

Adriana Postiglione  
Ilaria De Angelis

**SPERIMENTARE LA GRAVITÀ  
CON IL TELO ELASTICO:  
LINEE GUIDA E TRUCCHI**

**EXPERIENCE GRAVITY  
WITH THE RUBBER SHEET:  
GUIDELINES AND TRICKS**



Edizioni **Efesto**

*Autori:*

Adriana Postiglione e Ilaria De Angelis

*Grafica di copertina:*

Sergio Giannelli

Edizioni Efesto

Roma, luglio 2020

ISBN: 978-88-3381-157-4

[www.edizioniefesto.it](http://www.edizioniefesto.it)

Quest'opera è assoggettata alla disciplina Creative Commons attribution 4.0 International Licence (CC BY-NC-ND 4.0) che impone l'attribuzione della paternità dell'opera, proibisce di alterarla, trasformarla o usarla per produrre un'altra opera, e ne esclude l'uso per ricavarne un profitto commerciale.



# Indice

<b>Introduzione</b>	<b>1</b>
<b>Descrizione delle schede</b>	<b>6</b>
<b>Scheda 1 - Come costruire il tuo spazio-tempo</b>	<b>8</b>
<b>Scheda 2 - Introduzione all'uso dello spazio-tempo</b>	<b>19</b>
<b>Scheda 3 - Le leggi di Keplero</b>	<b>22</b>
<b>Scheda 4 - L'effetto fionda gravitazionale</b>	<b>27</b>
<b>Scheda 5 - I sistemi doppi</b>	<b>30</b>
<b>Scheda 6 - Le lenti gravitazionali</b>	<b>33</b>
<b>Scheda 7 - I buchi neri</b>	<b>37</b>
<b>Scheda 8 - Ulteriori spunti</b>	<b>42</b>
<b>La tua opinione</b>	<b>45</b>
<b>Ringraziamenti</b>	<b>46</b>
<b>Le autrici</b>	<b>48</b>

<b>English version</b>	<b>49</b>
<b>Introduction</b>	<b>50</b>
<b>Description of the cards</b>	<b>54</b>
<b>Card 1 - How to build your own space-time</b>	<b>56</b>
<b>Card 2 - Introduction to the use of the space-time</b>	<b>67</b>
<b>Card 3 - Kepler's laws</b>	<b>70</b>
<b>Card 4 - Gravity assist</b>	<b>75</b>
<b>Card 5 - Binary systems</b>	<b>78</b>
<b>Card 6 - Gravitational lensing</b>	<b>81</b>
<b>Card 7 - Black holes</b>	<b>85</b>
<b>Card 8 - Further ideas</b>	<b>90</b>
<b>Your opinion</b>	<b>93</b>
<b>Acknowledgements</b>	<b>94</b>
<b>The authors</b>	<b>96</b>

# Introduzione

Le attività pratiche, interattive e giocose rendono l'apprendimento degli studenti particolarmente efficace. Ciò è tanto più vero per le discipline scientifiche, come la fisica, dove l'aspetto pratico ed esperienziale rafforza e completa le conoscenze teoriche, aiutando gli studenti a comprendere anche quei fenomeni lontani dalla loro esperienza quotidiana.

Prendiamo ad esempio il concetto di gravità: esso richiede di abbandonare la nostra visione del mondo, fino a mettere in dubbio la nostra stessa concezione di spazio e tempo. Grazie alla Teoria della Relatività Generale introdotta da Einstein nel 1916, infatti, oggi sappiamo che la gravità è originata dalla deformazione del cosiddetto spazio-tempo: un'entità quadridimensionale che unisce lo spazio (tridimensionale) e il tempo (che ha una sola dimensione). Questo spazio-tempo non è un palcoscenico statico, ma un elemento dinamico che può cambiare a seconda degli oggetti che lo popolano: un oggetto dotato di massa, come una stella, deforma lo spazio-tempo producendo la gravità, cioè forzando i pianeti a girarvi intorno. In altre parole, la gravità non è una forza, ma la semplice conseguenza della deformazione dello spazio-tempo; non vediamo direttamente questa deformazione, ma la deduciamo osservando i pianeti e le stelle che orbitano o si attraggono a vicenda nell'Universo.

Certo, tutto questo è difficile da immaginare. È per questo che Einstein stesso, per comunicare meglio la sua concezione della gravità,

propose un'analogia molto potente. Supponiamo che lo spazio-tempo abbia due dimensioni anziché quattro: come un foglio di carta, ad esempio. Oppure, meglio, un telo elastico. Immaginiamo ora di porre sopra questo telo un piccolo peso: esso deformerà il telo. Proviamo ora a lasciare andare una biglia su questo telo deformato. Essa cadrà verso il peso centrale, magari anche girandogli un po' attorno prima. In altre parole, la biglia è attratta dal peso centrale. Stiamo cioè sperimentando la gravità: la sola presenza di una massa nello spazio-tempo fa deformare quest'ultimo, con la conseguenza di produrre l'attrazione gravitazionale.

L'analogia del telo elastico è tutt'oggi molto studiata da fisici, educatori e comunicatori della scienza. Essa, infatti, sebbene presenti alcune debolezze (come vedremo più avanti), costituisce uno strumento prezioso per trattare la Relatività Generale con un pubblico di non esperti. Ma non solo: usare il telo elastico in modo opportuno permette anche di attirare l'attenzione e divertire.

Per queste ragioni, nel 2017, come Gruppo di Orientamento e Comunicazione della Fisica e della Matematica del Dipartimento di Matematica e Fisica dell'Università degli Studi Roma Tre, decidemmo di realizzare un exhibit che rappresentasse l'analogia del telo elastico. Grazie al servizio meccanico della Sezione INFN Roma Tre, costruimmo una struttura circolare di alluminio di 1.8 m di diametro che potesse sorreggere e tener teso un telo di lycra e che permettesse a un gruppo di circa 20 persone di osservare quello che accadeva sul telo. L'idea era di sperimentare quali aspetti della Relatività potessero essere mostrati facendo uso di diversi pesi e biglie, e in che misura.

Iniziammo a testare l'exhibit nel corso di uno degli eventi pubblici organizzati dal Dipartimento. Si trattava del contesto ideale: durante queste serate, infatti, si alternano seminari, osservazioni al telescopio e attività interattive che permettono al pubblico di tutte le età di conoscere diversi argomenti scientifici in un clima informale e spesso

giocosso. Il risultato fu straordinario: decine e decine di persone furono incuriosite dal telo e dalle orbite che le biglie descrivevano attorno ai pesi. Ma non solo: attraverso il gioco, essi furono ben disposti ad ascoltare ulteriori approfondimenti su temi complessi come i buchi neri o le onde gravitazionali, sollevando dubbi e ponendo molte, moltissime domande. Alcuni di loro rimasero attorno al telo anche per ore.

Fu in quel momento che capimmo che era proprio l'aspetto giocoso dell'attività, che poteva bene alternarsi a spiegazioni e approfondimenti più teorici, a conferirle un grandissimo potenziale didattico, specialmente nelle scuole secondarie di secondo grado, il luogo dove tipicamente si tratta la gravità in modo più approfondito. Bisognava però sviluppare un'attività strutturata che potesse essere realizzata in classe.

Nei primi mesi del 2018 iniziammo a ragionare su un'attività che potesse racchiudere, in un'ora e mezza, gli argomenti principali sulla gravità, pur lasciando spazio al gioco e all'interazione con gli studenti. Iniziammo quindi a testarla con piccoli gruppi di studenti che frequentavano il Dipartimento per attività di orientamento; successivamente coinvolgemmo 5 classi del Liceo Scientifico "S. Cannizzaro" di Roma, una per ogni anno di corso, in modo da sondare l'interesse e la comprensione di studenti di età diversa. Visto l'entusiasmo riscontrato con questi primi incontri, decidemmo di inserire l'attività tra quelle offerte stabilmente dal Dipartimento alle scuole. Con il passare del tempo, grazie a queste prime esperienze, capimmo che i docenti stessi avrebbero potuto svolgere la medesima attività in autonomia, a patto che fossero stati messi in condizione di farlo, con i *giusti* suggerimenti e indicazioni. Ma cosa voleva dire *giusti*? Quali erano le reali esigenze dei docenti che avrebbero potuto svolgere l'attività, per sentirsi effettivamente autonomi?

Per rispondere a queste domande, a gennaio 2019 decidemmo

di presentare il nostro lavoro durante il Corso di Aggiornamento di Fisica del Dipartimento, che ogni anno si svolge tra ottobre e febbraio con un incontro a settimana, e coinvolge diversi docenti in servizio provenienti dalle scuole secondarie superiori di Roma e dintorni. Le reazioni furono molto positive: i docenti erano desiderosi di imparare ad usare lo spazio-tempo e, oltre alle numerose domande e richieste di approfondimento, ci fornirono moltissimi commenti ed osservazioni.

Era giunto il momento di raccogliere quelle osservazioni e creare dei materiali che potessero essere usati da altri docenti, anche fuori da quell'area romana che il Dipartimento poteva raggiungere. Per prima cosa, bisognava pensare ad un exhibit che potesse essere costruito in modo facile e che potesse stare in qualsiasi classe, quindi che fosse più piccolo e più economico del nostro. Poi, era necessario creare delle schede che guidassero il docente passo dopo passo nella trattazione dei vari argomenti legati alla gravità, suggerendogli i "trucchi" da usare per scegliere le biglie e i pesi più adatti, e il modo per mostrare i diversi fenomeni.

All'inizio del 2020 avevamo selezionato un kit per costruire uno spazio-tempo fai-da-te a partire da materiali poveri e di facile reperibilità; contemporaneamente stavamo sviluppando le schede, sottoponendole di volta in volta alla discussione con i docenti in servizio che stavano seguendo il Corso in Dipartimento.

È così, sperimentando, inventando, discutendo, che abbiamo creato questo libro. Riassumendo nelle sue pagine oltre due anni di attività, nella consapevolezza che questo non è che un altro punto di partenza. Ora bisogna entrare in classe, e scoprire insieme quanto altro si può raccontare attraverso un semplice telo elastico e alcune biglie.

Anche tu puoi contribuire a sviluppare queste attività, compilando i questionari che troverai alla fine del libro (vedi sezione "La tua opinione"). Potrai così segnalarci eventuali punti critici e miglioramenti da apportare, e, perché no, proporre altre attività che pensi si



possano realizzare con il telo elastico. Se vuoi, infatti, puoi scriverci a [info@astrogarden.it](mailto:info@astrogarden.it).

# Descrizione delle schede

Questo libro contiene otto schede che guidano il docente nella realizzazione di diverse attività legate alla gravità, pensate per essere rivolte a studenti che hanno già trattato le leggi di Keplero, come tipicamente avviene dal terzo anno di Liceo Scientifico. Ciò non toglie che esse possano essere utilizzate dal docente anche con studenti più giovani, con i quali si può introdurre un argomento che poi verrà affrontato da un punto di vista formale più avanti, in modo da affascinarli e incuriosirli.

Ogni scheda, a parte la prima che guida alla costruzione dello spazio-tempo, è strutturata nel modo seguente:

1. Argomento affrontato.
2. Breve descrizione dell'attività proposta.
3. Lista dei materiali necessari a realizzare l'attività.
4. Lista dei passi da compiere per spiegare il fenomeno. In questa sezione sono indicati anche trucchi e consigli per scegliere le biglie e i pesi opportuni.
5. Note e approfondimenti. In questa sezione sono indicati riferimenti a immagini, video e link che possono aiutare il docente ad illustrare l'argomento affrontato.

6. Dove trovare immagini e video. In questa sezione sono specificate le fonti da cui poter scaricare immagini e video.

Gli argomenti trattati dalle schede sono via via più complessi: la prima scheda descrive le istruzioni da seguire per costruire lo spazio-tempo fai-da-te; la seconda si sofferma sui punti di forza e di debolezza dell'analogia del telo elastico; la terza, quarta e quinta scheda descrivono fenomeni che possono essere spiegati anche dalla teoria della gravità newtoniana, ma che il telo elastico permette di far comprendere e visualizzare meglio; infine, la sesta, settima e ottava scheda riguardano temi più avanzati di Relatività Generale, che permettono di introdurre anche le più recenti scoperte della fisica moderna.

