

Sarà ancora la luce a sfidare la relatività

*Original*

Sarà ancora la luce a sfidare la relatività / Tartaglia, Angelo. - In: LE STELLE. - ISSN 1721-2782. - STAMPA. - 152(2016), pp. 1-7.

*Availability:*

This version is available at: 11583/2638392 since: 2016-03-29T18:52:00Z

*Publisher:*

Milano : Gruppo B -Roma: Astropress

*Published*

DOI:

*Terms of use:*

This article is made available under terms and conditions as specified in the corresponding bibliographic description in the repository

*Publisher copyright*

(Article begins on next page)

Occhiello:

FISICA

## Sarà ancora la luce

### a sfidare la relatività

*Ecco il progetto GINGER per verificare un effetto previsto dalla teoria pubblicata da Einstein nel 1916. Dopo due prototipi, si passerà all'esperimento reale nel Laboratorio del Gran Sasso entro il 2018. Ma i girolaser di ultima generazione dovranno diventare ancora 10 volte più precisi*

Angelo Tartaglia

Il 2015 è stato l'Anno internazionale della luce e il centenario della prima presentazione delle equazioni del campo gravitazionale secondo i principi della relatività generale (RG), teoria che Albert Einstein pubblicherà l'11 maggio 1916 negli "Annalen der Physik". Siamo quindi in periodo di tempo particolarmente appropriato per parlare di un esperimento che mira a verificare alcuni effetti della relatività generale utilizzando la luce stessa come sonda. Ma andiamo per ordine e cominciamo a richiamare l'essenza della teoria generale della relatività.

Con la relatività ristretta (o speciale) nel 1905 Einstein, assumendo la velocità della luce come un invariante universale o meglio come una grandezza che fornisce lo stesso valore a tutti gli osservatori inerziali che vogliono misurarla, a prescindere dal moto relativo dell'uno rispetto all'altro, detronizzò spazio e tempo dalle loro definizioni assolute e introdusse un nuovo *contenitore* per tutti i fenomeni fisici: lo *spazio-tempo*. Questa novità portò ad assimilare le leggi della meccanica dei corpi a proprietà geometriche di questo nuovo spazio-tempo a quattro dimensioni. La geometria in questione ricalca, con una dimensione in più, quella euclidea, salvo un non banale cambio di segno che esprime l'universalità della velocità della luce. Lo spazio-tempo, mettendo da parte aspetti tecnici e questioni concettuali, si presenta come una specie di foglio a quattro dimensioni sul quale sono 'disegnate' le vicende degli oggetti che si studiano; il 'foglio', come quello bidimensionale della geometria euclidea, è piatto.

La relatività generale si limita, si fa per dire, a considerare che un qualsiasi foglio (sia esso a due o a quattro dimensioni), non deve necessariamente essere piatto, ma può essere anche curvo, come (in due dimensioni) la superficie di una sfera, o di una sella o di una quantità di altri solidi. Questa possibilità geometrica si converte in un fatto fisico quando si individua l'origine concreta della possibile curvatura. Nel quarto dei suoi interventi del novembre 1915 all'Accademia delle scienze prussiana, Einstein indicò l'origine della curvatura spazio-temporale nella distribuzione di materia/energia nello stesso spazio-tempo.

Che c'entra con tutto questo la luce? Per rispondere a questa domanda dobbiamo porcene un'altra. Come facciamo a verificare che lo spazio-tempo è curvo standoci sopra (forse sarebbe meglio dire 'dentro')? In linea di principio potremmo verificare le caratteristiche geometriche di figure tracciate nelle quattro dimensioni, così come disegnando un triangolo sulla superficie di una sfera possiamo accorgerci della curvatura verificando che la somma degli angoli interni è maggiore di 180 gradi. Il fatto però è che tutte le nostre esperienze e le nostre misure inevitabilmente scompongono le quattro dimensioni spazio-temporali in 3+1 e lo fanno in un modo che dipende dallo stato di moto reciproco dei diversi osservatori, il che rende piuttosto complicato riconoscere le sottostanti proprietà geometriche della 'varietà' (questo è il termine tecnico utilizzato per indicare una 'superficie' in più di due dimensioni). La relatività generale però conosce qualcosa che è uguale per tutti gli osservatori in caduta libera (non sottoposti, cioè, ad alcun'altra forza che non sia la gravità) e questo qualcosa è la luce (più formalmente dovremmo dire: il cono di luce locale).

Un oggetto lasciato libero di cadere segue una traiettoria spazio-temporale che corrisponde al percorso 'più breve' tra il punto di partenza e quello di arrivo, tracciato all'interno della varietà. Una tale linea è detta *geodetica*. È vero anche per la luce, con in più il fatto che la sua velocità locale deve in ogni punto essere sempre uguale a  $c$  per qualunque osservatore: una tale traiettoria "oggettiva" (uguale per tutti gli osservatori) è chiamata *geodetica nulla*. Vengo al punto: l'insieme delle geodetiche nulle costituisce come l'ordito invariante del 'tessuto' spazio-temporale. I raggi di luce (i segnali elettromagnetici) percorrono lo spazio-tempo riproducendone la 'forma' in maniera oggettiva e uguale per tutti gli osservatori. Cavalcando i raggi di luce possiamo ricostruire la curvatura dovuta al campo gravitazionale.

