



## Researchers @Home

Percorso divulgativo che racconta i principali passaggi della fisica moderna, rivolto agli studenti degli ultimi anni delle Scuole Secondarie di Secondo Grado.

### Webinar: "Dai buchi neri alle onde gravitazionali: tutte le vittorie di Einstein", Dr. Danilo Domenici

Le nostre concezioni dello spazio, del tempo e della gravità, sono cambiate radicalmente quando Einstein formulò la Teoria della Relatività Generale, che è stata definita "la più bella di tutte le teorie" per la sua estrema eleganza concettuale e formale. Vedremo quali sono le basi della teoria e alcune delle sue più spettacolari previsioni, come i Buchi Neri e le Onde Gravitazionali, scoperte sperimentalmente solo 5 anni fa.

**Programma, slide e attestato:** <http://edu.inf.infn.it/researchers-home-2020/>

### Le risposte del relatore.

1) Ma questo esperimento è solo un'ipotesi, cioè la piccola luna non esiste?

No, non esiste.

2) Così si giunge alla formulazione della teoria del tutto?

La teoria del tutto è un nome immaginifico dato a un'ipotetica teoria fisica che riesce a spiegare tutti i fenomeni fisici. Nel webinar abbiamo parlato solo della teoria della relatività generale.

3) Ma la distanza può variare anche per elementi naturali che trattengono uno dei due fermo o lo rallenta  
Mi perdoni, non ho capito la domanda.

4) Se la gravità è una conseguenza e non è una forza, il gravitone può esistere lo stesso?

Se si riuscisse a dimostrare che le onde gravitazionali sono quantizzate, il gravitone potrebbe esistere. Ad oggi è molto improbabile.

5) Qualche parola in più sulla geometria e densità della formula di Einstein?

Provi a leggere questi approfondimenti: <https://www.asimmetrie.it/images/19/pdf/asimmetrie-19-07.pdf> e <http://scienzapertutti.infn.it/6-relativita-generale-le-equazioni-di-einstein>

6) Buongiorno scusi potrebbe precisare il significato e i valori dei pedici di T e G? Rappresentano le coordinate dello spazio-tempo. Ogni indice va da 1 a 4. Provi a leggere questi approfondimenti:

<https://www.asimmetrie.it/images/19/pdf/asimmetrie-19-07.pdf> e <http://scienzapertutti.infn.it/6-relativita-generale-le-equazioni-di-einstein>

7) Ci sono altri esperimenti che dimostrano che la luce curva?

Sì, c'è l'effetto lente gravitazionale. Provi a leggere questo approfondimento: <https://www.asimmetrie.it/images/4/pdf/articolo-01r-numero4.pdf>

8) Quindi anche la luce può entrare in orbita attorno a una massa?

Esattamente. Sull'orizzonte degli eventi la luce compie un'orbita circolare.

9) Quando la curvatura è troppa ci sono i buchi neri?

In un certo senso sì. I buchi neri si formano quando il raggio di un oggetto è minore del suo raggio di Schwarzschild e la curvatura dello spazio-tempo sull'orizzonte degli eventi diventa molto grande.

10) A causa della curvatura come fa un satellite o un pianeta a non cadere sul pianeta corrispondente/sole? La curvatura crea un'accelerazione verso il centro del buco. Se ci fosse solo quella la Luna cadrebbe sulla Terra. Ma aggiungendo una velocità tangenziale all'accelerazione centripeta si ottiene un moto circolare uniforme, quindi la Luna rimane su un'orbita circolare. Detto in altri termini: poiché la Luna possiede un momento angolare rispetto alla Terra, e il momento angolare deve conservarsi in un sistema isolato, non può acquisire componenti della velocità radiali all'orbita.

11) Possiamo affermare che la teoria di Newton sia un caso particolare del modello di Einstein? Sì. La teoria di Einstein si riduce alla teoria di Newton nel caso che le velocità degli oggetti siano molto più piccole della velocità della luce, e che le loro dimensioni siano molto più grandi del loro raggio di Schwarzschild.

12) Se lo spazio si curva perché, per esempio la luna, nella rappresentazione precedente non cade nel "buco" ma rimane sull'orlo del precipizio? La curvatura crea un'accelerazione verso il centro del "precipizio". Se ci fosse solo quella la Luna cadrebbe sulla Terra. Ma aggiungendo una velocità tangenziale all'accelerazione centripeta si ottiene un moto circolare uniforme, quindi la Luna rimane su un'orbita circolare. Detto in altri termini: poiché la Luna possiede un momento angolare rispetto alla Terra, e il momento angolare deve conservarsi in un sistema isolato, non può acquisire componenti della velocità radiali all'orbita.