# Scheda 1

## *Come costruire il tuo spazio-tempo*

In questa scheda troverai la procedura per costruire il tuo spazio-tempo con materiale povero. Prima saranno descritti i materiali e il procedimento per costruire la struttura, poi le biglie e i pesi più adatti a trattare gli argomenti proposti nelle schede. Nelle foto vedrai spesso una moneta, che abbiamo posizionato vicino ai diversi materiali fotografati per dare meglio l'idea delle dimensioni dell'oggetto descritto.

Tutti i materiali possono essere reperiti in negozi online, ferramenta, negozi di tessuti o negozi di bricolage. Inoltre, dovrai procurarti un cacciavite o un avvitatore elettrico.

### **Materiali per la struttura**

1. Hula-hoop di plastica, 80 cm di diametro (il più comune è quello da 60 cm, che però a noi sembra troppo piccolo per l'uso in classe).

2. 6 listelli di legno di altezza 80 cm e preferibilmente a base quadrata di circa 40 mm x 40 mm.



**Figura 1**

3. 6 fissatubo a scatto (detti anche reggitubo a clip o reggicavo) di plastica, di diametro 20 mm (il diametro dev'essere leggermente più grande dello spessore dell'hula-hoop).



**Figura 2**

4. 6 viti per il legno 40 mm x 3 mm.



**Figura 3**

5. 10 morsetti a molla di plastica, diametro 20 mm.



**Figura 4**

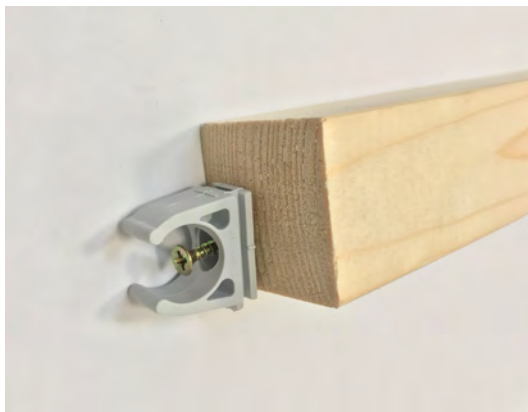
6. 1 telo di lycra, 1m x 1m.



**Figura 5**

## Come costruire la struttura

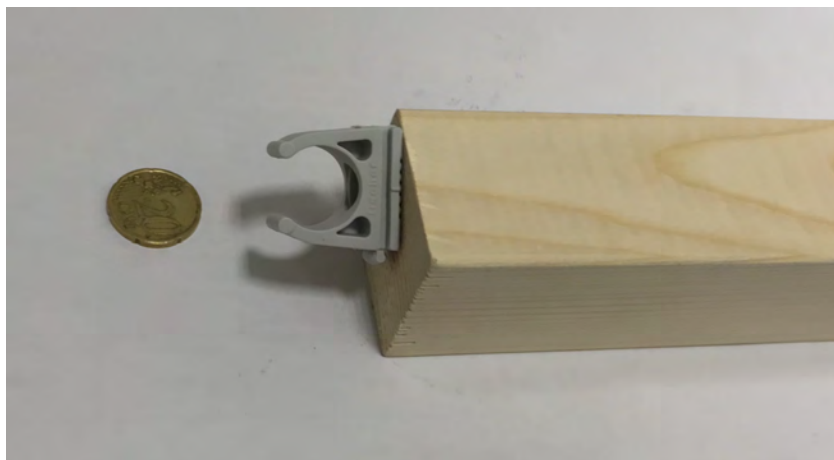
1. Inserisci la vite per il legno all'interno del fissatubo e posizionalo sul listello. La posizione del fissatubo non dev'essere centrata, ma spostata verso il bordo del listello come mostrato in **Figura 6**.



**Figura 6**

2. Con un giravite o un avvitatore fissa il fissatubo al listello di legno attraverso le viti per il legno. Mi raccomando, non stringere troppo la vite! Lascia al fissatubo la possibilità di ruotare attorno alla vite: ti servirà un po' di libertà di movimento più avanti.





**Figura 7**

3. Assembla analogamente gli altri 5 listelli con i fissatubo. Avrai così pronte le 6 gambe della struttura.
4. Aggancia l'hula-hoop ai fissatubo, in modo che i listelli di legno siano il più possibile equi-distanziati. Poi ruota i listelli in modo che il lato con il fissatubo si venga a trovare nella parte interna della struttura, come mostrato in **Figura 8**.



**Figura 8**

5. Copri la struttura con il telo di lycra e poi blocca il telo sull'hula-hoop con i morsetti. Nota bene: il telo non dev'essere troppo teso.

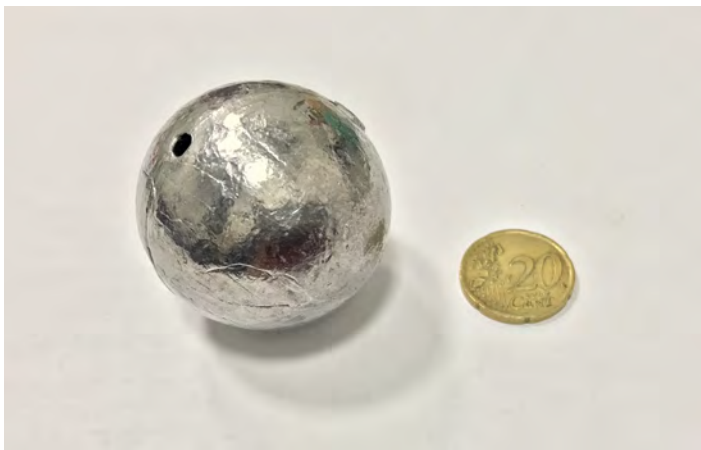


**Figura 9**

6. Il tuo spazio-tempo è pronto!

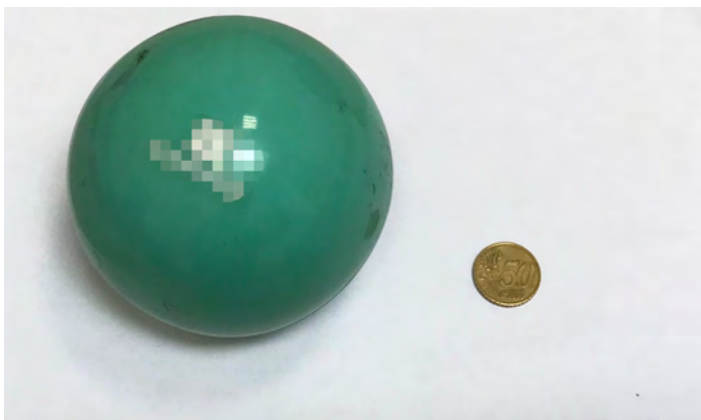
**Biglie e pesi da usare:**

1. 2 pesi di almeno 500 g, possibilmente sferici ed il più possibile piccoli. Ad esempio, sfere di piombo per la pesca.



**Figura 10**

2. 2 palle-peso per pilates, di almeno 500 g.



**Figura 11**

3. almeno 10 biglie di vetro.



**Figura 12**

4. coppie di calamite piccole e potenti.



**Figura 13**

5. 3 dischi in ghisa da 500 g e 28 mm di diametro.



**Figura 14**

### **E se invece hai più spazio...**

Una struttura alternativa a quella proposta qui, più grande e complessa, è stata costruita dal prof. Dan Burns della Scuola Secondaria Superiore "Los Gatos" di Los Angeles, utilizzando dei tubi in PVC. Le istruzioni di montaggio sono mostrate in questo video: <https://www.youtube.com/watch?v=2JOfiub9USo>.

# Scheda 2

## *Introduzione all'uso dello spazio-tempo*

Attraverso questa scheda vedremo un'introduzione all'uso dello spazio-tempo fai-da-te, evidenziando anche le criticità dell'analogia tra telo elastico e spazio-tempo.

### **Cosa serve:**

1. Struttura dello spazio-tempo montata.
2. Biglie di vetro.
3. 1 peso di almeno 500 g. Ad esempio, la sfera di piombo per la pesca o la palla-peso per pilates.

### **Cosa fare:**

1. Lancia una biglia sul telo quando questo è piatto. Nota che la biglia si muove nella direzione che le hai impresso inizialmente e va in linea retta.
2. Rimuovi la biglia e sistema ora il peso al centro del telo.
3. Lascia andare una biglia sul telo. Noterai che la biglia verrà attratta dal peso centrale fino a cadervi sopra.

4. Lanciando la biglia in modo opportuno, potrai riprodurre delle orbite simili a quelle che descrivono i pianeti intorno al Sole (vedi la Scheda 3).
5. Stai sperimentando la **gravità**, così come descritta da Einstein nella sua Teoria della Relatività Generale. In questa teoria Einstein introduce il concetto di spazio-tempo, che viene deformato quando è presente una massa. È la deformazione dello spazio-tempo a produrre la gravità, e a far sì che i corpi subiscano l'attrazione della massa.
6. Fai riflettere gli studenti su quanto riportato nella sezione Note e approfondimenti. In tal modo potrai iniziare al meglio tutte le altre attività proposte in questo libro senza generare misconcetti.

### Note e approfondimenti

1. Quando simuliamo lo spazio-tempo con un telo elastico stiamo introducendo molte semplificazioni. Prima fra tutte, lo spazio-tempo non è fatto di lycra! Inoltre, esso ha 4 dimensioni (3 spaziali + 1 temporale), ma noi non riusciamo a vederlo visto che siamo abituati a percepire solo 3 dimensioni. In realtà, quando giochiamo con il telo elastico, stiamo riducendo le dimensioni dello spazio-tempo: da 4 a 2. Il telo è tutto il nostro Universo: come se fossimo esseri bidimensionali, disegnati su un foglio di carta.
2. L'analogia del telo elastico ci fa pensare che i corpi "cadano" verso le masse che deformano lo spazio-tempo. Attenzione: l'idea di "cadere" presuppone di farlo *verso il basso*, e cioè di sperimentare un'attrazione gravitazionale come quella che la Terra imprime su di noi e su tutti i corpi che ci circondano. Nello spazio non è così: i corpi vengono semplicemente attratti.



Non esiste un basso o un alto, un sopra o un sotto, ma piuttosto un vicino/lontano in tutte le direzioni. Anche i buchi neri (vedi la Scheda 7) non sono imbuti dentro cui la materia cade verso il basso. Essi sono oggetti sferici che attraggono la materia circostante *in tutte le direzioni*.

3. La Relatività Generale prevede la deformazione dello spazio-tempo, cioè sia dello spazio che del tempo. Con il telo elastico, però, possiamo visualizzare solo una deformazione spaziale. Un modo per trattare la deformazione del tempo è fornita nella Scheda 8.

# Scheda 3

## *Le leggi di Keplero*

Attraverso questa scheda vedremo come utilizzare lo spazio-tempo fai-da-te per mostrare le leggi di Keplero.

### **Cosa serve:**

1. Struttura dello spazio-tempo montata.
2. Biglie di vetro.
3. 1 peso di almeno 500 g. Ad esempio, la sfera di piombo per la pesca o la palla-peso per pilates.
4. Le **immagini 1 e 2**.
5. Facoltativo: sferetta di piombo per la pesca da 50 g.

### **Prima legge di Keplero:**

1. Sistema il peso al centro del telo.
2. Lascia andare una biglia in direzione quasi parallela all'hula-hoop, in modo che l'orbita risultante sia molto ampia.
3. Mentre la biglia inizia ad orbitare attorno al peso centrale, fai notare che la forma dell'orbita in generale non è circolare, ma

ellittica. Stai osservando la **prima legge di Keplero**: i pianeti (le biglie) descrivono intorno al Sole (al peso centrale) orbite ellittiche, per le quali il Sole (il peso centrale) occupa uno dei due fuochi.

