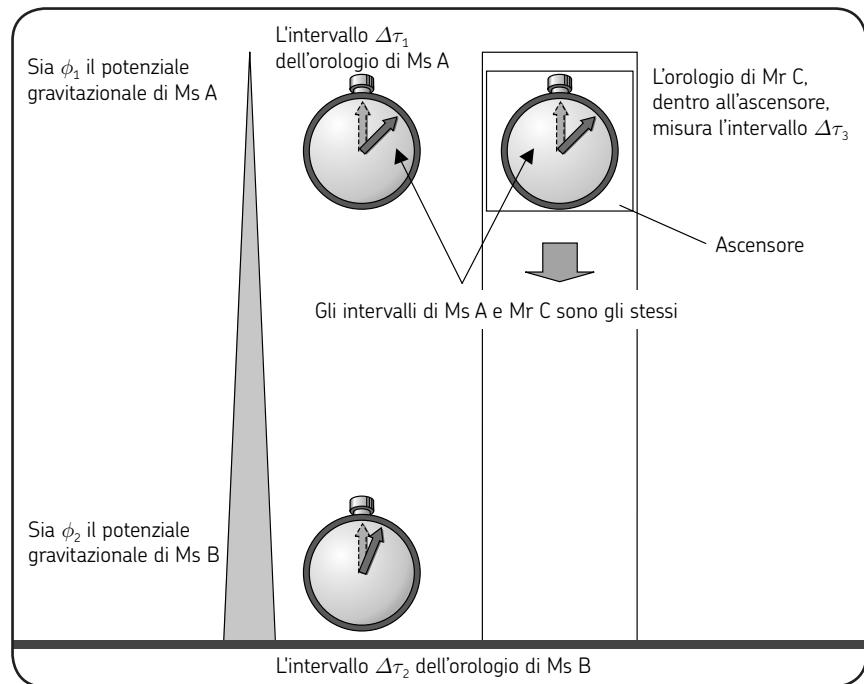


Figura 4.1 – Allineamento degli intervalli temporali dell'orologio di Mr C all'interno dell'ascensore e di Ms A all'istante in cui l'ascensore comincia a precipitare

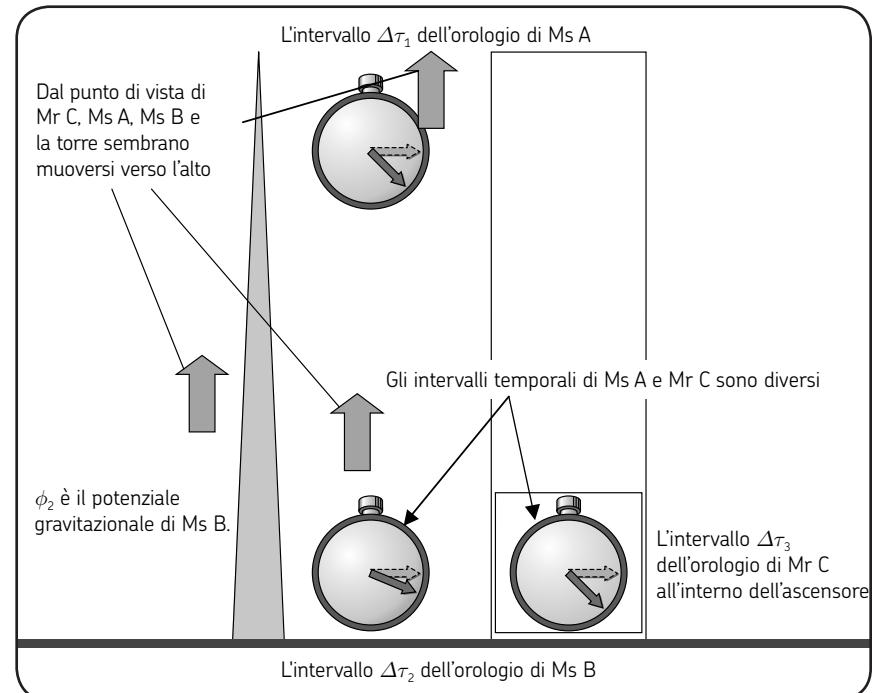


Figura 4.2 – Al termine della caduta, per Mr C all'interno dell'ascensore e per Ms B a terra sono trascorsi intervalli di tempo diversi.

Per la Relatività Speciale, nell'istante in cui Mr C supera Ms B, abbiamo

$$\textcircled{2} \quad \Delta\tau_2 = \Delta\tau_3 \sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2},$$

e dalle equazioni **1** e **2**, eliminando $\Delta\tau_3$ abbiamo

$$\textcircled{3} \quad \frac{\Delta\tau_2}{\Delta\tau_1} = \sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2} < 1$$

Questo dimostra che l'intervallo temporale misurato da Ms B è inferiore a quello misurato da Mr C.

In altre parole, il tempo dell'orologio di Ms B, soggetto a un potenziale gravitazionale ϕ_2 basso (vicino all'origine della gravità), trascorre più lentamente del tempo misurato dall'orologio di Mr A, dove il potenziale gravitazionale ϕ_1 è maggiore (lontano dall'origine della gravità).

Ne concludiamo che minore è il potenziale gravitazionale, più il tempo trascorrerà lentamente. Supponiamo ora che la velocità v sia piccola e di utilizzare le formule della meccanica newtoniana (cioè $x = \frac{v}{c}$, e $x \ll 1$).

Allora $\phi_1 > \phi_2$, e in virtù della conservazione dell'energia, nell'istante in cui l'ascensore arriva a terra con velocità v , tutta la sua energia potenziare si sarà convertita in energia cinetica. Avremo allora:

$$(\phi_1 - \phi_2)m = \frac{1}{2}mv^2$$

Otteniamo quindi:

$$\textcircled{4} \quad \phi_1 - \phi_2 = \frac{1}{2}v^2$$

Per $x \ll 1$, possiamo usare questa approssimazione:

$$(1+x)^\alpha \approx 1 + \alpha x$$

E ponendo $x \ll 1$ perché $x = \frac{v}{c}$, abbiamo:

$$\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2} = (1 - x^2)^{\frac{1}{2}} \approx 1 - \frac{1}{2}x^2 = 1 - \frac{1}{2}\left(\frac{v}{c}\right)^2$$

Insieme all'equazione ③, otteniamo:

$$⑤ \quad \frac{\Delta\tau_2}{\Delta\tau_1} = \sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2} \approx 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{v}{c}\right)^2$$

Dall'equazione ④ sostituiamo $\frac{1}{2}v^2 = \phi_1 - \phi_2$ in ⑤:

$$⑥ \quad \frac{\Delta\tau_2}{\Delta\tau_1} \approx 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{v}{c}\right)^2 = 1 - \frac{\phi_1 - \phi_2}{c^2}$$

Poiché $\frac{\phi_1 - \phi_2}{c^2} \approx 1 - \frac{\Delta\tau_2}{\Delta\tau_1} = \frac{\Delta\tau_1 - \Delta\tau_2}{\Delta\tau_1}$ possiamo riscrivere l'equazione ⑥ come:

$$⑦ \quad \frac{\Delta\tau_1 - \Delta\tau_2}{\Delta\tau_1} \approx \frac{\phi_1 - \phi_2}{c^2}$$

L'equazione ⑦ mostra l'esatto collegamento tra il potenziale gravitazionale e il rallentamento del tempo (la dilatazione temporale).