13) Ma la luce curvando, e quindi percorrendo più spazio e meno tempo, non supera la velocità "massima"  $c$ ? No. La luce non compie più spazio. E' lo spazio che è curvo. La distanza tra l'equatore e il polo è 10000km su una superficie curva e rimarrebbe 10000km nel caso la superficie fosse piatta.

14) Perché nella relazione di Einstein non compare il tempo? E' solo nascosto dentro i tensori quadri-dimensionali. Gli indici greci vanno da 1 a 4. La componente 1 è il tempo.

15) Se la luna gira attorno alla terra perché lo spazio è curvo, il satellite, in futuro, non dovrebbe avvicinarsi alla terra? E' la forza cinetica che fa sì che la terra e il satellite non collidano? La curvatura crea un'accelerazione verso il centro della Terra. Se ci fosse solo quella la Luna cadrebbe sulla Terra. Ma aggiungendo una velocità tangenziale all'accelerazione centripeta si ottiene un moto circolare uniforme. E' questa velocità tangenziale che la fa rimanere su un'orbita circolare. Detto in altri termini: poiché la Luna possiede un momento angolare rispetto alla Terra e il momento angolare deve conservarsi in un sistema isolato, non può acquisire componenti della velocità radiali all'orbita.

16) Si potrebbe comprendere in che modo la legge di Newton è comunque compatibile con la relatività generale? Nel senso della proporzionalità con l'inverso del quadrato della distanza fra i due centri? La teoria di Einstein si riduce alla teoria di Newton nel caso che le velocità degli oggetti siano molto più piccole della velocità della luce, e che le loro dimensioni siano molto più grandi del loro raggio di Schwarzschild. Manipolando matematicamente l'equazione di campo di Einstein si può ridurre alla nota legge della gravitazione di Newton.

17) Perché corpi che vanno più o meno veloci vengono deviati di più o di meno, se la deviazione dipende dalla curvatura dello spazio? Oppure la velocità non c'entra con la deviazione? La velocità conta eccome. Se un corpo ha un momento angolare ( $\mathbf{r} \times m\mathbf{v}$ ) rispetto al centro di attrazione, questo deve conservarsi sempre. Quindi il moto finale dipende dalla composizione dell'accelerazione radiale causata dalla curvatura e dalla velocità posseduta dal corpo. Faccio un esempio facile: una pallina da golf entrerà nella buca solo se la velocità non è eccessiva.

18) La luce curva solo nel lo spazio tempo curvo?

No, curva anche quando cambia velocità, per esempio passando dall'acqua all'aria: è il fenomeno della rifrazione che fa apparire spezzato un cucchiaino immerso in un bicchiere d'acqua.

19) Possiamo dire che, secondo l'esperimento dell'ascensore, il nostro peso è proporzionale all'energia potenziale?

In condizioni statiche il nostro peso (mg) è proprio uguale al campo gravitazionale moltiplicato per la nostra massa. L'esperimento dell'ascensore ci dice che in caso di caduta libera però, il nostro peso (cioè ciò che misura una bilancia) è nullo. Einstein concluse che il campo gravitazionale in quel caso è annullato dal moto accelerato.

20) A causa della curvatura come fa un satellite o un pianeta a non cadere sul pianeta corrispondente/sole?

La curvatura crea un'accelerazione verso il centro della Terra. Se ci fosse solo quella la Luna cadrebbe sulla Terra. Ma aggiungendo una velocità tangenziale all'accelerazione centripeta si ottiene un moto circolare uniforme. E' questa velocità tangenziale che la fa rimanere su un'orbita circolare. Detto in altri termini: poiché la Luna possiede un momento angolare rispetto alla Terra, e il momento angolare deve conservarsi in un sistema isolato, non può acquisire componenti della velocità radiali all'orbita.

21) Anche le onde vengono influenzate dalla curvatura spaziale?

Certo. Se lo spazio-tempo è curvo, tutto viene influenzato da questa curvatura.

22) Come si spiega la dilatazione temporale prevista nella relatività ristretta in termini di geometria curva?

Sono due cose distinte. La dilatazione temporale della relatività ristretta dipende solo dalla velocità relativa degli osservatori. Ci sarebbe anche se lo spazio fosse piatto. Nel caso dello spazio curvo si aggiunge alla dilatazione temporale della relatività generale.

23) Potremmo parlare di deformazioni spazio-temporali per definire il campo gravitazionale?

E' esattamente quello di cui parla la relatività Generale.

24) Sapevo che la Luna si stesse allontanando invece dalla terra e in futuro non vedremo più eclissi totali?