### **Seconda legge di Keplero:**

1. Sistema il peso al centro del telo.
2. Lascia andare una biglia. Questa volta la direzione di lancio dovrebbe essere radente alla direzione che congiunge la tua mano al peso centrale. In questo modo, l'orbita risultante avrà un'eccentricità maggiore.
3. Osserva la velocità della biglia mentre orbita attorno al peso centrale. Essa sarà più alta quando la biglia si trova vicino al peso (in perielio) e più bassa quando si trova lontano dal peso (in afelio).
4. Stai osservando la **seconda legge di Keplero**: il raggio vettore che unisce il centro del Sole (del peso centrale) con il centro del pianeta (della biglia) descrive aree uguali in tempi uguali, ovvero la velocità orbitale non è costante.

### **Terza legge di Keplero:**

1. Sistema il peso al centro del telo.
2. Lascia andare una biglia in direzione circa parallela all'hula-hoop, in modo che l'orbita risultante sia molto ampia.
3. Aspetta qualche secondo (una o due orbite della prima biglia), e poi lascia andare una seconda biglia sempre in direzione parallela all'hula-hoop.

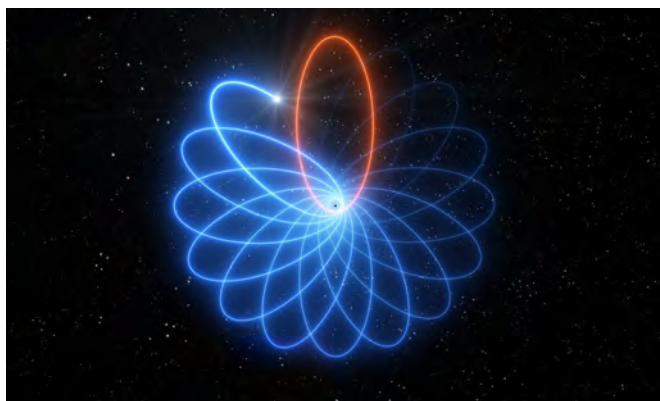
4. Fai notare ora che la biglia che ha l'orbita più interna è più veloce di quella che ha l'orbita più esterna. Stai osservando la **terza legge di Keplero**: i quadrati dei tempi che i pianeti impiegano a percorrere le loro orbite sono proporzionali al cubo delle loro distanze medie dal Sole. In altre parole, il periodo di rivoluzione di un pianeta (biglia) attorno al Sole (peso centrale) è tanto maggiore quanto più il pianeta (biglia) è distante dal Sole (peso centrale). Cosa analoga può essere affermata per le velocità: la velocità di rotazione del pianeta è tanto più alta quanto più il pianeta è vicino al Sole. Mercurio, quindi, impiega meno tempo a girare intorno al Sole rispetto a Giove.

### Note e approfondimenti

1. A differenza di quanto avviene per i pianeti, l'orbita della biglia riduce i suoi semiassi, spiraleggiando fino a cadere verso il peso centrale. Ciò avviene a causa dell'attrito tra la biglia, il telo e l'aria, che dissipa l'energia cinetica della biglia e la fa rallentare. Nello spazio, invece, non c'è nulla che produca attrito, e i pianeti rimangono nella loro orbita attorno al Sole.
2. Le orbite che compiono le biglie mostrano una precessione del perielio, come mostrato in **Figura 15**.  
Tale fenomeno avviene anche per i pianeti, ma in modo molto meno evidente. Il pianeta che lo mostra di più è Mercurio; fu proprio la spiegazione quantitativamente esatta della precessione di Mercurio a rappresentare il primo grande successo della Teoria della Relatività Generale rispetto alla meccanica newtoniana, e a far emergere i limiti delle leggi di Keplero.  
Nel 2020 si è osservato per la prima volta lo stesso fenomeno per una stella che ruota intorno a un buco nero: quello al centro della nostra Galassia (**Figura 16**).



**Figura 15:** La precessione del perielio dell'orbita di Mercurio, che corrisponde all'**immagine 1** consigliata in questa scheda.



**Figura 16:** La precessione dell'orbita della stella intorno al buco nero supermassiccio al centro della nostra Galassia, che corrisponde all'**immagine 2** consigliata in questa scheda.

3. Facoltativo: Una volta presa una certa familiarità con l'exhibit, potrai provare a riprodurre le leggi di Keplero anche per un sistema tipo Sole-Terra-Luna. Bisognerà lanciare insieme alla biglia di vetro una pallina più pesante, come una sferetta di piombo per la pesca da 50 g. Lanciando i due oggetti contemporaneamente, potrai notare che la biglia girerà intorno alla

pallina formando essa stessa un'orbita ellittica, per poi formare l'orbita più grande attorno al peso centrale. Non ti demoralizzare se non ti riesce al primo lancio, è necessaria un po' di pratica (o uno studente particolarmente fortunato!).

**Dove trovare immagini e video:**

**Immagine 1:** La precessione del perielio dell'orbita di Mercurio:

[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Perihelion\\_precession.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Perihelion_precession.jpg)

**Immagine 2:** L'orbita della stella intorno al buco nero supermassiccio al centro della nostra Galassia:

<https://www.eso.org/public/italy/news/eso2006/?lan>

# Scheda 4

## *L'effetto fionda gravitazionale*

Attraverso questa scheda vedremo come utilizzare lo spazio-tempo fai-da-te per mostrare l'effetto fionda gravitazionale, ampiamente sfruttato anche da molte missioni spaziali.

### **Cosa serve:**

1. Struttura dello spazio-tempo montata.
2. Biglie di vetro.
3. 1 peso di almeno 500 g. Ad esempio, la sfera di piombo per la pesca o la palla-peso per pilates.
4. Il **video 1**.

### **Cosa fare:**

1. Sistema il peso al centro del telo.
2. Lascia andare una biglia verso il peso centrale, evitando però di colpirlo.
3. Osserva la biglia mentre si avvicina al peso centrale: essa accelera man mano che si avvicina al peso e poi cambia direzione rispetto a quella iniziale.

4. Stai osservando l'**effetto fionda gravitazionale**: un oggetto, come una sonda spaziale, che si avvicina ad un corpo massivo, come un pianeta, accelera a causa dell'attrazione gravitazionale di quest'ultimo e cambia la sua direzione.

### Note e approfondimenti:

1. Dopo aver mostrato l'effetto fionda sul telo, potrebbe essere utile mostrare un video che ripercorra l'orbita delle sonde spaziali, come il **video 1**. Si tratta dell'orbita della Sonda Rosetta dell'Agenzia Spaziale Europea (ESA), dove si mostra come il viaggio di una sonda spaziale non avviene in linea retta, come si potrebbe pensare per ridurre al minimo la distanza percorsa, ma è costituito da diversi momenti in cui si sfrutta l'effetto fionda attorno ad alcuni pianeti del Sistema Solare. Solo così, infatti, la sonda riesce ad ottenere le velocità necessarie a raggiungere obiettivi molto lontani in un tempo ragionevole.
2. Può essere utile introdurre il concetto di fionda gravitazionale quando i ragazzi hanno lanciato le prime biglie attorno al peso centrale per sperimentare le leggi di Keplero (vedi la Scheda 3). In questa fase, infatti, i ragazzi avranno appena iniziato a prendere familiarità con l'exhibit, e molti di loro non riusciranno a far completare alla loro biglia un'orbita, che invece finirà fuori dal telo. Un'analisi dei motivi per cui alcune biglie cadono spingerà i ragazzi a notare che esse, se passano in prossimità del peso centrale, accelerano, subendo proprio l'effetto fionda.
3. Uno studente particolarmente attento potrebbe far notare che, se la sonda viene accelerata in avvicinamento al pianeta, così pure sarà rallentata in fase di allontanamento da esso. L'avvicinamento e l'allontanamento dal pianeta, quindi, dovrebbero produrre per la sonda una variazione complessiva di velocità pari a zero, e cambiare solo la sua direzione. In realtà, ciò vale



solo se il pianeta è fermo; il pianeta, invece, orbitando intorno al Sole, ha esso stesso una sua velocità. La sonda, entrando nella deformazione dello spazio-tempo prodotta dal pianeta, acquisisce un po' di questa velocità. Complessivamente, la sonda guadagna energia cinetica mentre il pianeta la perde. Poiché la massa del pianeta è molto maggiore di quella della sonda, la modifica della velocità è talmente piccola da essere praticamente impercettibile per quanto riguarda il pianeta, mentre è rilevante per il corpo di massa più piccola, come la sonda, che viene accelerata.

### **Dove trovare immagini e video:**

**Video 1:** Orbita della Sonda Rosetta dell'ESA:

[https://www.esa.int/ESA\\_Multimedia/Videos/2013/10/Rosetta\\_s\\_twelve-year\\_journey\\_in\\_space](https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Videos/2013/10/Rosetta_s_twelve-year_journey_in_space)

# Scheda 5

## *I sistemi doppi*

Attraverso questa scheda vedremo come utilizzare lo spazio-tempo fai-da-te per mostrare il comportamento di un sistema doppio, ovvero di un sistema costituito da due masse, come due stelle.

### **Cosa serve:**

1. Struttura dello spazio-tempo montata.
2. Biglie di vetro.
3. 2 pesi di almeno 500 g. Ad esempio, le sfere di piombo per la pesca o le palle-peso per pilates.
4. L'immagine 3.

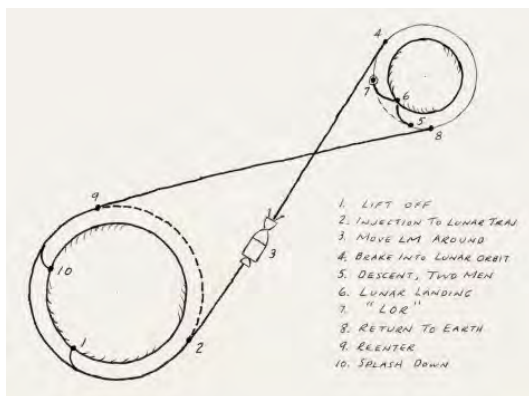
### **Cosa fare:**

1. Sistema i due pesi sul telo in modo che siano equi-distanti rispetto al centro.
2. Lanciando una biglia, potrai riprodurre tre tipi di orbite:
  - a) Un'orbita ellittica attorno ad uno dei pesi.
  - b) Un'orbita ellittica attorno ad entrambi i pesi.

- c) Un'orbita a forma di 8 attorno ad entrambi i pesi.
3. Stai osservando le orbite che i pianeti descrivono quando si trovano in un **sistema doppio**, ovvero in un sistema stellare in cui ci sono due stelle anziché una sola, come nel nostro Sistema Solare.

### Note e approfondimenti:

1. Ricorda che nei sistemi doppi le stelle non sono ferme, ma anch'esse orbitano attorno al centro di massa comune. Se le stelle hanno uguale massa, il loro centro di massa si trova a metà della distanza tra le due stelle.
2. Tra le tre orbite descritte, la prima potrebbe essere difficile da riprodurre sullo spazio-tempo fai-da-te a causa del bordo della struttura. Poco male: potrai chiedere ai ragazzi di riflettere sul perché non riesci facilmente a vederla.
3. Tra le tre orbite descritte, le prime due sono orbite di equilibrio stabile, mentre la terza è di equilibrio *instabile*: qualsiasi perturbazione del sistema (ad esempio, un asteroide che passa nelle vicinanze) produce il collasso dell'orbita verso uno dei due casi più stabili.
4. L'orbita a 8 che stai osservando è la versione semplificata del viaggio che hanno compiuto gli astronauti delle missioni Apollo per arrivare sulla Luna a partire dal 1969, come si vede in **Figura 17**.
5. I sistemi doppi possono dare la possibilità di parlare dei pianeti extra-solari, cioè dei pianeti che girano intorno a stelle diverse dal nostro Sole. Gli scienziati, infatti, hanno già osservato pianeti che girano intorno a due stelle, proprio come il pianeta Tatooine dove abita Luke Skywalker della saga di Star Wars.