In figura 4.3 vediamo come la differenza di potenziale $\phi_1 - \phi_2$ tra il suolo e un oggetto posto a un'altezza h è data dal potenziale gravitazionale gh .

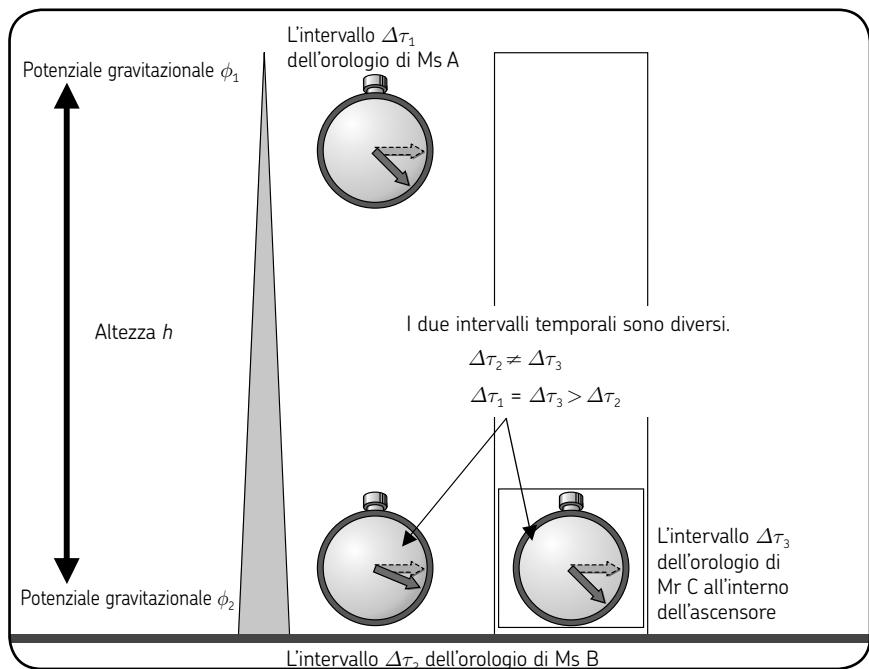


Figura 4.3 – Gravità relativamente debole al suolo

Se poniamo $\phi_2 = 0$, h è l'altezza corrispondente al potenziale ϕ_1 , e g l'accelerazione gravitazionale al suolo, sostituendo in 7 $\phi_1 = gh$ and $\phi_2 = 0$ otteniamo:

$$\frac{\Delta\tau_1 - \Delta\tau_2}{\Delta\tau_1} \approx \frac{\phi_1 - \phi_2}{c^2} = \frac{gh - 0}{c^2} = \frac{gh}{c^2}$$

L'orologio posto all'altezza maggiore misura un intervallo di tempo $\Delta\tau_1$ che anticipa l'orologio a terra, che avrà misurato un intervallo $\Delta\tau_2$. Questo perché nell'equazione sopra sia, gh/c^2 che $\Delta\tau_1$ sono quantità positive; pertanto $\Delta\tau_1 - \Delta\tau_2 > 0$; e quindi, $\Delta\tau_1 > \Delta\tau_2$.

LA VERA NATURA DELLA GRAVITÀ NELLA RELATIVITÀ GENERALE

Come si spiega nella storia, lo spaziotempo è deformato dalla presenza della materia.

È inoltre chiaro come questa stessa deformazione agisca esattamente come la gravità nell'attrarre la materia circostante.

Einstein unificò queste considerazioni in un insieme di equazioni che oggi chiamiamo *le Equazioni di campo di Einstein*, che mostrarono come il tempo e lo spazio (lo spaziotempo), che in passato venivano considerati una sorta di ambiente per i fenomeni fisici, con una propria esistenza indipendente, erano in realtà collegati in maniera intrinseca alla presenza di materia.

FENOMENI SCOPERTI GRAZIE ALLA RELATIVITÀ GENERALE

Parleremo ora di fenomeni fisici predetti o spiegati dalla Relatività Generale:

- Lenti gravitazionali
- Precessione anomala del perielio di Mercurio
- Buchi neri

DEVIAZIONE DELLA LUCE (LENTE GRAVITAZIONALE) IN PROSSIMITÀ DI GRANDI MASSE (COME QUELLA DEL SOLE)

Si parla di *lente gravitazionale* quando, passando nelle vicinanze del Sole, la luce viene deviata.

Vicino a una massa come quella del Sole lo spazio è deformato, come si vede in figura 4.4. Poiché la luce segue quella deformazione, quando proviene per esempio da una stella la posizione della stella ne risulta alterata. Questo effetto fu osservato per la prima volta in occasione di un'eclisse di Sole totale e fu la prima dimostrazione della validità della Relatività Generale.

La figura 4.5 illustra la situazione seguente: in presenza di una massa rilevante (come quella di un galassia) la luce verrà deviata come se in un punto intermedio del suo percorso fosse presente una lente, e la deviazione potrebbe fare apparire la galassia come se fosse deformata..