Ha ragione. L'effetto di rallentamento della velocità orbitale dovuto alle polveri è inferiore a quello di accelerazione della velocità orbitale dovuto ad effetti mareali. Quindi la Luna si allontana.

25) Le onde gravitazionali possono essere viste come analoghe alle onde elettromagnetiche che possono essere prodotte dal moto di particelle cariche in accelerazione, tipo in orbite "circolari"?

Sì. La differenza è che le onde gravitazionali non vengono emesse da un oggetto a simmetria sferica. Serve un "momento d'inerzia di quadrupolo", come quello di due buchi neri coalescenti o di una supernova non sferica.

26) Una domanda forse sciocca: capisco che una massa incurva lo spazio-tempo ma perché gli oggetti dovrebbero "precipitare" negli avvallamenti così creati? Non essendoci la gravità: e allora? Grazie Perché gli oggetti vivono dentro lo spazio-tempo, e devono seguirlo. Così come la nave che galleggia sulla superficie dell'oceano compie una traiettoria curva, perché la superficie dell'oceano è curva.

27) Se il tempo è spazializzato, inteso ossia come una comune distanza, allora perché noi lo percepiamo in maniera diversa e più astratta? E perché abbiamo così tanta difficoltà a quantificarlo in termini.

Perché la velocità della luce è molto più grande delle velocità di cui abbiamo esperienza. Se fosse stata molto più piccola, probabilmente non avremmo inventato due unità di misura per il tempo e per lo spazio. Avremmo misurato tutto in secondi-luce. E il concetto di spazio-tempo ci sarebbe sembrato molto naturale.

28) E' possibile che il tempo si curvi così tanto da "chiudersi" a cerchio?

E' quello che succede sull'orizzonte degli eventi.

29) Nel caso la luce viaggiasse in presenza di materia oscura o fuori dall' universo conosciuto quale leggi entrano nel vigore?

La luce non interagisce con la materia oscura. L'universo è per definizione tutto ciò che esiste, quindi non ha molto senso parlare di "fuori dall'universo".

30) Ho sempre letto che la luna si sta allontanando di 3 - 4 cm all'anno....

Ha ragione. L'effetto di rallentamento della velocità orbitale dovuto alle polveri è inferiore a quello di accelerazione della velocità orbitale dovuto ad effetti mareali. Quindi la Luna si allontana.

31) Tutte le supernove diventano buchi neri?

No, possono diventare anche stelle di neutroni.

32) Se la curvatura spaziale dipende dalla densità di materia, e il tempo dipende dalla curvatura, allora dove non c'è materia il tempo come scorre?

E' la curvatura spazio-temporale a dipendere dalla densità di materia. Se la densità di materia è molto bassa, come nello spazio intergalattico, lo spazio-tempo è quasi piatto.

33) Ma dal buco nero può fuoriuscire qualcosa, oppure tutto quello che va all'interno rimane intrappolato?

Una volta superato l'orizzonte degli eventi nulla può tornare indietro.

34) Scusi, se il buco nero stellare nasce da una stella molto massiccia a fine vita, come nasce un buco nero al centro di una galassia, tipo un oggetto così lontano come un quasar?

I buchi neri all'interno delle galassie non sono oggetti collassati di densità infinita. Anzi, possono avere una densità anche minore di quella della Terra. Il fatto è che il raggio di Schwarzschild aumenta proporzionalmente alla massa, quindi se il raggio di un oggetto stellare raddoppia, il suo raggio di Schwarzschild diventa 8 volte più grande. E' evidente quindi che aumentando sempre più le dimensioni di un oggetto stellare prima o poi il suo raggio diventerà più piccolo del suo raggio di Schwarzschild e si trasformerà in un buco nero, indipendentemente dalla sua densità. Quindi i buchi neri al centro delle galassie sono "semplicemente" delle enormi stelle di massa milioni di volte la massa del Sole.

35) Cosa ha di speciale la supernova 1987A?

E' la prima SN dopo l'invenzione del telescopio.

E' l'unica SN visibile a occhio nudo degli ultimi 4 secoli.

E' la prima SN dopo la costruzione di rivelatori di onde gravitazionali (che però non hanno rivelato niente).

36) Come mai con le tecnologie moderne non si riesce ad avere una rappresentazione dello spazio-tempo?

Non è un problema di tecnologia, ma di esperienza. Il nostro cervello vive e conosce in uno spazio tridimensionale e non riesce a rappresentare uno spazio-tempo quadridimensionale. Ma per fortuna non ne abbiamo bisogno, perché c'è la matematica.

37) I buchi neri si muovono? A che velocità?