Il modo in cui una data distribuzione di massa deforma lo spazio-tempo intorno a sé dipende dalla sua forma e dalle sue simmetrie. In concreto, una massa sferica incur-

va lo spazio-tempo circostante rispettando la simmetria sferica, che, per la verità, in quattro dimensioni è una simmetria cilindrica attorno all'asse dei tempi. Se la massa di riferimento è sferica, ma ruota uniformemente attorno ad un proprio asse, lo spazio-tempo acquisisce una simmetria più o meno elicoidale attorno all'asse dei tempi, in aggiunta a quella spaziale sferica. In quattro dimensioni è bene essere prudenti nell'usare termini che hanno un significato ben definito solo in tre, ma l'idea è che si instaura una differenza tra "destra" e "sinistra" individuate dal verso di rotazione della sorgente.

C'è un altro modo di vedere le cose, che è utilizzabile in un campo gravitazionale debole (cioè quasi sempre nell'universo, eccezion fatta per le vicinanze di buchi neri, stelle di neutroni e oggetti consimili). Un oggetto che stia cadendo verso una massa rotante è sottoposto a un'azione aggiuntiva rispetto alla tradizionale forza peso che agisce radialmente; compare anche un effetto che tende a trascinare l'oggetto trasversalmente nel senso di rotazione della massa centrale. Succede, insomma, qualcosa di simile a quel che capita alle cariche elettriche: quando la sorgente del campo elettrico si muove, esse sentono anche un campo magnetico che le spinge per traverso rispetto alla direzione del moto. In virtù di questa analogia si dice che una massa rotante, oltre al campo *gravito-elettrico* (quello abituale, a parte il nome), produce un campo *gravito-magnetico* che trascina gli osservatori in caduta libera come farebbe un turbine di vento.

In realtà, in ambito terrestre, l'effetto è debolissimo: come verificarne sperimentalmente la presenza? Finora, a parte degli indizi indiretti provenienti dall'osservazione di sistemi binari formati da stelle molto massicce, sono pochi gli esperimenti che abbiano cercato di misurare direttamente il trascinamento gravitomagnetico e si sono svolti, o sono in corso, tutti nello spazio. C'è stato Gravity Probe B (GP-B) della NASA e dell'università di Stanford, che ha misurato l'effetto con una accuratezza del 19%; c'è stato lo studio delle orbite dei satelliti LAGEOS I e LAGEOS II, che ha dato risultati accurati entro il 10%; infine sta raccogliendo dati il satellite LARES con l'obiettivo di arrivare a una precisione almeno dell'1%.

Vi è però una possibilità ulteriore, basata su una tecnica molto diversa e attuabile sulla terra, in un punto fisso, in cui il campo gravitazionale resta stabile, senza la necessità di medie su orbite di satelliti né di difficili modelli globali del campo gravitazionale terrestre. Mi riferisco alla luce, protagonista, in vario modo, del 2015 e del 2016.

Se immaginiamo di far fare a un fascio di luce un percorso spaziale chiuso, la relatività generale ci dice che il tempo di percorrenza per completare il giro dell'anello è diverso a seconda che sia nello stesso senso di rotazione della Terra oppure in senso opposto. In condizioni stazionarie e con fasci continui, la luce si adatta in modo tale da far sì che il tempo di percorrenza sia un multiplo intero del periodo della radiazione. Se i due tempi di volo "destro" e "sinistro" sono diversi, la condizione di stazionarietà farà sì che i due fasci adattino il proprio periodo, o, se vogliamo, la propria frequenza, in modo da garantire appunto lo stato stazionario.

Immaginiamo di aver fatto in modo che lungo lo stesso circuito viaggino due fasci emessi da una unica sorgente, ma che si propagano in versi opposti; in tal modo nell'anello saranno sovrapposte due radiazioni di frequenze leggermente diverse. È questa la tipica situazione in cui si produce il fenomeno dei *battimenti* (succede anche con le onde sonore), che fa sì che l'ampiezza del segnale complessivo venga modulata periodicamente con una *frequenza di battimento* pari alla metà della differenza tra le due frequenze sovrapposte. Nel nostro caso la frequenza del battimento è proporzionale all'intensità del campo gravitomagnetico che produce la differenza tra destra e sinistra.