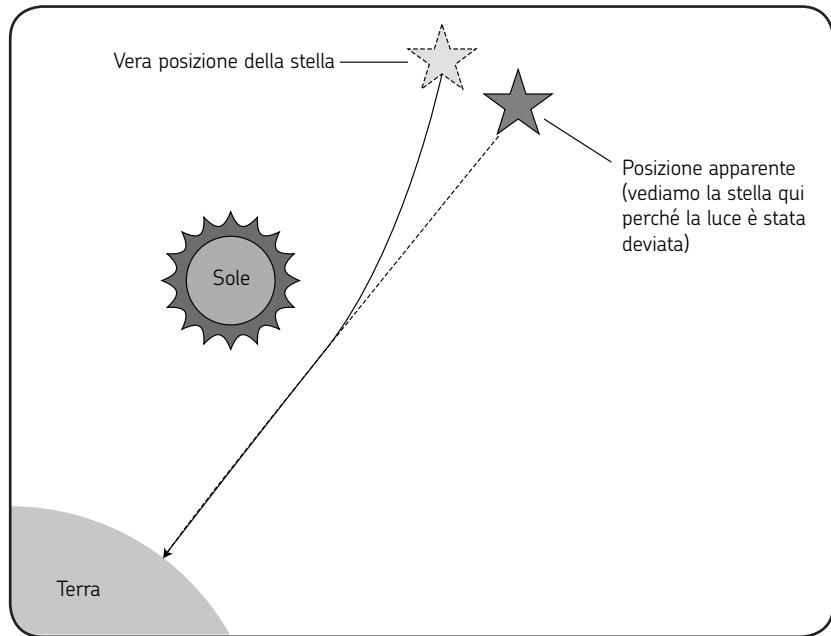


Figura 4.4 – Deviazione della luce in presenza di una massa

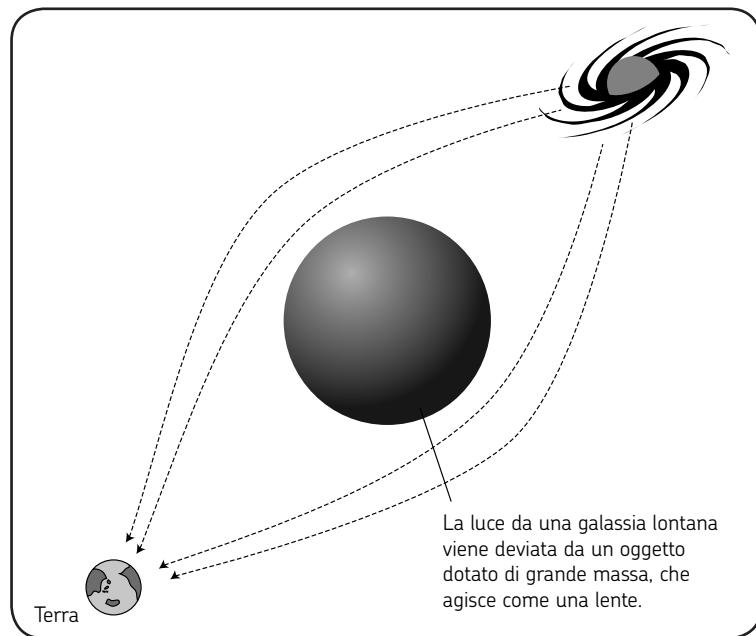


Figura 4.5 – Lente gravitazionale

LA PRECESSIONE DEL PERIELIO DI MERCURIO

Il *perielio* è il punto dell'orbita in cui un pianeta è più vicino al Sole (v. figura 4.6). Sappiamo che il perielio di Mercurio si sposta ogni secolo di circa 574 secondi di arco (questi "secondi" sono una unità di misura angolare, non di tempo: un minuto d'arco è 1/60 di grado e un secondo è 1/60 di minuto; in altre parole, un secondo d'arco è 1/3600 di grado). Quindi il perielio di Mercurio si sposta di circa 0,16 gradi ogni secolo.

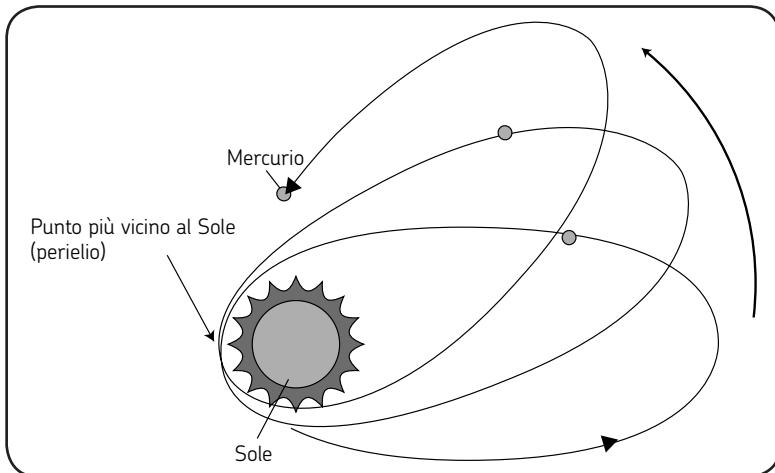


Figura 4.6 – Lo spostamento anomalo del perielio di Mercurio

Con la meccanica newtoniana si cercarono le possibili cause di questo spostamento, come per esempio l'azione gravitazionale degli altri pianeti, ma nessuna analisi fu in grado di spiegare i secondi residui dello spostamento, detto anche "precessione".

Utilizzando la Relatività Generale per calcolare il contributo della deformazione dello spaziotempo provocata dalla massa del Sole, si trovarono esattamente questi 43 secondi.

BUCHI NERI

Un *buco nero* è una regione dello spaziotempo in cui si ha una enorme concentrazione di massa e la gravità è così forte che neppure la luce può più uscirne.

Questo capita per esempio quando una stella ha una massa che è diverse volte quella del nostro Sole, e alla fine della sua vita si trasforma in una Supernova ed esplode.

Il risultato dell'esplosione è un buco nero.

Siccome la luce non può uscirne, non possiamo osservare direttamente un buco nero. Se però nei suoi pressi ci sono altre stelle, i loro gas saranno attratti dal buco nero e andranno a formare un disco di accrescimento, cioè una nube di materia diffusa intorno al buco nero. Quando i gas del disco di accrescimento precipitano verso il buco nero, si verificano emissioni di raggi X e raggi gamma.

Un primo oggetto stellare candidato a essere un buco nero fu scoperto nel 1971 nella costellazione del Cigno, e attualmente si pensa che esistano dei buchi neri estremamente massicci, e si trovino al centro di diverse galassie.

IL GPS (GLOBAL POSITIONING SYSTEM) E LA RELATIVITÀ GENERALE

Il sistema GPS (Global Positioning System) fa uso di 24 satelliti in orbita intorno alla Terra per determinare la posizione sulla superficie del pianeta. Ogni satellite trasmette a terra un segnale che comunica il tempo di emissione. Un ricevitore (come per esempio il sistema di navigazione di un'automobile) riceve i segnali, che viaggiano alla velocità della luce.

L'istante della ricezione viene confrontato con quello di emissione che giunge insieme al segnale e la differenza viene moltiplicata per la velocità della luce, fornendo in questo modo la distanza del satellite. In altre parole, se supponiamo che la distanza tra satellite e ricevitore sia di 20.000 km, allora l'onda radio raggiungerà il ricevitore in $20.000.000 \text{ m} / 300.000.000 \text{ m/s} = 0,067 \text{ secondi}$. Il calcolo viene effettuato utilizzando onde da tre satelliti diversi per determinare la posizione del ricevitore a terra.

Naturalmente, se si verifica un errore nella determinazione dei tempi, sarà sbagliata anche la posizione risultante. Se per esempio il tempo trasmesso dal satellite avesse uno spostamento di 1 microsecondo (1 milionesimo di secondo) questo produrrebbe una differenza di 300 metri nella distanza calcolata ($300.000.000 \text{ m/s} \times 0,000001 \text{ s} = 300 \text{ m}$).