**Figura 17:** Rappresentazione schematica dell'orbita delle missioni Apollo, che corrisponde all'**immagine 3** consigliata in questa scheda. In basso a sinistra c'è la Terra, in alto a destra la Luna.

6. Dopo aver riprodotto un sistema doppio, puoi provare a riprodurre un sistema triplo o quadruplo. Quali orbite descriveranno le tue biglie?

### Dove trovare immagini e video:

**Immagine 3:** Orbita delle missioni Apollo:

[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Lunar-orbit\\_rendezvous.jpg#/media/File:Lunar-orbit\\_rendezvous.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Lunar-orbit_rendezvous.jpg#/media/File:Lunar-orbit_rendezvous.jpg)

# Scheda 6

## *Le lenti gravitazionali*

Attraverso questa scheda vedremo come utilizzare lo spazio-tempo fai-da-te per mostrare il fenomeno di lente gravitazionale.

### **Cosa serve:**

1. Struttura dello spazio-tempo montata.
2. Biglie di vetro.
3. 1 peso di almeno 500 g. Ad esempio, la sfera di piombo per la pesca o la palla-peso per pilates.
4. Le **immagini 4, 5 e 6** e il **video 2**.

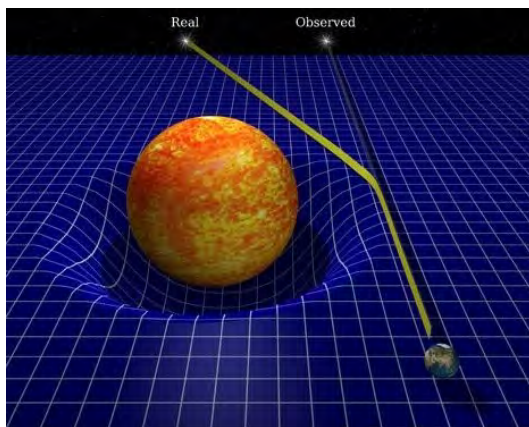
### **Cosa fare:**

1. Sistema il peso al centro del telo.
2. Lascia andare una biglia; la direzione di lancio dovrebbe essere radente alla direzione che congiunge la tua mano al peso centrale.
3. Osserva la biglia mentre si avvicina al peso centrale: essa cambia direzione rispetto a quella iniziale.

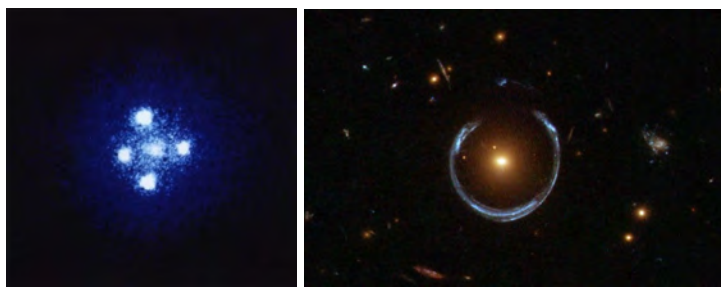
4. Immaginando che la biglia che hai lanciato sia un fotone, cioè una particella di luce, hai appena osservato il fenomeno di **lente gravitazionale**: la presenza di una massa nello spazio-tempo (detta lente gravitazionale) fa curvare un raggio di luce che passa nelle vicinanze, anche se la luce non ha massa!

### Note e approfondimenti:

1. È importante far capire agli studenti che in quest'attività è necessaria un po' di immaginazione, dato che la biglia ora rappresenta un fotone, cioè una particella a massa nulla. Vogliamo far intuire come, a differenza di quanto pensava Newton, Einstein prevede che la luce risenta della gravità, pur non avendo massa.
2. Il fenomeno di lente gravitazionale rappresenta una delle prime prove sperimentali della Teoria della Relatività Generale. Lo scienziato che per primo misurò questo fenomeno fu Arthur Eddington, che osservò nel 1919 lo spostamento della posizione apparente delle stelle causata dal nostro Sole durante un'eclisse totale di Sole. Nella (**Figura 18**), la Terra è in basso a destra. Il Sole, al centro, deforma lo spazio-tempo circostante, facendo deviare un raggio di luce proveniente da una stella lontana. Di conseguenza, questa luce, curvando, sembra provenire da una direzione diversa da quella vera. Per l'osservatore che sta sulla Terra, quindi, la stella appare spostata rispetto alla sua posizione reale. Questo fenomeno fu osservato durante un'eclisse totale di Sole. In questo caso, infatti, è possibile vedere il cielo stellato pur avendo il Sole davanti la propria linea di vista. La posizione delle stelle osservate era già nota con molta precisione grazie alle numerose osservazioni che erano state precedentemente svolte (in altri periodi dell'anno) di notte, cioè quando il Sole non si trovava lungo la linea di vista tra la stella e la Terra.



**Figura 18:** La deflessione della luce, che corrisponde all'**immagine 4** consigliata in questa scheda.



**(a)** La croce di Einstein

**(b)** L'anello di Einstein

**Figura 19:** Due esempi di lensing gravitazionale, che corrispondono alle **immagini 5 e 6** consigliate in questa scheda.

3. Dopo aver introdotto la prima prova sperimentale di lente gravitazionale, potrebbe essere utile mostrare le immagini di lenti gravitazionali che oggi riusciamo a vedere con i telescopi, come quelle mostrate nella **Figura 19(a)** e **19(b)**. L'immagine sulla sinistra è nota come croce di Einstein; essa è dovuta ad un effetto di lente gravitazionale in cui l'immagine della sorgente di

luce viene addirittura quadruplicata, come mostrato nel **video 2**. A destra, invece, vediamo l'anello di Einstein: in questo caso l'allineamento tra la sorgente di luce, la lente gravitazionale (qui in arancio) e l'osservatore (noi) è talmente perfetto che tutti i raggi di luce provenienti dalla sorgente vengono curvati e raggiungono l'osservatore allo stesso modo, producendo l'anello azzurro.

4. L'effetto di lente gravitazionale permette di comprendere come osserviamo i buchi neri (vedi la Scheda 7).

### **Dove trovare immagini e video:**

**Immagine 4:** La deflessione della luce:

<https://i1.wp.com/quantizzando.it/wp-content/uploads/2019/05/Deflessione-della-luce-1.jpg?w=800&ssl=1>

**Immagine 5:** La croce di Einstein:

[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Einstein\\_cross.jpg#/media/File:Einstein\\_cross.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Einstein_cross.jpg#/media/File:Einstein_cross.jpg)

**Immagine 6:** L'anello di Einstein, dettaglio dell'immagine:

[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Lensshoe\\_hubble.jpg#/media/File:Lensshoe\\_hubble.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Lensshoe_hubble.jpg#/media/File:Lensshoe_hubble.jpg)

**Video 2:** Come si forma l'anello di Einstein (si consiglia di usarlo solo fino al minuto 0:19):

<https://www.eso.org/public/videos/esoo847b/>



# Scheda 7

## *I buchi neri*

Attraverso questa scheda vedremo come utilizzare lo spazio-tempo fai-da-te per mostrare cosa sono i buchi neri.

### **Cosa serve:**

1. Struttura dello spazio-tempo montata.
2. Biglie di vetro.
3. 3 dischi in ghisa da 500 g.
4. 2 calamite piccole e potenti.
5. Le **Immagini 7 e 8** e i **video 3 e 4**.

### **Cosa fare:**

1. Sistema i 3 dischi in ghisa al centro del telo, disponendoli uno sopra l'altro.
2. Nota la deformazione che essi producono sul telo.
3. Ora prendi i 3 dischi e disponili sul telo distanziandoli tra loro.

4. Noterai che la deformazione prodotta sul telo è diversa, eppure la massa totale è la stessa del caso precedente: hai solo distribuito le masse in maniera diversa.
5. Questa semplice osservazione fa capire che, per produrre una grande deformazione sullo spazio-tempo, non basta avere una grande massa: è importante anche che questa massa sia concentrata in uno spazio stretto. Gli astrofisici chiamano questa caratteristica “compattezza”: il rapporto tra la massa  $M$  dell’oggetto e la sua estensione lineare  $L$ . A parità di massa, più l’oggetto è compatto più deforma lo spazio-tempo. È proprio questo che succede con i buchi neri!
6. Per simulare al meglio un buco nero, allora, dobbiamo rendere il più possibile compatto il peso che sistemiamo sul telo.
7. Per farlo, prendi le due calamite.
8. Sistema una calamita al centro del telo.
9. Con attenzione, prendi uno dei dischi di ghisa e avvicina al lato l’altra calamita, che quindi rimarrà attaccata. A questo punto, passa il sistema calamita+disco sotto al telo, avvicinandolo lentamente alla calamita poggiata sopra il telo. Fai attenzione in questo passaggio: le calamite sono potenti e possono far male!
10. Una volta che le due calamite si sono agganciate, lascia lentamente la calamita e il disco che si trovano sotto il telo. Vedrai che sul telo si formerà una deformazione molto grande in uno spazio molto stretto: hai simulato un buco nero!
11. Prova ora a lanciare una biglia: la vedrai orbitare attorno alla calamita secondo le leggi di Keplero (vedi la Scheda 3). Questa volta, però, essa raggiungerà delle velocità molto più alte quando si trova in prossimità della calamita.

12. Se ora provi a lanciare più biglie, vedrai che quelle che orbitano più vicino alla calamita saranno molto più veloci di quelle che orbitano appena più lontano.
13. Stai sperimentando quello che succede in prossimità di un buco nero. Qui, non solo la materia orbitante raggiunge velocità tanto più alte quanto più è vicina al buco nero, come avviene per tutti i corpi massivi (vedi la Scheda 3), ma, in più, la differenza di velocità per due orbite molto vicine può essere altissima. Se la materia che sta cadendo nel buco nero è molta, le orbite vicine inizieranno a scaldarsi, un po' come accade alle tue mani quando le sfregi una sull'altra. Gli scienziati rilevano questo calore sotto forma di radiazione elettromagnetica di diversa frequenza: dagli ultravioletti ai raggi X. È proprio questo uno dei modi attraverso il quale riusciamo a studiare i buchi neri.
14. Fai molta attenzione quando separi le due calamite: se non tieni bene anche quella sopra, infatti, essa potrebbe schizzare via e colpire qualcosa!

### **Note e approfondimenti:**

1. La materia che sta cadendo in un buco nero forma il cosiddetto disco di accrescimento del buco nero. Per visualizzare il disco di accrescimento possiamo utilizzare l'immagine del buco nero che compare nel film *Interstellar* (**Figura 20**). Questa immagine è stata creata da uno dei massimi esperti di Relatività Generale, Kip Thorne (premio Nobel per la fisica nel 2017 per la scoperta delle onde gravitazionali - vedi la Scheda 8), che grazie ai potenti mezzi di Hollywood ha potuto simulare, con grande precisione, il modo in cui apparirebbe un buco nero se visto da vicino. Quello che ci salta subito agli occhi, in realtà, è il disco di accrescimento del buco nero, costituito dalla materia che vi sta ruotando intorno e via via

cadendo dentro. Il disco è deformato dal fenomeno di lente gravitazionale (vedi la Scheda 6). La luce emessa dalla parte del disco di accrescimento che si trova dietro al buco nero rispetto alla nostra linea di vista, viene deviata a tal punto da far apparire "piegata" questa parte del disco sottile, e duplicata sia sopra che sotto il piano del disco. Invece di vedere solo un disco sottile (la parte in orizzontale nell'immagine), vediamo anche questa parte "piegata", che sembra circondare il buco nero sopra e sotto. Il [video 3](#) spiega in maniera più approfondita il fenomeno.



**Figura 20:** Il buco nero del film *Interstellar*, che corrisponde all'**immagine 7** consigliata in questa scheda.

2. Nel 2019, grazie al telescopio Event Horizon Telescope, abbiamo ottenuto per la prima volta l'immagine di un buco nero (**Figura 21**). Anche in questo caso stiamo guardando la luce attorno al buco nero. Rispetto all'immagine di *Interstellar*, quest'ultima si differenzia per il piano in cui giace il disco di accrescimento rispetto alla nostra linea di vista. L'animazione prodotta dalla NASA, e rappresentata nel [video 4](#), fa capire come si fa a passare da un'immagine all'altra.