Si possono muovere esattamente come si muove una stella. La velocità dipende, come per le stelle, dalla loro posizione all'interno della galassia e rispetto alle stelle vicine.

38) C'è la possibilità che un buco nero acquisisca così tanta materia da dover esplodere, o comunque variare il suo stato in qualche modo?

Può darsi che i buchi neri esplodano, ma non lo sapremo mai, perché nessuna informazione può uscire dall'orizzonte degli eventi.

39) Com'è possibile teoricamente l'esistenza dei worm hole?

Teoricamente sì. Ma non ne è mai stato osservato alcuno.

40) Potrebbe l'intero nostro Universo essere all'interno di un buco nero?

Bella domanda. In un certo senso sì, visto che nulla può uscire da un buco nero e nulla può uscire dall'universo, poiché per definizione l'universo è tutto ciò che esiste, quindi non c'è alcun "fuori".

41) Se dall'interno del buco nero guardassimo l'universo lo vedremmo accelerato?

Dall'interno del BN non possiamo vedere fuori. Però basta stare vicino al BN, ma fuori dall'orizzonte degli eventi, per vedere l'universo accelerato.

42) Ma non hanno scattato una foto ad un buco nero? Com'è possibile se non emette luce?

La luce che si vede nella foto non viene da dentro il BN, ma dalla materia incandescente che vi cade dentro.

43) Come sono state osservate le onde gravitazionali?

Con gli interferometri laser. L'ho spiegato nel webinar.

44) Stephen Hawking ipotizzò l'esistenza dei wormhole... è una cosa possibile?

Non fu Hawking, ma Kip Thorne. Sì, sono possibili.

45) Visto che ciò che è all'interno dell'orizzonte degli eventi non può influire sul mondo esterno come può la massa della singolarità che è all'interno dell'orizzonte ad attrarre gli oggetti all'esterno?

La massa non attrae in realtà gli oggetti. Deforma lo spazio-tempo intorno e gli oggetti seguono lo spazio-tempo.

46) Se al centro di una galassia vi è un buco nero, la galassia in questione è destinata inesorabilmente ad essere inglobata dal suddetto buco nero?

No. Solo chi si avvicina troppo viene risucchiato dal buco nero. Gran parte della galassia continuerà a orbitargli intorno

47) Esiste qualche ipotesi su quale potrebbe essere lo stato di aggregazione della materia al di là dell'orizzonte degli eventi?

Al di là dell'orizzonte degli eventi la materia non può aggregarsi perché non c'è nessuna forza che possa contrastare la gravità.

48) Un wormhole sarebbe un ponte di Einstein-Rosen? In caso affermativo, questo significa che Einstein credeva che esistessero?

Sì, sono la stessa cosa. Einstein sapeva che fosse una soluzione possibile della sua equazione di campo. Non ha detto nulla se credesse o meno alla sua reale esistenza.

49) Il Buco bianco potrebbe assomigliare al Big Bang?

Sì, effettivamente hanno delle caratteristiche in comune, come il fatto che non è possibile guardarci dentro.

50) Albert Einstein era e rimase SCETTICO riguardo alla fisica quantistica e vero o no?

No. Einstein era scettico riguardo l'interpretazione della funzione d'onda come onda di probabilità, e credeva invece che ci fossero delle "variabili nascoste" che rendessero deterministica la teoria.

Dopo la sua morte molti esperimenti hanno dimostrato che Einstein aveva torto.

Per il resto egli stesso contribuì enormemente alla formulazione della meccanica quantistica.

51) In che modo i pendoli fanno sì che la strumentazione non sia sensibile ad eventuali movimenti del suolo? Sono come dei pendoli di Foucault?

Muovendo con una frequenza opportuna il punto di vincolo del pendolo, si attenuano le oscillazioni della massa sospesa. Questo principio è sfruttato dai super-attenuatori degli interferometri. Il pendolo di Foucault è invece un pendolo che mostra la rotazione del piano di oscillazione dovuta alla rotazione terrestre.

52) Con strumentazioni sempre più raffinate non si rischierebbe di andare a rivelare così tanti segnali che diventerebbe poi difficile classificarli e decodificarli?

Magari! Meglio avere troppi segnali e il problema di come selezionarli, che averne pochi. D'altronde gli esperimenti a LHC producono una quantità enorme di eventi, e abbiamo inventato dei filtri per selezionare quelli interessanti.

53) Esiste una sorta di attrito per le onde gravitazionali? Se sì, a cosa è dovuto?  
No, le OG si propagano sempre alla velocità della luce.

54) Cos'è esattamente una singolarità?  
E' un punto dello spazio-tempo di densità infinita.