Un satellite GPS orbita intorno alla terra a una distanza di circa 20.000 chilometri e a una velocità che gli fa completare una rivoluzione in circa 12 ore. A quella velocità si avvertono gli effetti della Relatività Ristretta e il tempo viene rallentato di 7,1 microsecondi al giorno. Dal momento che ci troviamo distanti dalla Terra, per la Relatività Generale il tempo scorre più rapidamente che sulla superficie di circa 46,3 microsecondi al giorno (come visto nell'equazione 7 a pagina 161). L'effetto risultante è che il tempo trasmesso dal satellite rallenta di 39,2 microsecondi al giorno (v. figura 4.7). Il sistema GPS incorpora e compensa con grande precisione tanto gli effetti della Relatività Ristretta quanto quelli della Relatività Generale.

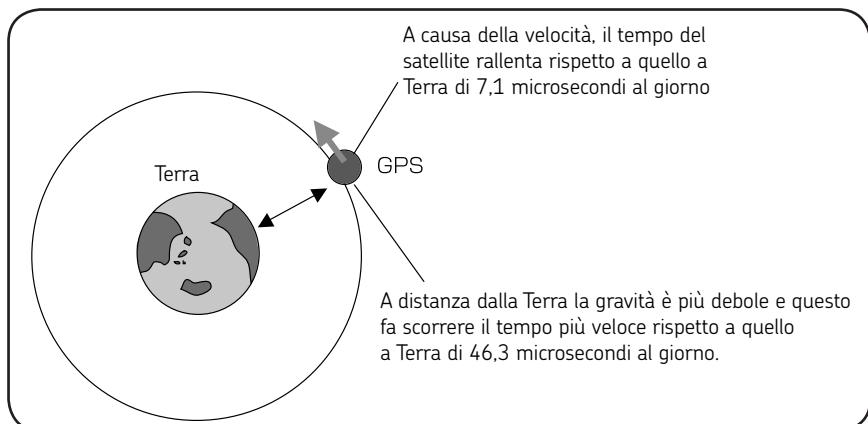
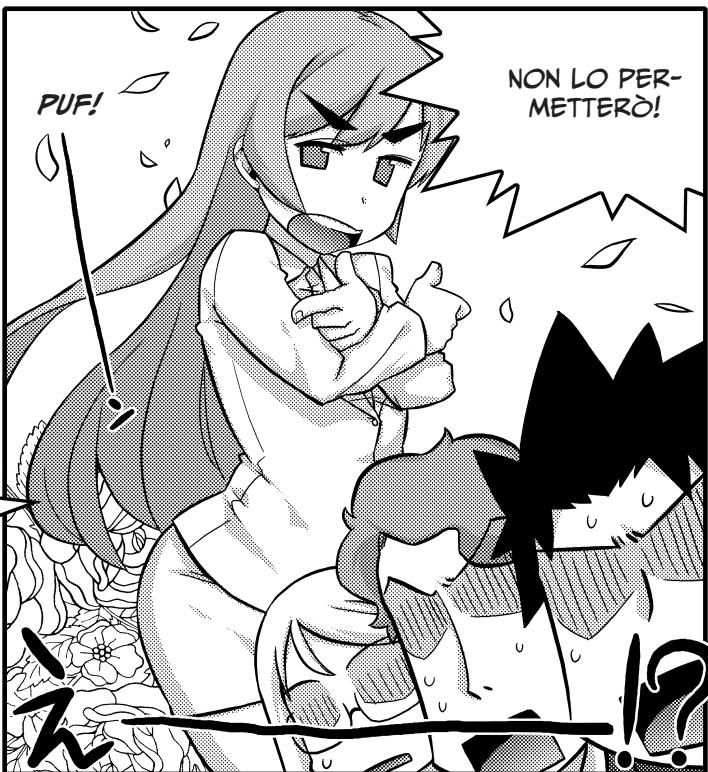
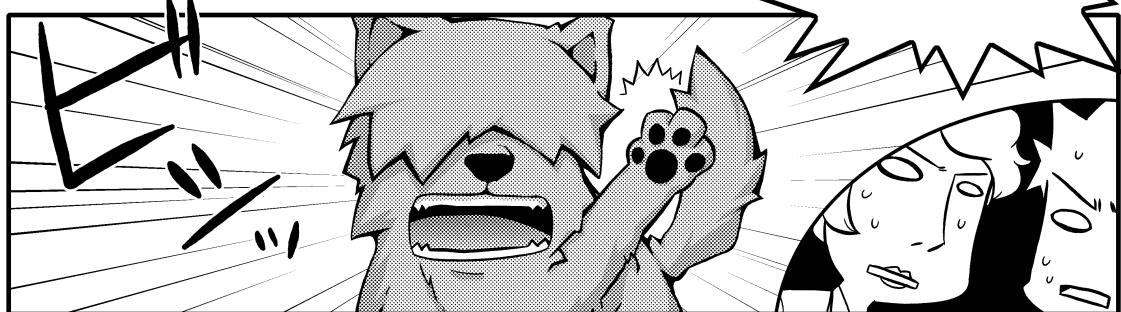
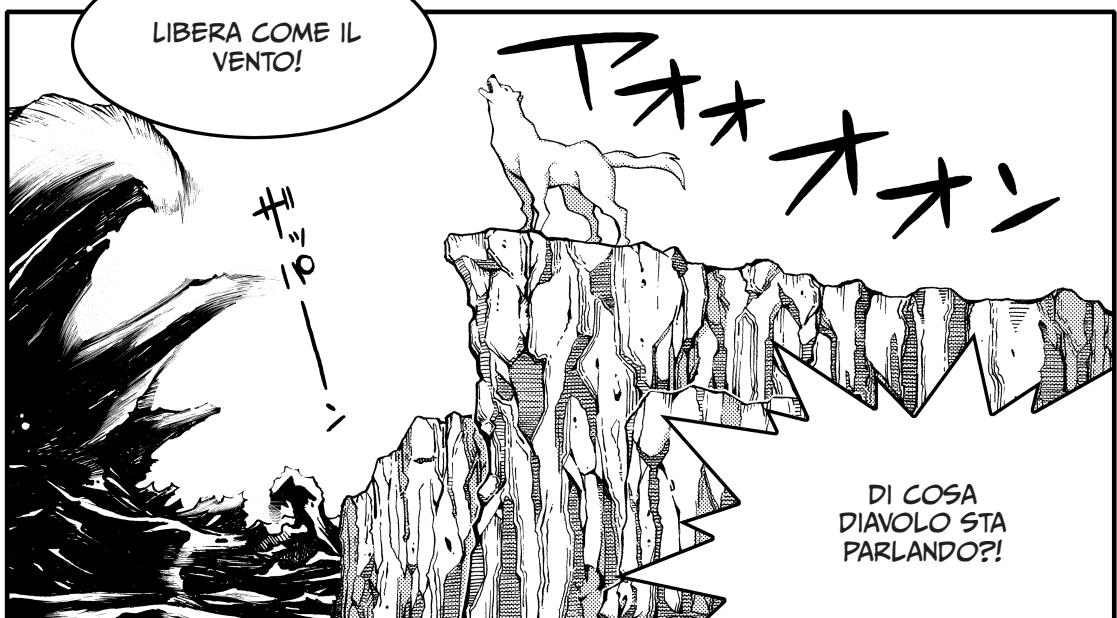
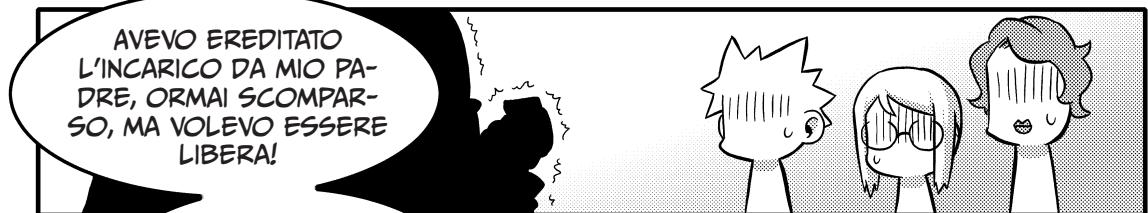