**Figura 21:** La prima fotografia di un buco nero, che corrisponde all'**immagine 8** consigliata in questa scheda.

### **Dove trovare immagini e video:**

**Immagine 7:** Il buco nero del film Interstellar (Crediti: DNEG/Warner Bros. Entertainment Inc./CQG 32 065001):  
<https://cerncourier.com/wp-content/uploads/2019/11/Interstellar.jpg>

**Immagine 8:** La prima fotografia di un buco nero:  
[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Black\\_hole\\_-\\_Messier\\_87\\_crop\\_max\\_res.jpg#/media/File:Black\\_hole\\_-\\_Messier\\_87\\_crop\\_max\\_res.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Black_hole_-_Messier_87_crop_max_res.jpg#/media/File:Black_hole_-_Messier_87_crop_max_res.jpg)

**Video 3:** Come interpretare l'immagine di un buco nero:  
<https://youtu.be/zUyH3XhpLTo>

**Video 4:** L'animazione della NASA che mostra il disco di accrescimento di un buco nero:  
<https://svs.gsfc.nasa.gov/13326>

# Scheda 8

## *Ulteriori spunti*

Attraverso questa scheda daremo ulteriori spunti di utilizzo dello spazio-tempo fai-da-te.

### **Cosa serve:**

1. Struttura dello spazio-tempo montata.
2. Biglie di vetro.
3. 1 peso di almeno 500 g. Ad esempio, la sfera di piombo per la pesca o la palla-peso per pilates.
4. Il **video 5**.

### **Formazione del Sistema Solare:**

1. Sistema il peso al centro del telo.
2. Distribuisce alcune decine di biglie a cinque tuoi studenti, chiedendo loro di posizionarsi attorno allo spazio-tempo in modo più o meno uniforme. Fai inoltre in modo che ognuno di loro abbia un numero di biglie uguali nella mano destra e nella mano sinistra.

3. Tutti gli studenti dovranno lanciare le loro biglie nello stesso momento, stando attenti a lanciare le biglie della mano destra verso destra, e quelle della mano sinistra verso sinistra. Lo scopo è di lanciare tutte le biglie a disposizione senza dare loro un verso di rotazione privilegiato (mi raccomando: lanciate piano le biglie, non vogliamo che cadano tutte!).
4. Osserva cosa fanno le biglie. Alcune cadranno a terra; altre cadranno verso il peso centrale; altre ancora inizieranno ad orbitare.
5. Dopo un po' di tempo, osserva le biglie che sono rimaste in rotazione. Qual è il loro verso di rotazione?
6. Con grande probabilità vedrai che le ultime biglie rimaste ad orbitare lo faranno tutte nello stesso verso.
7. Hai appena riprodotto la formazione di un sistema solare. Il nostro Sistema Solare si è infatti formato a partire da una nebulosa primordiale, che ha dato vita, nel suo centro, al Sole. Attorno alla stella appena nata frammenti di nebulosa hanno continuato ad orbitare in direzioni diverse e a formare prima proto-pianeti e poi pianeti. Oggi intorno al Sole troviamo dei pianeti che, pur essendo molto lontani tra loro, hanno tutti lo stesso verso di rivoluzione. Come mai? Proprio per quanto visto con le biglie: gli urti continui tendono a far vincere un unico verso di rotazione.
8. Nota che questo comportamento è, appunto, solo una tendenza: lanciando diverse volte le biglie vedrai che non sempre vince un unico verso di rivoluzione, ma a volte ne sopravvivono due. Si tratta di un comportamento probabilistico.

**Onde gravitazionali:**

1. Lascia il telo libero da pesi.
2. Appoggia ora la tua mano sul telo, e poi alzala e abbassala di circa 3 o 4 cm al secondo. Il telo inizierà ad oscillare.
3. Stai osservando la propagazione della deformazione dello spazio-tempo che hai prodotto con la tua mano; essa rappresenta un'onda gravitazionale.
4. Un altro modo per simulare le onde gravitazionali attraverso il telo è utilizzando un trapano, come mostrato nel **video 5**.

**Dilatazione temporale:**

1. Lascia il telo libero da pesi.
2. Traccia su di esso, con un gessetto, il raggio dell'hula-hoop.
3. Sistema ora il peso al centro del telo, in modo che la sua posizione coincida con l'estremità della linea.
4. Nota che, in prossimità del peso, dove il telo è più teso, la linea si è allungata (puoi misurarla anche con un righello). In altre parole, si è *dilatata*.
5. In questo modo puoi accennare, in modo molto semplificato, alla dilatazione temporale prodotta dalla presenza di una massa. Ricorda, infatti, che il telo rappresenta sia lo spazio che il tempo, quindi è anche quest'ultimo a deformarsi a causa della presenza di una massa.

**Dove trovare immagini e video:**

**Video 5:** Come riprodurre le onde gravitazionali con un trapano  
<https://www.youtube.com/watch?v=dw7U3BYMs4U>



**E tu, cosa ne pensi di questo libro?**

Hai letto il libro e vuoi darci la tua opinione?

**[Compila questo questionario.](#)**

Hai realizzato in classe le attività proposte in queste schede e vuoi raccontarci la tua esperienza?

**[Compila questo questionario.](#)**

Se invece vuoi contattarci scrivi a [info@astrogarden.it](mailto:info@astrogarden.it).

# Ringraziamenti

Questo lavoro non avrebbe preso vita senza il “Piano Lauree Scientifiche”, che negli anni ci ha permesso di incontrare e conoscere tantissimi studenti e docenti della scuola secondaria superiore, e così di fare nostra una metodologia basata sul confronto tra la ricerca universitaria e le effettive necessità della scuola. Grazie al Piano Lauree Scientifiche, inoltre, abbiamo potuto realizzare il Corso di aggiornamento docenti citato nel testo.

I primi passi del progetto hanno visto anche un’importante contributo da parte della sezione di Roma del gruppo Young Minds della European Physical Society, grazie alla quale abbiamo potuto presentare la gravità in modo divertente e giocoso durante gli eventi che l’Università degli Studi Roma Tre ha proposto per il pubblico generico.

Un ringraziamento speciale va al Servizio Meccanico della Sezione INFN Roma Tre per aver costruito il nostro primo, meraviglioso spazio-tempo.

Grazie ai docenti che hanno partecipato ai Corsi di Aggiornamento del Dipartimento di Matematica e Fisica dell’Università degli Studi Roma Tre: per la vostra incredibile disponibilità a condividere con noi la vostra esperienza e le vostre conoscenze. Grazie in particolare alla prof.ssa Luigia Artiaco del Liceo Scientifico “S. Cannizzaro” di Roma.

Grazie al prof. Dan Burns della scuola secondaria superiore "Los Gatos" di Los Angeles, per aver pubblicato il suo illuminante video su YouTube (<https://www.youtube.com/watch?v=MTY1KjeoyLg>).

Grazie per i consigli tecnici ed estetici a Sergio, a Joram, ad Alfredo e a Giulia.

# Le autrici

**Adriana Postiglione**, astrofisica. Dopo la Laurea in Fisica sulle lenti gravitazionali, ha conseguito il Dottorato, e nel frattempo ha scoperto la bellezza e l'importanza di comunicare la scienza anche ad un pubblico di non esperti. Dopo il Dottorato, questa passione è diventata il suo lavoro: collabora con il Gruppo di Orientamento e Comunicazione della Fisica e della Matematica dell'Università Roma Tre, ed è sempre alla ricerca di nuovi modi e mezzi per parlare di scienza al grande pubblico e agli studenti in particolare.

**Ilaria De Angelis**, astrofisica. Dopo aver conseguito il Dottorato in Fisica con un lavoro sui buchi neri supermassivi, si è dedicata alla didattica della fisica e alla comunicazione scientifica, che rappresentano per lei una vera e propria passione. Attualmente, infatti, organizza eventi scientifici per il pubblico, progetta corsi di formazione e aggiornamento per i docenti, sviluppa attività e laboratori rivolti a studenti delle scuole primarie e secondarie e coordina le attività del Gruppo di Orientamento e Comunicazione del Dipartimento di Matematica e Fisica dell'Università Roma Tre.

**English version**

# Introduction

Practical, interactive and playful activities make students' learning particularly effective. This is even more true for scientific topics, such as physics, where the experiential phase reinforces and completes the theoretical knowledge, helping students understand phenomena that are often far away from their everyday experience.

Let's consider the concept of gravity: it forces us to change our vision of the world and even question our idea of space and time. Thanks to the Theory of General Relativity introduced by Einstein in 1916, nowadays we know that gravity derives from the deformation of the so-called space-time: a four-dimensional entity that combines space (with three dimensions) and time (which has only one dimension). This space-time is not a static stage, but instead a dynamical element which can change according to the objects placed in it: a massive object, such as a star, deforms the space-time producing gravity, i.e. forcing planets to orbit around it. In other words, gravity is not a force, but instead the consequence of the space-time deformation; we can not directly see the deformation, but we can deduce it by observing planets orbiting stars in the Universe.

Yes, this seems very hard to imagine. For this reason, in order to better explain his idea of gravity, Einstein himself proposed a powerful analogy, often called *rubber sheet analogy*. Let's suppose that space-time has two dimensions instead of four: like a paper sheet, or, even better, a rubber sheet. Now imagine to put on the

sheet a little weight: it would stretch the sheet. And what if we now throw a marble? It would fall toward the central weight, eventually turning around it before falling. In other words, the marble would be *attracted* by the central weight. We are experimenting gravity: the mere presence of a mass in the space-time makes it warp, resulting in the gravitational attraction.

The rubber sheet analogy is still studied by physicists, educators and science communicators. Although it shows some weaknesses (as we will see later in the book), it represents a useful way to talk about General Relativity with a non-expert audience, but even more than that: if used properly, it is also able to engage the public's attention and entertain it.

For these reasons, in 2017, as the Education and Public Outreach Group of the Department of Mathematics and Physics of Roma Tre University, we decided to realize an exhibit that could reproduce the rubber sheet analogy. Thanks to the mechanical workshop of the Roma Tre INFN Section, we built a circular aluminum structure with a diameter of 1.8 m that could support a lycra sheet and ensure a group of about 20 people to comfortably watch what presented on the sheet. Our aim was to test the aspects of General Relativity which could have been shown using different weights and marbles and how to do so.

We started to test the exhibit during one of the public events organized by the Department. This type of events was particularly suitable for our aim: they host seminars, telescope observations and interactive activities that allow people of all ages to discover scientific topics in an fun and playful atmosphere. The result was impressive: dozens of people were intrigued by the sheet and by the orbits that the marbles described around the weights. But even more, thanks to the gaming approach, they were willing to know more about complex topics like black holes and gravitational waves, asking lots

of questions. Some of them stayed at the exhibit even for hours.

In that moment, we realized that the game-like aspect of the exhibit, which could be easily alternated with theoretical insights, was its strength, and made it of great potential especially for high school, where gravity is typically studied with more detail. However, it was necessary to build a more structured activity that could be carried out in classrooms.

In the first months of 2018, we started thinking about an activity of one hour and an half covering the main topics about gravity, but also leaving enough space to interact and play with students. We began to test it with small groups of students who visited the Department for educational guidance activities; then we chose five classes, one for each year of the Italian school system, coming from the high school “S. Cannizzaro” in Rome, in order to investigate the interest and the comprehension of students of different ages. This first phase collected so many positive feedbacks that we decided to include the activity among those permanently offered to schools by the Department. Over time, thanks to the interaction with classes and especially with teachers, we have realized that teachers themselves could have carried out the same activity in autonomy, as long as they were put in the position to do it with the *right* guidance. But what did *right* mean in this case? What were the real needs of teachers that can make them feel confident enough and independent about the activity?

To answer those questions, in January 2019 we decided to present our work during the annual high school teachers refresher course that took place at the Department involving about 25 teachers on duty. The response was impressive: the teachers were willing to learn how to use our space-time and, together with lots of questions, they shared with us several comments and observations.