Figura 4.7 – Il sistema GPS compensa gli effetti della Relatività







MA NON POTEVO IGNORARE LA SCUOLA EREDITATA DA MIO PADRE.

COSÌ LASCIAI UNA LETTERA FINGENDO DI ESSERMENE ANDATA.

COS'È QUESTA LETTERA?

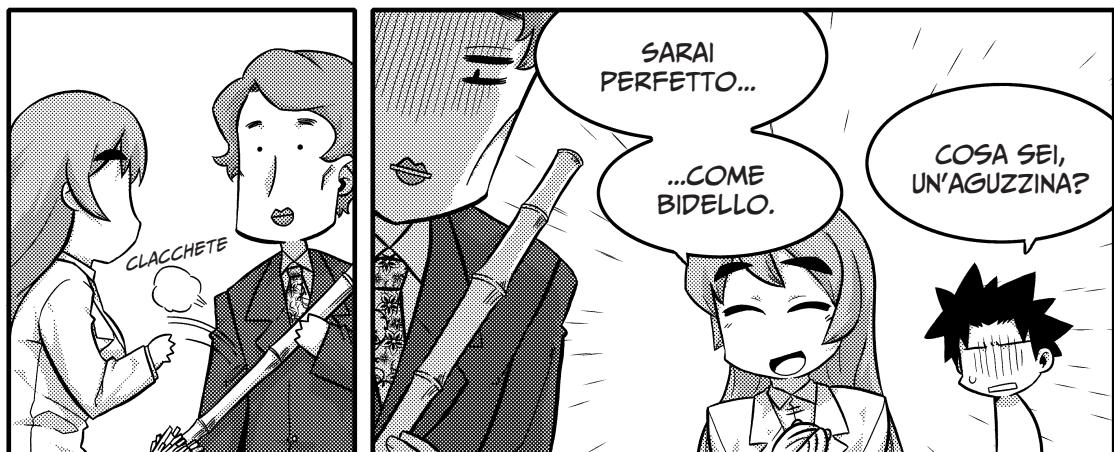
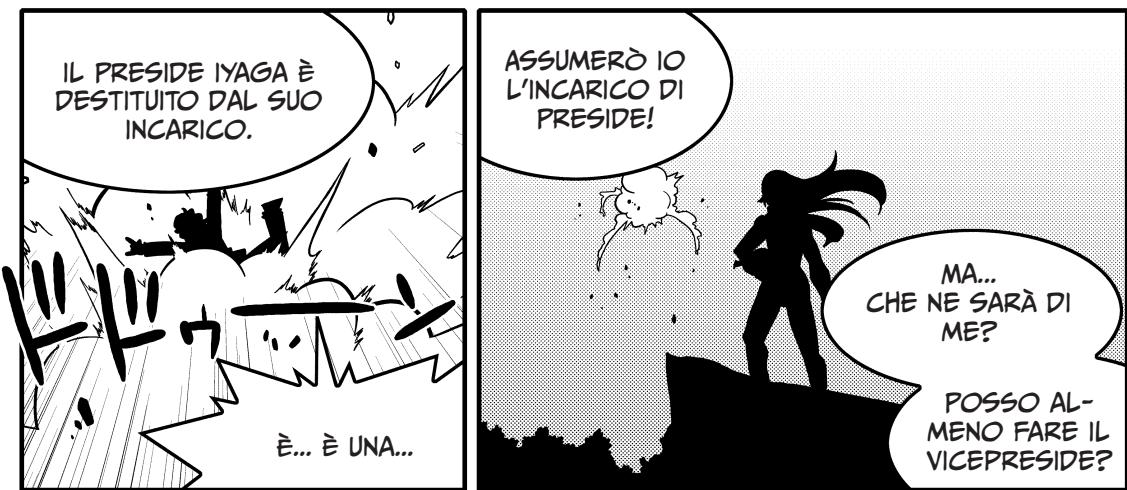
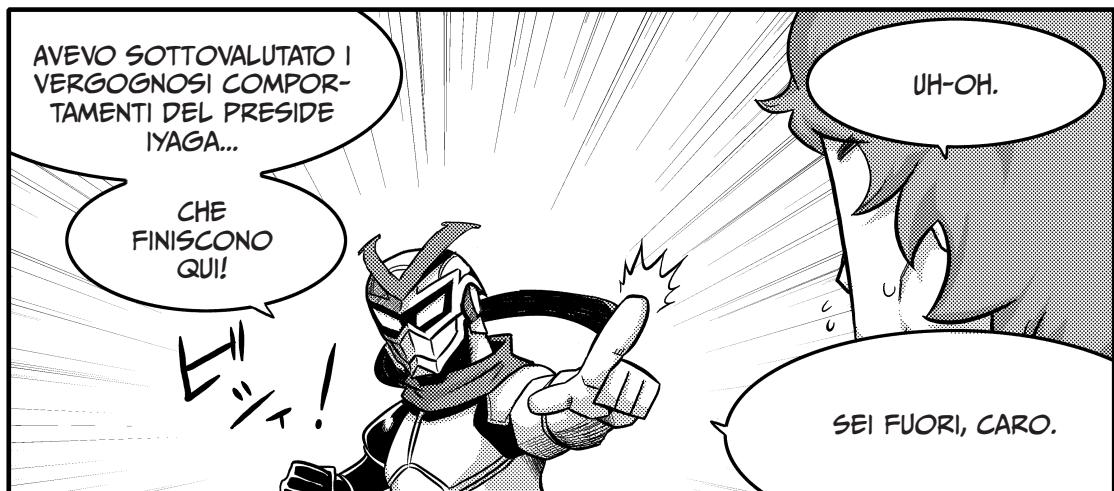
POI ASSUNSI LA FORMA DI UN CANE.

PER ESEMPIO, LA GRAVITÀ...

A VOLTE, MI TRASFORMAVO ANCHE IN ALTRI MODI.

IN QUESTO MODO, VEGLIANO SUL FUNZIONAMENTO DELLA SCUOLA!

ERI SEMPRE TU, TUTTE LE VOLTE!



QUANTO AL VICE-PRESIDE...

MISS URGAG! CHE NE DICE DI ACCETTARE L'INCARICO?

SCIOC!

UH?!

UNA VECCHIETTA COME ME... PER UNA TALE RESPONSABILITÀ?

FA LA MODESTA MA LE STARANNO RIDENDO ANCHE LE ORECCHIE!

VORREI CHE MANTENESSE QUELLA SUA APERTURA AGLI STUDENTI!

MA CERTO! FARÒ TUTTO IL POSSIBILE!

ALLA FACCIA DELL'APERTURA AGLI STUDENTI! GUARDI MEGLIO!

QUESTA HA DEI SUPERPOTERI! OUCH! OUCH! OUCH!

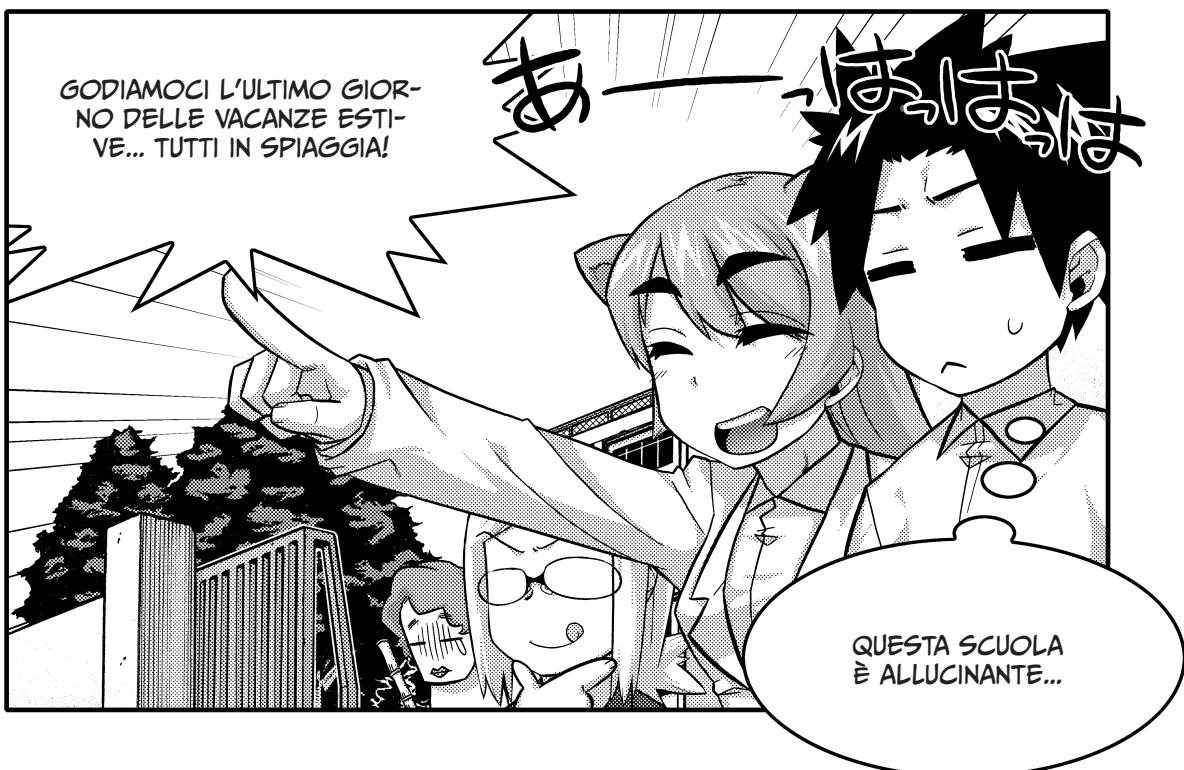
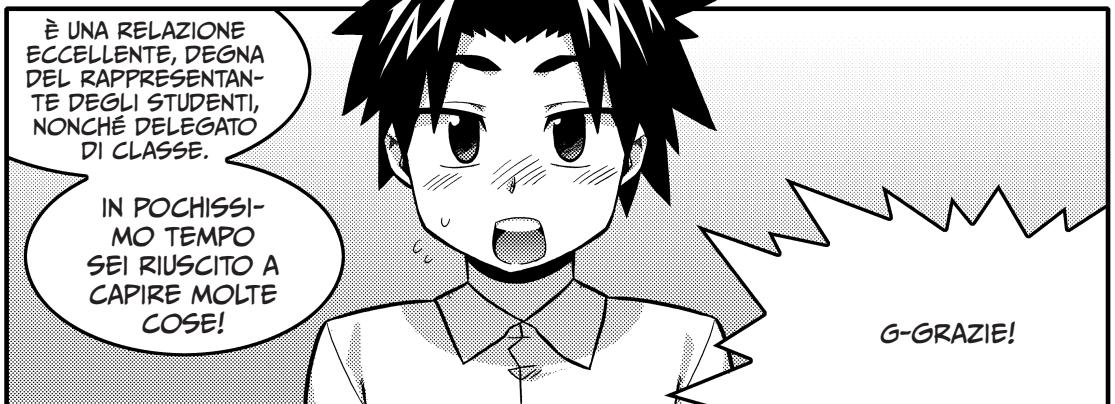
E... MINAGI!

OOOHHH

SÌ?

LA TUA RELAZIONE MI HA MOLTO COLPITA!

DAVVERO?