We then could collect all those observations and create educa-



tional materials that could be used also by other teachers, even outside the Rome area that the Department could reach. First of all, we had to design a structure for the space-time that could be easily built and that could fit in any classroom, therefore smaller and cheaper than ours. Then, it was necessary to create educational cards that could guide the teacher step by step in treating the various topics related to gravity, suggesting the "tricks" to be used in order to choose the most suitable marbles and weights, and the best way to show the different phenomena.

At the beginning of 2020, we had selected cheap and easy-to-find materials that could be used to build a do-it-yourself space-time; at the same time we were developing the educational cards, submitting them from time to time for discussion with the teachers on duty who were attending the refresher course at the Department.

This is how we created this book: through experiments, tests and feedbacks. It summarizes the activity of over two years, but we keep in mind that this is just another starting point. Now we have to get in the classroom, and find out together what else you can tell through a simple rubber sheet and some marbles.

You too can help develop this book and the proposed activities by answering the questionnaires at the end of the book (see section "Your opinion"). In this way you will be able to report any critical points and improvements to be made, and propose other activities that you think could be realized with the rubber sheet. You can also contact us at [info@astrogarden.it](mailto:info@astrogarden.it).

# Description of the cards

This book contains eight educational cards that guide the teacher in the realization of different activities related to gravity, created to be suitable for high school students, especially for the ones that have been already dealt with Kepler's law (which typically occurs during the third year in the Italian school system, that corresponds to students which are 15-16 years old). However, we think that the cards can also be used with younger students, to provide a first introduction to topics that might be explored in details later. Each card, except the first one that is focused on how to build the space-time, is structured as follows:

1. The addressed topic.
2. Brief description of the purpose of the proposed activity.
3. List of the materials needed to realize the activity.
4. List of the steps to follow in order to show the phenomenon; in this section all the tricks and guidelines to choose the right marbles and weights and to properly throw them on the sheet are also specified.
5. Notes and insights. In this section images, videos and links are suggested in order to help the teacher to better illustrate the topic.

6. Where to find images and videos. In this section, resources to find images and videos are presented.

The topics covered by the cards are gradually more complex: the first card illustrates the instructions to follow in order to build the do-it-yourself space-time; the second card faces the strengths and weaknesses of the rubber sheet analogy; the third, fourth and fifth cards focus on phenomena that can also be explained by the Newtonian theory of gravity, but that the rubber sheet allows to better understand and visualize; finally, the sixth, seventh and eighth cards deal with more advanced topics of General Relativity, related to some of the most recent discoveries of modern physics.

# Card 1

## *How to build your own space-time*

In this educational card, you can find the step-by-step procedure to build your own space-time, using materials easy to find. At the beginning, materials and instruction to build the structure are presented; then, description of marbles and weights suited to reach the goal of this card are given. In the photos, a coin is often placed near the materials to give an idea of their real sizes.

All materials can be found in online stores, hardware stores, fabric stores or do-it-yourself (DIY) stores. Keep in mind that you need also a screwdriver.

### **Materials for the structure**

1. A plastic hula-hoop with a diameter of 80 cm (the most common has a diameter of 60 cm, but we believed is too small to be used in classroom).

2. 6 wooden slats with an height of 80 cm, preferably with 40mm x 40 mm square bases.



**Figure 1**

3. 6 plastic tube clips with a 20 mm diameter (the diameter should be slightly larger than the thickness of the hula-hoop).



**Figure 2**

4. 6 screws of 40 mm x 3 mm.



Figure 3

5. 10 clothespins, with a diameter of 20 mm.



Figure 4

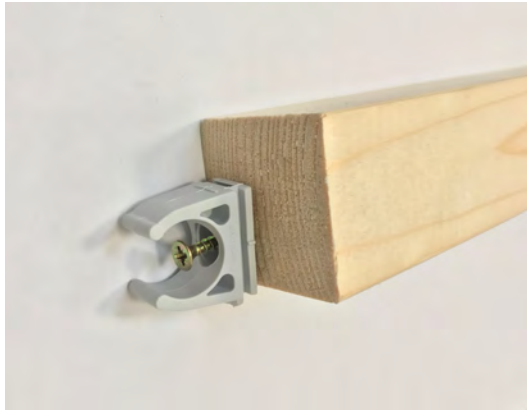
6. 1 lycra sheet, 1m x 1m.



**Figure 5**

## How to build the structure

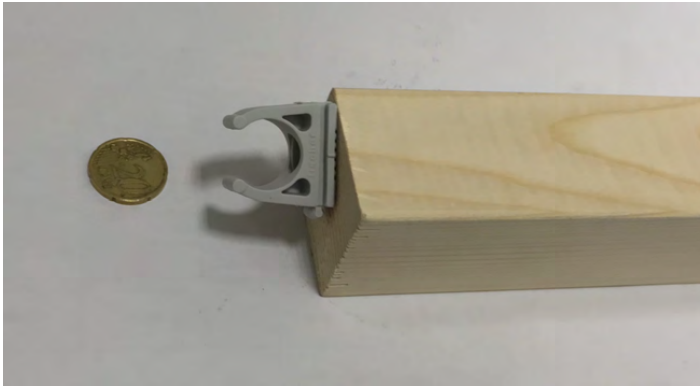
1. Insert the screw inside the plastic tube clips and place it on the wooden slats. The position of the tube clip should be as close to the border as possible (see **Figure 6**).



**Figure 6**

2. With a screwdriver, fix the plastic tube clips into the wooden slats. Let the clip rotate easily around the screw. Remember: do not tighten the screw too much! You will need some freedom of movement in the following steps.





**Figure 7**

3. Assemble the remaining tube clips into the other 5 slats. In this way, you have built the 6 legs of the structure.
4. Hook the hula-hoop to the tube clips, in a way that the wooden slats are as evenly spaced as possible. Then, turn the slats in order to place the tube clips inside the structure, as shown in **Figure 8**.



**Figure 8**

5. Fix the lycra sheet on the hula-hoop with the clothespins. Remember: the sheet should not be too tight.

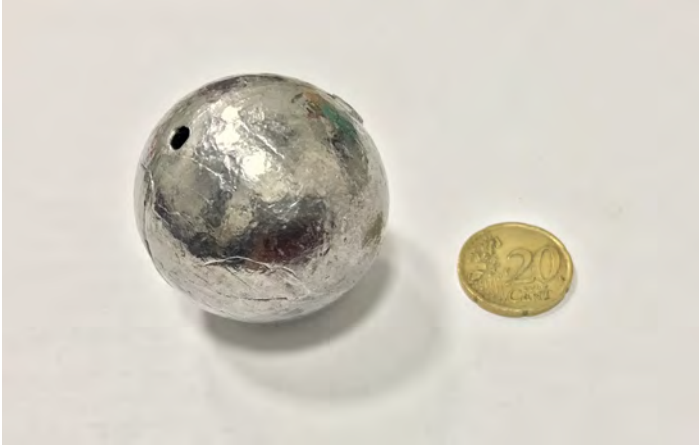


**Figure 9**

6. Your space-time is now ready!

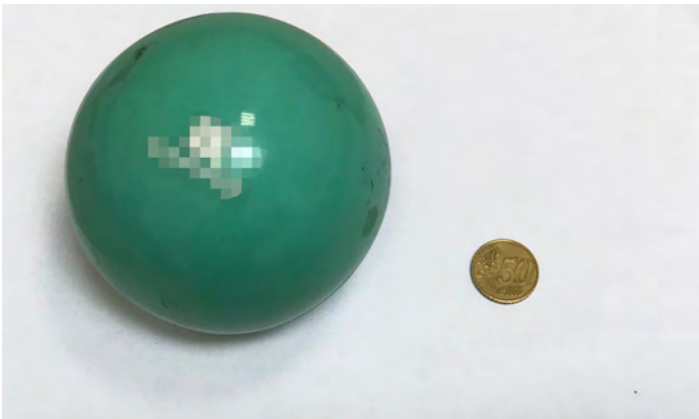
### **Marbles and weights to use**

1. 2 weights of at least 500 g, if possible spherical. For example, you can use lead balls for fishing.



**Figure 10**

2. 2 weighted pilates balls of at least 500 g.



**Figure 11**

3. at least 10 glass marbles.



**Figure 12**

4. pairs of small but powerful magnets.



**Figure 13**

5. at least 3 cast iron disks with a weight of 500 g and 28 mm diameter.



**Figure 14**

**And if you have more space...**

An alternative structure to the one proposed here, bigger and more complex, was built by prof. Dan Burns of Los Angeles "Los Gatos" High School, using PVC tubes. Assembly instructions are shown in this video: <https://www.youtube.com/watch?v=2JOf1ub9USo>.

# Card 2

## *Introduction to the use of the space-time*

The aim of this educational card is to introduce the concept of space-time through the DIY simulator.

### **What you need:**

1. Assembled space-time structure.
2. Glass marbles.
3. 1 weight of at least 500 g. For example, you can use the lead ball for fishing or the weighted pilates ball.

### **What to do:**

1. Throw a marble on the sheet when it is flat. Note that the marble moves in the direction you initially impressed on it and goes in a straight line.
2. Now remove the marble and place the weight in the center of the sheet.
3. Throw again the marble. You might notice that the marble is now attracted by the central weight until it falls on it.

4. By throwing the marble appropriately, you can reproduce orbits similar to those followed by the planets around the Sun (see the Card 3).
5. You are experiencing **gravity** as described by Einstein in his Theory of General Relativity. In this theory, Einstein introduces the concept of space-time, which is deformed by the presence of a mass. It is the deformation of space-time that produces gravity, and that causes bodies to be attracted by the mass.
6. Make your students reflect on what is reported in the section "Notes and insights". This will help you to better start all the other activities proposed in these cards and not to generate misconceptions.

### **Notes and insights:**

1. When we simulate space-time with a lycra rubber sheet we are introducing several simplifications. First of all, space-time is not made of lycra! Furthermore, it has 4 dimensions (3 spatial + 1 temporal), but we cannot see them since we perceive only 3 dimensions. Therefore, when we play with the elastic sheet, we are actually reducing the dimensions of our space-time: from 4 to 2. The sheet is our whole universe, as if we were two-dimensional beings drawn on a sheet of paper.
2. The lycra sheet analogy can make one think that the bodies "fall" towards the masses that deform space-time. Be careful: the idea of "falling" implies doing it *downwards*, that is, experiencing a gravitational attraction such as the one the Earth impresses on us and on all the bodies around us. This is not the case in space: bodies are simply attracted, there is no bottom or top, above or below, but rather near/far in all directions. Even black holes (see the Card 7) are not funnels into which material



falls downwards. They are spherical objects that attract the surrounding matter *in all directions*.

3. General Relativity foresees the deformation of space-time, that is, of both space and time. With the rubber sheet, however, we can only visualize a spatial deformation (even if simplified). A way to deal with the deformation of time is provided in the Card 8.

# Card 3

## *Kepler's laws*

The aim of this educational card is to show how to use the DIY space-time to describe the Kepler's laws.

### **What you need:**

1. Assembled space-time structure.
2. Glass marbles.
3. 1 weight of at least 500 g. For example, you can use the lead ball for fishing or the weighted pilates ball.
4. The **images 1 e 2**.
5. Optional: a lead ball for fishing with a weight of 50 g.

### **Kepler's first law:**

1. Place the weight in the center of the lycra sheet.
2. Throw a marble in a direction almost parallel to the hula-hoop, so that the resulting orbit is very wide.
3. As the marble begins to orbit around the central weight, note that the shape of the orbit is not exactly circular, but elliptical.

You are observing **Kepler's first law**: the planets (marbles) describe elliptical orbits around the Sun (the central weight), for which the Sun (the central weight) occupies one of the two foci.

**Kepler's second law:**

1. Place the weight in the center of the lycra sheet.
2. Throw a marble. This time the throwing direction should be as grazing as possible to the direction between your hand and the central weight. In this way, the resulting orbit will have a higher eccentricity.
3. Now observe the velocity of the marble as it orbits the central weight. It will be higher when the marble is close to the weight (in perihelion) and lower when it is far from the weight (in aphelion).
4. You are observing **Kepler's second law**: a line segment connecting the Sun (the central weight) and a planet (the marble) sweeps out equal areas during equal times, meaning that the orbital speed is not constant.