INDICE

A

accelerazione, 14–16,

69–72, 95–96,

120, 124–132. (v.

anche principio di
equivalenza)

Alpha Centauri, 80–81

Andromeda, galassia di
81–82

annichilazione di coppia,
102–103

antiparticella, 102–103

azione e reazione,
principio di, 22, 95

B

Big Bang, teoria del,
150–152

buchi neri, 162, 164

C

centrifuga, forza, 127–129

centripeta, forza, 129

cerchio massimo, 140

Cigno, costellazione del,
164

conservazione,

- dell'energia, principio
di, 97–99

- della massa, principio
di, 97–98

contrazione della

lunghezza, 86–91,
106–109

- calcolo della 106–107

- e muoni, 108–109

coordinate, sistemi di, (v.
sistemi di coordinate)

cosmici, raggi, 108–109

curvature nello

spaziotempo, 140, 162

D

deviazione della luce,

proprietà di, 16,

133–142, 162–163

difrazione della luce,

proprietà di 41–42

dilatazione temporale,

53–66

- calcolo, 80–82

- equazione per, 88, 90

- misurazione con
orologi-luce, 58, 60–65,
78–80

- paradosso dei gemelli,
67–73

- teoria della Relatività
generale e, 70–71,
143–148, 158–162

dispersione della luce,
proprietà di 40–41

E

$E=mc^2$ (v. equivalenza
massa-energia),

Einstein, Albert

- su gravità e
accelerazione, 120,
131

- sulla meccanica
newtoniana, 34–36

- sulla velocità della luce,
34–37

Einstein, equazioni di
campo di, 162

elettroni, 43, 102–103

energia

- annichilazione di
coppia, 102–103

- cinetica, 98, 113, 160

- elettrica 98

- e massa (v. equivalenza
massa-energia),

- principio di
conservazione di,
97–99

- equazione del moto
($F=ma$), 22, 47, 95,
109, 111–112

equazioni di campo di
Einstein, 162

equivalenza, principio di,

72, 120–121, 131

equivalenza massa-

energia ($E=mc^2$),

99–102, 112–113

etero, 26–30

etero, vento di, 31–33

F

$F=ma$ (equazione del
moto), 22, 47, 95, 109,
111–112

filtri polarizzatori, 42

forza centrifuga, 127–129

forza centripeta, 129

Friedman, Alexander
Alexandrovich, 150

G

Galilei, Galileo, 17

Galileo, principio di
Relatività di, 17–22, 33,
47–48, 109–111

Galileo, trasformazioni
di, 47–48, 109–111

gamma (γ) raggi, 40,
102–103

gemelli, paradosso dei,
67–73

teoria della Relatività
generale, (v. Relatività
Generale, teoria della)

GPS (Global Positioning
System), 165

gravità, 16

- accelerazione e, 14–16,
69–72, 95–96, 124–132

- deformazione dello
spaziotempo e, 136,
141–144, 158, 162, 164

- deviazione della luce e,
16, 133–142, 162–163

- dilatazione temporale e,
70–72, 143–148

- eliminazione della,
131–133

- lunare e terrestre, 94

- principio di equivalenza e, 72, 120–121, 131
- spazi a gravità zero, 94–95
- zero, 94–95

H

Hubble, Edwin, 150–152

I

- inerzia, principio di, 18, 22, 95, 123
- inerziali, forze,
- forza centrifuga, 127–129
- forza centripeta, 129
- esempi di, 120–129
- inerziale, sistema di riferimento, 15 (v. anche sistema di riferimento inerziale)
- interferenza costruttiva, 41–42
- interferenza distruttiva, 41–42

L

- legge/principio di
- azione e reazione di Newton, 22, 95
- conservazione dell'energia, 97–99
- conservazione della massa, 97–98
- inerzia di Newton, 18, 22, 95, 123
- leggi/principi del moto. (v. Newton, leggi di)
- lenti gravitazionali, 162–163
- longevità dei muoni, 108–109
- Lorentz, trasformazioni di, 48, 106–107, 111–112
- luce,
- bianca, 40–41

- come onda elettromagnetica, 24–26, 40
- deviazioni della 16, 133–142, 162–163
- elettroni e, 102
- equazioni di Maxwell, 40–41
- infrarossa, 40
- misurazione del tempo, 58, 60–65, 78–79
- proprietà di dispersione, 40–41
- proprietà di interferenza e diffrazione, 41–42
- proprietà di polarizzazione, 42
- proprietà di riflessione, 40–41, 58–59
- proprietà di rifrazione, 40–41
- proprietà di scattering, 42
- tipi di, 40–42
- velocità della (v. velocità della luce)
- visibile, 40
- lunghezza d'onda, 40, 42
- lunghezza, contrazione della, 86–91, 106–109
- calcolo, 106–107
- muoni e 108–109

M

- massa, 94
- equazione del moto ($F=ma$), 22, 47, 95, 109, 111–112
- equivalenza massa-energia ($E=mc^2$), 99–102, 112–113
- legge/principio di conservazione della, 97–98
- peso e, 93–94

- positrone/elettrone, 102–103
- velocità della luce e, 92–97, 109–113
- massima, velocità, 92–93
- Maxwell, James Clerk, 24
- Maxwell, equazioni di, 24–26, 40

Mercurio, precessione anomala del perielio di, 162, 164

mezzo, 26–27, 40. (v. anche etere)

Michelson, Albert Abraham, 32

Morley, Edward Williams, 32

moto.

- della Terra, 20–21, 35
- percepito, 20–21

moto. leggi/principi del. (v. anche Newton, meccanica di)

- azione e reazione, 22, 95
- equazione del moto ($F=ma$), 22, 47, 95, 109, 111–112
- inerzia, 18, 22, 95, 123
- percepito, 20–21
- rettilineo uniforme, 18, 69, 95, 134
- muoni, 108–109

N

- Newton, leggi di, 22, 95
- equazione del moto ($F=ma$), 22, 47, 95, 109, 111–112
- azione e reazione, 22, 95
- inerzia, 18, 22, 95, 123
- Newton, meccanica di,
- basi, 22
- distinzione tempo-spatio, 37
- Einstein su, 34–36

- espansione dello spazio, 151
- principio di Relatività di Galileo e, 47–48
- velocità della luce e, 25, 32, 43, 112–113

O

- onda, lunghezza di, 40, 42
- onde radio, 40, 165
- orologio-luce, 58, 60–65, 78–80

P

- parabola, 134, 137–139
- paradosso dei gemelli, 67–73
- particelle 102–103
- particelle elementari, 108–109
- perielio, precessione anomala del, 162, 164
- peso, 92–94. (v. anche massa)
- assenza di, 94–95, 121, 131–132, 145
- Pitagora, teorema di, 61–63, 73–75, 78–80
- polarizzatori, filtri, 42
- polarizzazione della luce 42
- positroni, 102–103
- potenziale gravitazionale, 158, 160–162
- precessione anomala del perielio, 162, 164
- principio di,
- conservazione dell'energia, 97–99
- conservazione della massa, 97–98
- equivalenza, 72, 120–121, 131
- Relatività di Galileo, 17–22, 33, 47–48, 109–111

R

- radiazioni elettromagnetiche, 24–26, 40, 103
- radio, onde, 40, 165
- raggi,
- cosmici, 108–109
- gamma (γ), 40, 102–103
- ultravioletti, 40
- x, 40, 164
- rallentamento del tempo. (v. dilatazione temporale)
- riferimento, sistema di,
- inerziale, 15
- non inerziale, 15
- riflessione della luce, 40–41, 58–59
- refrazione della luce, 40–41
- Relatività
- principio di Galileo della, 17–22
- Relatività della simultaneità, 44–46
- Relatività generale, teoria della, 14–16
- deviazione della luce, 16, 133–142, 162–163
- dilatazione temporale, 70–71, 158–162
- e Big Bang, teoria del, 150–152
- e principio di equivalenza, 72, 120–121, 131
- universo, espansione e contrazione, 150–151
- Relatività ristretta, (v. Relatività speciale)
- Relatività speciale, teoria della, 14–15, 34–37
- paradosso dei gemelli e dilatazione temporale, 67–73

- tempo e spazio come sistema di coordinate, 37, 91

- universo, 149–152

S

- scattering, 42
- simultaneità, relatività della , 44–46
- sistema di riferimento inerziale, 15
- e leggi di Newton sul moto, 18
- e Princípio di Relatività di Galileo, 19, 22, 47
- e spaziotempo, 139
- e teoria della Relatività Speciale, 34, 69–70, 120–122
- sistema di riferimento non inerziale, 15
- sistema solare, 35, 80
- sistemi di coordinate, 28–29
- spaziotempo, 37
- teoria della relatività speciale e, 70–71, 120
- trasformazioni galileiane e, 47–48, 109
- somma
- di velocità, 43, 44–46, 48–49
- newtoniana delle velocità, 43, 44–45, 48–49
- non relativistica delle velocità, 43, 44–45, 48–49
- relativistica delle velocità, 44, 46, 47
- spazio stazionario assoluto, 26, 28–31, 33, 35
- spaziotempo, 37, 139–144, 158, 162, 164

- curvature nello, 140, 162
- deformazione di, 136, 141–144, 158, 162, 164
- speciale, teoria della Relatività, (v. Relatività speciale, teoria della) SPring-8, 43 stelle
 - Alpha Centauri, 80–81
 - buchi neri e, 162, 164

T

- tempi, dilatazione dei (v. dilatazione temporale)
- tempo. rallentamento del (v. dilatazione temporale)
- Terra, movimento della, 20–21, 35, 94
- teorema di Pitagora, 61–63, 73–75, 78–80
- teoria del Big Bang, 150–152
- trasformazioni di Lorentz, 48, 106–107, 111–112

- trasformazioni galileiane, 47–48, 109–111

U

- ultravioletti, raggi, 40
- universo, relatività e, 149–152
- Urashima, effetto di. (v. dilatazione temporale)

V

- velocità,
 - contrazione di, 86–91
 - e massa, 96–97, 113
 - massima, 92–93
 - somma delle, 43, 44–46, 48–49
 - somma newtoniana delle, 43, 44–45, 48–49
 - somma non relativistica delle, 43, 44–45, 48–49
 - somma relativistica delle, 44, 46, 47
- velocità della luce, 22–24. (v. anche velocità prossima a quella della luce)
- costante, 24–26, 30, 33, 36–37, 43, 57
- Einstein e, 34–37

- equazioni di Maxwell e, 24–26, 40
- equivalenza massa-energia ($E=mc^2$), 99–102, 112–113
- etere e, 26–30
- massima velocità, 92–93
- meccanica newtoniana e, 25, 32, 43, 112–113
- onde elettromagnetiche e, 24–26, 40
- peso/massa e, 92–97
- somma relativistica delle velocità, 44, 46, 47
- vento d'etere e, 31–33
- velocità prossima a quella della luce (v. anche velocità della luce)
 - e contrazione della lunghezza, 86–91
 - e dilatazione temporale, 54–55, 57–63, 73–75
 - e massa, 92
 - e muoni, 108–109
 - e paradosso dei gemelli, 65–68
- Via Lattea, galassia della, 81–82



L'AUTORE

Masafumi Yamamoto ha conseguito il Dottorato presso la Divisione di Fisica Applicata della Facoltà di Ingegneria dell'Università di Hokkaido nel 1984. Attualmente è Amministratore Delegato della Yaaba Ltd.

UN'AFFASCINANTE GUIDA A FUMETTI ALLA TEORIA DELLA RELATIVITÀ



IL LICEO TAKAI È UNA GABBIA DI MATTI! QUANDO QUEL MATTO DEL PRESIDE COSTRANGE L'INTERO CORSO DI MINAGI A STUDIARE LA RELATIVITÀ DI EINSTEIN DURANTE L'ESTATE, MINAGI SI OFFRE VOLONTARIO AL POSTO DEI COMPAGNI. C'È SOLO UN PICCOLO PROBLEMA: PRIMA D'ORA LUI LA RELATIVITÀ NON L'HA MAI NEANCHE SENTITA NOMINARE!

MA È FORTUNATO, PERCHÉ A SPIEGARGLIELA CI PENSERÀ L'IMPAVIDA MISS Uraga.

SEGUENDO IL POVERO MINAGI IN QUESTO VOLUME IMPARERETE INSIEME A LUI LE LEGGI CONTROINTUITIVE CHE GOVERNANO IL NOSTRO UNIVERSO. SENZA NEANCHE ACCORGERVENE, AVRETE APPRESO NOZIONI IMPEGNATIVE COME QUELLA DI "RIFERIMENTO INERZIALE", "SPAZIOTEMPO UNIFICATO" E "PRINCIPIO DI EQUIVALENZA". CAPIRETE COME DALLA RELATIVITÀ DIPENDA LA MODERNA ASTRONOMIA E COME LE STRAORDINARIE INTUIZIONI DI EINSTEIN ABBIANO PERMESSO DI SVILUPPARE I SISTEMI GPS E ALTRE TECNOLOGIE DI USO QUOTIDIANO.

I MANGA DELLE SCIENZE - RELATIVITÀ VI PERMETTERÀ ANCHE DI:

- » CAPIRE E FARE USO DI $E = MC^2$, L'EQUAZIONE PIÙ FAMOSA DEL MONDO!
- » CALCOLARE GLI EFFETTI DELLA DILATAZIONE DEI TEMPI UTILIZZANDO IL TEOREMA DI PITAGORA;
- » COMPRENDERE ESPERIMENTI MENTALI COME IL PARADOSSO DEI GEMELLI E CAPIRE COME MAI A VELOCITÀ RELATIVISTICHE LE LUNGHEZZE SI CONTRAGGONO E LA MASSA AUMENTA;
- » PADRONEGGIARE LE FONDAMENTA DELLE TEORIE DELLA RELATIVITÀ RISTRETTA E GENERALE DI EINSTEIN.

SE L'IDEA DELLO SPAZIO E DEL TEMPO CHE SI DEFORMANO VI FA GIRARE LA TESTA, A RADDRIZZARE LE COSE CI PENSERÀ QUESTO VOLUME!



la Repubblica Le Scienze



60003
Pubblicazione settimanale da vendersi esclusivamente
in abbinamento a la Repubblica oppure a Le Scienze.
Supplemento al numero in edicola.
9,90 euro + il prezzo di Repubblica oppure de Le Scienze.