**Kepler's third law:**

1. Place the weight in the center of the lycra sheet.
2. Throw a marble in a direction almost parallel to the hula-hoop, so that the resulting orbit is very wide.
3. Wait a few seconds, and then throw a second marble.
4. Note that the marble in the innermost orbit runs faster than the marble in the outermost orbit. You are observing **Kepler's third law**: the square of the orbital period of a planet is directly

proportional to the cube of the semi-major axis of its orbit. In other words, the orbital period of a planet (marble) around the Sun (central weight) is longer as the planet (marble) is further away from the Sun (central weight). Analogously, the rotational velocity of the planet is higher as the planet is closer to the Sun. Therefore Mercury takes less time to orbit around the Sun than Jupiter.

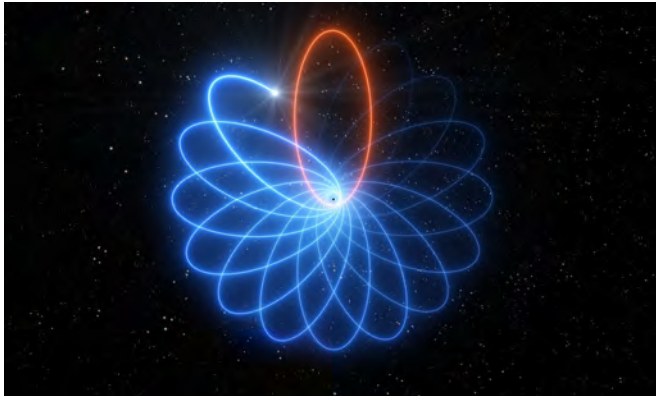
### Notes and insights:

1. Once you become familiar with the exhibit, you can try to reproduce Kepler's laws even for a Sun-Earth-Moon system. Try to throw a heavier ball together with the glass marble, for example a 50 g lead ball for fishing. If you throw the two objects at the same time, you will notice that the marble will also have an elliptical orbit around the ball, and then both of them will have an elliptical orbit around the central weight.
2. On the contrary of what happens for the planets, the orbit described by the marble reduces its semi-axis, spiraling until falling towards the central weight. This is due to the friction between the marble, the sheet and the air, which dissipates the kinetic energy of the marble and slows it down. In space, however, there is nothing producing friction, so the planets do not approach the Sun.
3. If you look carefully the orbits described by the marbles, you will notice that they show a precession of the perihelion, as drawn in **Figure 15**. This phenomenon also occurs for planets, but in a much less evident way. The planet experiencing this precession the most is Mercury, since it is the closest to the Sun; it was precisely the explanation of this phenomenon that represented the first great success of the Theory of General Relativity and that brought out the limits of Kepler's laws.



**Figure 15:** The precession of the Mercury's orbit perihelion, that corresponds to the **image 1** suggested in this card.

In 2020, the same phenomenon was observed for the first time for a star that rotates around a black hole: the one in the center of our Galaxy (**Figure 16**).



**Figure 16:** The precession of the orbit of the star around the supermassive black hole in the center of our Galaxy, that corresponds to the **image 2** suggested in this card.

**Where to find images and videos:**

**Image 1:** The precession of the Mercury's orbit perihelion:

[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Perihelion\\_precession.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Perihelion_precession.jpg)

**Image 2:** The orbit of the star around the supermassive black hole in the center of our Galaxy:

<https://www.eso.org/public/usa/news/eso2006/?lang>

# Card 4

## *Gravity assist*

The aim of this educational card is to show how to use the DIY space-time to describe the phenomenon of the gravity assist, widely exploited by many space missions.

### **What you need:**

1. Assembled space-time structure.
2. Glass marbles.
3. 1 weight of at least 500 g. For example, you can use the lead ball for fishing or the weighted pilates ball.
4. The **video 1**.

### **What to do:**

1. Place the weight in the center of the lycra sheet.
2. Throw a marble. The throwing direction should be as grazing as possible to the direction connecting your hand to the central weight.
3. Now look at the marble as it approaches the central weight: it accelerates and changes direction from the initial one.

4. You are observing the **gravity assist**: an object, like a space probe, approaching a massive body, like a planet, accelerates due to the gravitational attraction of the latter.

### Notes and insights:

1. After showing the gravity assist on the sheet, it may be useful to show a video that describes the orbit of space probes, like the [video 1](#). It shows the orbit of the European Space Agency's probe Rosetta. From the video, it is clear that the journey of a space probe does not take place in a straight line, as one might think, in order to minimize the distance traveled. Instead, it consists of several moments in which the gravity assist is exploited around different planets of the Solar System. Only in this way, the probe can actually reach the very high speeds necessary to arrive to very distant objects in a reasonable time.
2. It may be useful to introduce the concept of gravity assist after letting the students throw the first marbles around the central weight to experience the Kepler's laws (see the Card 3). In this phase, in fact, the students will have just started to become familiar with the exhibit, and many of them will not be able to make their marble to complete an orbit, which might end up outside the sheet. An analysis of the reasons why some marbles fall, will prompt the students to note that if the marble passes near the central weight, it accelerates, undergoing precisely the gravity assist.
3. A particularly curious student could point out that if the probe is accelerated while approaching a planet due to its gravitational attraction, it will also be slowed down when moving away from it, because of the same force. The approach and the departure from the planet, therefore, would produce for the probe an overall variation in speed equal to zero. However,



this is true only if the planet is stationary; instead the planet is moving and orbiting around the Sun. Overall, the probe gains kinetic energy because the planet loses it, resulting in a variation of its orbit. This change, however, is generally so small to be practically unnoticeable for the planet, but instead it is relevant for the object of lower mass, like the probe that is accelerated.

### **Where to find images and videos:**

**Video 1:** The orbit of ESA Rosetta mission:

[https://www.esa.int/ESA\\_Multimedia/Videos/2013/10/Rosetta\\_s\\_twelve-year\\_journey\\_in\\_space](https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Videos/2013/10/Rosetta_s_twelve-year_journey_in_space)

# Card 5

## *Binary systems*

The aim of this educational card is to show how to use the DIY space-time to describe a binary system, i.e. a system of two masses, like two stars.

### **What you need:**

1. Assembled space-time structure.
2. Glass marbles.
3. 2 weights of at least 500 g. For example, you can use the lead balls for fishing or weighted pilates balls.
4. The **image 3**.

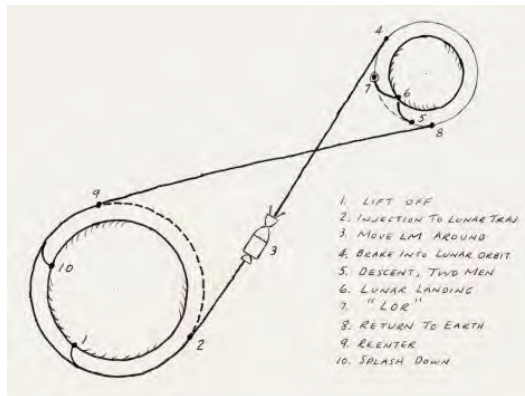
### **What to do:**

1. Place the two weights on the sheet so that they are equally spaced from the center.
2. By throwing a marble, you can reproduce three types of orbits:
  - a) An elliptical orbit around one of the weights
  - b) An elliptical orbit around both weights

- c) An 8-shaped orbit around both weights
3. You are observing the orbits that the planets describe when they belong to a **binary system**, i.e. a system in which two stars are present, instead of one, like our Solar System.

### Notes and insights:

1. Note that in binary systems the stars are not stationary, but they also orbit around the common center of mass. If the stars have equal masses, their center of mass is placed half way between them.
2. Considering the three orbits described, the first could be difficult to reproduce on DIY space-time because of the edge of the structure. No harm done: you can ask your students to think about why you can not easily see it.
3. Considering the three orbits described, the first two orbits are in stable equilibrium, while the third one is in *unstable* equilibrium: any perturbation of the system (for example, an asteroid passing nearby) produces the collapse of the orbit towards one of the two most stable ones.
4. The 8-shaped orbit you are observing is the simplified version of the journey that the astronauts of the Apollo missions have performed to arrive on the Moon since 1969, as you can see in **Figure 17**.
5. Binary systems can give the opportunity to talk about extra-solar planets, meaning planets orbiting around stars other than our Sun. In fact, scientists have already observed planets that orbit around two stars, just like the planet Tatooine where Luke Skywalker from the Star Wars saga lives.



**Figure 17:** The orbit of the Apollo missions, that corresponds to the **image 3** suggested in this card. On the bottom left there is the Earth, on the top right the Moon.

6. After playing with the binary system, you can try playing with a triple or quadruple system. Which orbits will your marbles describe?

### Where to find images and videos:

**Image 3:** The orbit of the Apollo missions:

[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Lunar-orbit\\_rendezvous.jpg#/media/File:Lunar-orbit\\_rendezvous.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Lunar-orbit_rendezvous.jpg#/media/File:Lunar-orbit_rendezvous.jpg)

# Card 6

## *Gravitational lensing*

The aim of this educational card is to show how to use the DIY space-time to describe the phenomenon of gravitational lensing.

### **What you need:**

1. Assembled space-time structure.
2. Glass marbles.
3. 1 weight of at least 500 g. For example, you can use the lead ball for fishing or the weighted pilates ball.
4. The **images 4, 5 e 6** and the **video 2**.

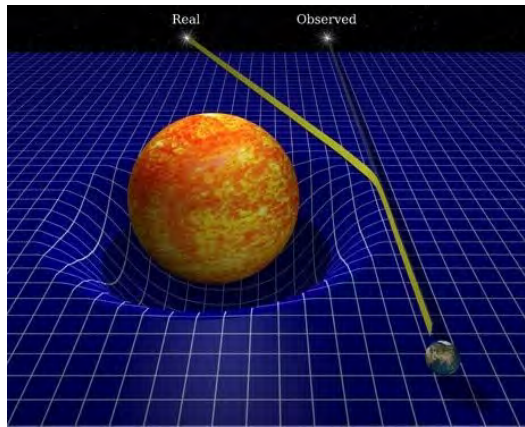
### **What to do:**

1. Place the weight in the center of the lycra sheet.
2. Throw a marble. The throwing direction should be as grazing as possible to the direction connecting your hand to the central weight.
3. Take a look at the marble as it approaches the central weight: it changes direction compared to the initial one.

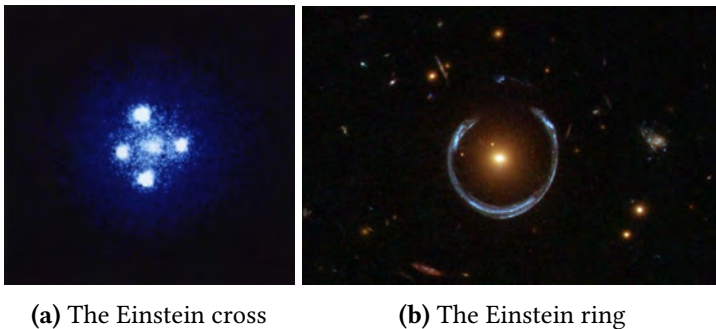
4. If you imagine that the marble thrown is a photon, i.e. a particle of light, you have just observed the phenomenon of **gravitational lensing**: the presence of a mass in space-time (called gravitational lens) curves the ray of light passing nearby, even if light has no mass!

### Notes and insights:

1. It is important to make your students understand that a little imagination is needed in this activity, since the marble now represents a photon, a particle with zero mass. We want to make them understand that, unlike Newton thought, Einstein predicts that light suffers from gravity even if it has no mass.
2. The gravitational lensing represents one of the first experimental tests of the Theory of General Relativity. The scientist who first measured this phenomenon was Arthur Eddington, who observed in 1919 the shift of the apparent position of the stars caused by the Sun during a total solar eclipse. In (**Figure 18**), the Earth is in the lower right part. The Sun, in the center, deforms the surrounding space-time, causing the deflection of the ray of light passing nearby. Consequently, the curved light appears to come from a different direction with respect to the real one. Therefore, for the observer on the Earth, the star appears to be displaced with respect to its real position. This phenomenon was observed during a total eclipse of the Sun, because at that moment it was possible to see the starry sky despite having the Sun in front of the line of sight. The position of the observed stars was already known with great precision thanks to the numerous observations that had been previously carried out (at other times of the year) at night, meaning that when the Sun was not along the line of sight between the star and the Earth.



**Figure 18:** The deflection of light, that corresponds to the **image 4** suggested in this card.



**Figure 19:** Two examples of gravitational lensing, that correspond to the **images 4** and **5** suggested in this card.

3. After introducing the first experimental test of gravitational lensing, it might be useful to show the images of gravitational lenses that we can see today with telescopes, like in **Figures 19(a) e 19(b)**.

The image on the left is known as the Einstein cross. It is due to a gravitational lensing effect in which the image of the source

is even quadrupled, as shown in the [video 2](#). On the right, we see the Einstein Ring: in this case the alignment between the source, the gravitational lens (here in orange) and the observer (us) is so perfect that all the light rays coming from the source are curved and reach the observer in the same way, producing the blue ring.

4. The gravitational lensing allows you to understand how we observe black holes (see the Card 7)

### **Where to find images and videos:**

**Image 4:** The deflection of light:

<https://i1.wp.com/quantizzando.it/wp-content/uploads/2019/05/Deflessione-della-luce-1.jpg?w=800&ssl=1>

**Image 5:** The Einstein cross:

[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Einstein\\_cross.jpg#/media/File:Einstein\\_cross.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Einstein_cross.jpg#/media/File:Einstein_cross.jpg)

**Image 6:** The Einstein ring, detail of the image:

[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Lensshoe\\_hubble.jpg#/media/File:Lensshoe\\_hubble.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Lensshoe_hubble.jpg#/media/File:Lensshoe_hubble.jpg)

**Video 2:** How the Einstein cross is formed (we recommend to see the video only until minute 0:19):

<https://www.eso.org/public/videos/es00847b/>



# Card 7

## *Black holes*

The aim of this educational card is to show how to use the DIY space-time to describe the black holes.

### **What you need:**

1. Assembled space-time structure.
2. Glass marbles.
3. 3 cast iron discs with a weight of 500 g.
4. 2 small but powerful magnets.
5. The **images 7** and **8**, and the **videos 3** and **4**.

### **What to do:**

1. Place the 3 cast iron discs in the center of the sheet, piling them
2. Note the deformation they produce on the sheet
3. Now take the 3 discs and arrange them on the sheet, spacing them apart.

4. You will notice that the deformation produced on the sheet is less intense, even if the total mass is the same as in the previous case: you only distributed the masses in a different way.
5. This simple observation makes it clear that in order to produce a large deformation on space-time, having a large mass is not enough: it is also important that this mass is concentrated in a confined space. Astrophysicists call this feature "compactness": the ratio between the mass  $M$  of the object and its linear extension  $L$ . With equal mass, the more compact is the object the more it deforms space-time. This is exactly what happens with **black holes**!
6. The best way to simulate a black hole is then to make the weight we place on the sheet as compact as possible.
7. To do this, take the two magnets.
8. Place a magnet in the center of the sheet.
9. Now carefully take one of the cast iron discs and bring the other magnet close to the side: it will remain attached. At this point, pass the magnet + disc system under the sheet, slowly bringing it closer to the magnet resting on the sheet. Be careful in this step: magnets are powerful and can hurt!
10. Once the two magnets have hooked, slowly leave the magnet and the disc that are under the sheet. You will see that a very large deformation will form on the sheet in a very narrow space: you have simulated a black hole!
11. Now try to throw a marble: you will see it orbiting the magnet according to the Kepler's laws (see the Card 3). This time, however, it will reach much higher speeds when it is close to the magnet.

12. If you now try to throw more marbles, you will see that the ones orbiting closer to the magnet are faster than the ones orbiting farther away.
13. You are experiencing what happens close to a black hole. Here, not only the orbiting matter reaches higher speeds the closer it is to the black hole, as it happens for all massive objects (see the Card 3), but furthermore the difference in speed between two close orbits can be very high. If the matter orbiting around the black hole is a lot, the nearby orbits will begin to heat up, just like what happens to your hands when you rub them one on top to the other. Scientists detect this heat as electromagnetic radiation of different frequencies: from ultraviolet to X rays. This is precisely one of the ways we use to study black holes.
14. Be very careful when you separate the two magnets: if you don't keep tight the one above, it could jump and hit something!

### **Notes and insights:**

1. The matter that is falling into a black hole forms the so-called black hole accretion disc. We can visualize it through the image of the black hole that appears in the film *Interstellar* (**Figure 20**).

This image was created by one of the greatest experts of General Relativity, Kip Thorne (Nobel prize for physics in 2017 for the discovery of gravitational waves - see the Card 8), who has been able to simulate with great precision the way a black hole would look when viewed up close thanks to the powerful means of Hollywood. What immediately catches our eye is actually the accretion disk of the black hole, made up of the matter that is rotating around it and gradually falling inside. The disk is deformed by the phenomenon of gravitational lensing (see the Card 6). The light emitted by the part of the accretion disk

that is behind the black hole, with respect to our line of sight, is so deflected that this part of the disk appears "folded" and duplicated both above and below the plane of the disc. Instead of a single thin disk (the horizontal part in the image), we thus also see this "folded" part, which seems to surround the black hole above and below. The [video 3](#) explains the phenomenon in more depth.



**Figure 20:** The black hole of the film Interstellar, that corresponds to the **image 7** suggested in this card.

2. In 2019 the Event Horizon Telescope has provided the first image of a black hole (**Figure 21**). Again we are looking at the light around the black hole. Compared to the image of Interstellar, the Event Horizon Telescope image differs in the plane in which the accretion disk lies with respect to our line of sight. The animation produced by NASA ([video 4](#)) makes it clear the difference between the two images.



**Figure 21:** The first image of a black hole, that corresponds to the **image 8** suggested in this card.

### Where to find images and videos:

**Image 7:** The black hole of the film Interstellar (Credits: DNEG/Warner Bros. Entertainment Inc./CQG 32 065001):  
<https://cerncourier.com/wp-content/uploads/2019/11/Interstellar.jpg>

**Image 8:** The first image of a black hole:  
[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Black\\_hole\\_-\\_Messier\\_87\\_crop\\_max\\_res.jpg#/media/File:Black\\_hole\\_-\\_Messier\\_87\\_crop\\_max\\_res.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Black_hole_-_Messier_87_crop_max_res.jpg#/media/File:Black_hole_-_Messier_87_crop_max_res.jpg)

**Video 3:** How to understand the image of a black hole:  
<https://youtu.be/zUyH3XhpLTo>

**Video 4:** The NASA animation showing the accretion disk of a black hole:  
<https://svs.gsfc.nasa.gov/13326>

# Card 8

## *Further ideas*

The aim of this educational card is to give some further ideas on how to use the DIY space-time.

### **What you need:**

1. Assembled space-time structure.
2. Glass marbles.
3. 1 weight of at least 500 g. For example, you can use the lead ball for fishing or the weighted pilates ball.
4. The **video 5**.

### **Formation of the Solar System:**

1. Place the weight in the center of the lycra sheet.
2. Give a few dozen marbles to your students, asking them to stand around the space-time in a uniform way. Also make sure that each of them has the same number of marbles in their right and left hands.

3. All students will have to throw their marbles at the same time, being careful to throw the marbles from the right hand to the right, and those in the left hand to the left. The final aim is to throw all the available marbles without giving them a privileged direction of rotation (be careful: throw the marbles slowly, we do not want them to fall!).
4. Observe how marbles behave. Some will fall on the ground; some of them will fall towards the central weight; others will begin to orbit.
5. After a while, observe the marbles that have remained in rotation. What is their direction of rotation?
6. Probably you will see that the last marbles in orbit will all move in the same direction.
7. You have just reproduced the formation of the Solar System. Our Solar System was formed from a primordial nebula, which gave birth to the Sun in its center. Around the newly born star, fragments of the nebula continued to orbit in different directions and to slowly form protoplanets and then planets. Today around the Sun we find planets which, although very far apart, have all the same direction of revolution. Why? Precisely as seen with the marbles: the continuous impacts make a single direction of rotation win.
8. Note that this behavior is only a trend: by throwing the marbles several times you will see that not always one verse of revolution win, but instead sometimes two survive. This is a probabilistic behavior.

**Gravitational waves:**

1. Leave the sheet free of weights.
2. Now place your hand on the sheet, raising and lowering it. The sheet will begin to swing.
3. You are observing the propagation of the deformation of space-time that you have produced with your hand; it represents a gravitational wave.
4. Another way to simulate gravitational waves through the sheet is by using a drill, as shown in the [video 5](#).

**Time dilation:**

1. Leave the sheet free of weights.
2. Draw with a piece of chalk the radius of the hula-hoop
3. Now place the weight in the center of the sheet, so that its position coincides with the end of the line.
4. Note that, close to the weight, where the sheet is more stretched, also the line has stretched (you can also measure it with a ruler). In other words, it has *dilated*.
5. In this way you can mention, in a very simplified way, the time dilation produced by the presence of a mass. Remember that the sheet represents both space and time, so it is also the latter which is deformed by the presence of a mass.

**Where to find images and videos:**

**Video 5:** How to simulate the gravitational waves with a drill

<https://www.youtube.com/watch?v=dw7U3BYMs4U>



## **What do you think of this book?**

Have you read the book and do you want to give us your opinion?

[\*\*Answer this questionnaire\*\*](#)

Did you carry out in your classroom the activities proposed in these cards and do you want to share your experience?

[\*\*Answer this questionnaire\*\*](#)

If you want to contact us write to [info@astrogarden.it](mailto:info@astrogarden.it).

# Acknowledgements

This book would have never come to life without the Italian project "Piano Lauree Scientifiche" (Plan for Scientific Degrees), which allowed us to meet several high school students and teachers through the years; in doing so, we embraced a research methodology based on the continuous confrontation between University and the real needs of the schools. Moreover, thanks to the "Piano Lauree Scientifiche" we could realize the high school teachers' refresh course mentioned in the text.

The first steps of this project also received an important contribution from the Rome section of the Young Minds of the European Physical Society (EPS), thanks to which we could talk about gravity in a fun and playful way during the events for the general public hosted by the Roma Tre University.

A special thanks goes to the mechanical workshop of the Roma Tre INFN Section, for having built our first, wonderful space-time.

Thanks to the teachers who participated to the refresh course hosted by the Department of Mathematics and Physics of Roma Tre University: for your incredible willingness to share with us your experience and knowledge. A special thanks goes to the prof. Luigia Artiaco of the "S. Cannizzaro" high school in Rome.

Thanks to the prof. Dan Burns of the "Los Gatos" high school in Los Angeles, for having published on YouTube his inspiring video

(<https://www.youtube.com/watch?v=MTY1KjeoyLg>).

Thanks for the technical and aesthetic advices to Sergio, Joram, Alfredo and Giulia.

# The authors

**Adriana Postiglione**, astrophysicists. After her master thesis in Physics on the phenomenon of gravitational lensing, she earned the PhD in Physics, and in the meantime she discovered the beauty and the importance of communicating science to a public of non-experts. After the PhD, this passion became her job: she now collaborates with the Education and Public Outreach Group of the Department of Mathematics and Physics of Roma Tre University, and she is always looking for new ways and tools to talk about science with general public and students.

**Ilaria De Angelis**, astrophysicists. After her PhD in Physics on supermassive blackholes, she dedicated herself to education and communication of physics, which is her real passion. Currently she organizes open events for the public, teachers refresher courses, activities and laboratories for primary and secondary schools. She is also the coordinator of the Education and Public Outreach Group of the Department of Mathematics and Physics of Roma Tre University.