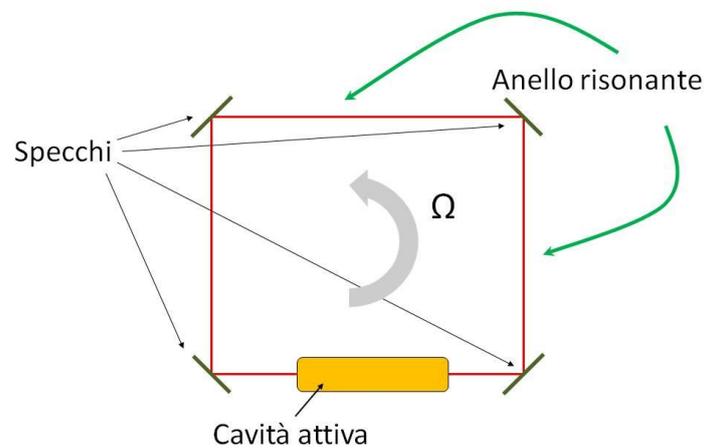


Fig. 1

Un laser ad anello quadrato è costituito da una cavità attiva e da una cavità risonante ottenuta mediante quattro specchi che deviano la luce facendole fare un percorso chiuso. Se l'intero dispositivo ruota i tempi di percorrenza nei due sensi risultano diversi l'uno dall'altro

Una complicazione sta nel fatto che una asimmetria tra i tempi di percorrenza viene prodotta anche dalla pura e semplice rotazione dell'apparato sperimentale: si tratta dell'effetto Sagnac, noto fin dal 1913 e schematizzato nel disegno. Banalmente, se l'apparato ruota, il raggio di luce che si muove nello stesso senso deve percorrere una lunghezza un po' maggiore del perimetro dell'anello per tornare al punto di partenza (che 'fugge' davanti alla luce), mentre, al contrario, nell'altro senso il percorso sarà un poco minore del perimetro (il 'traguardo' va incontro alla luce). Questo fenomeno è di notevole rilevanza pratica in quanto è possibile utilizzare anelli di luce come sensori di rotazione. Le sorgenti impiegate sono in generale dei laser e il percorso spaziale chiuso della luce può essere ottenuto o mediante fibre ottiche o mediante specchi opportunamente disposti. Oggi, sugli aerei di linea, dei laser ad anello vengono correntemente usati, al posto dei vecchi giroscopi meccanici, per misurare le diverse rotazioni del velivolo; di qui il nome di *girolaser*.

In un laboratorio terrestre entrambi gli effetti sono necessariamente presenti poiché il laboratorio ruota insieme con la Terra e il trascinamento dovuto al campo gravitomagnetico (anche detto effetto Lense-Thirring) è un miliardo di volte più debole dell'effetto Sagnac puramente rotazionale. Sono insomma necessari strumenti con una grandissima sensibilità, ma la tecnologia dei laser ad anello con il passare degli anni ha fatto passi da gigante. Il migliore strumento oggi esistente si trova a Wetzell, in Baviera; è un quadrato di 4 metri di lato e ha raggiunto una sensibilità migliore di 1 prad/s (picoradiante al secondo, cioè  $10^{-12}$  rad/s). Insomma G (questo il nome dell'anello) è in grado di 'sentire' rotazioni equivalenti a un giro in cinque milioni di anni! Ma per mettere alla prova la relatività generale occorre ancora migliorare la sensibilità di un ordine di grandezza. Da qui è nato il progetto dell'esperimento GINGER (Gyroscopes IN GEneral Relativity) in fase di sviluppo presso i laboratori dell'INFN a Pisa e al Gran Sasso.

L'idea è quella di costruire una struttura tridimensionale formata da tre "anelli" quadrati di almeno sei metri di lato, ortogonali l'uno all'altro, ad esempio secondo lo schema ottagonale della figura qui riprodotta. In questo modo si individuerà non solo una componente del campo gravitomagnetico, ma l'intero vettore in modulo, direzione e verso.

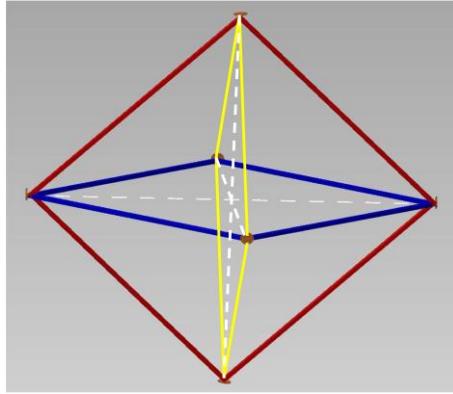


Fig. 2

Schema della struttura di GINGER con tre anelli di luce mutuamente ortogonali

Lo strumento sarà collocato presso i laboratori nazionali del Gran Sasso per schermare, grazie ai 1400 metri di roccia sovrastanti, buona parte degli innumerevoli disturbi rotazionali presenti in superficie (il laboratorio di Wettzell 'sente' la spinta del vento sulla collinetta artificiale sotto cui è collocato, il contenuto di umidità del terreno, e così via).

GINGER si basa su di una collaborazione, il cui Principal Investigator è Angela Di Virgilio dell'INFN di Pisa, che coinvolge gruppi di sei tra università e centri di ricerca italiani e vede come collaboratori esterni il gruppo della Technische Universität München che gestisce il laboratorio di Wettzell e un gruppo della Università di Canterbury a Christchurch in Nuova Zelanda.

Finora sono stati realizzati due anelli prototipo di dimensioni ridotte: GP2, collocato presso i laboratori dell'INFN a Pisa con lo scopo di verificare le tecniche di controllo della geometria dell'anello, e GINGERino (fotografia), ospitato dai laboratori del Gran Sasso, per determinare le caratteristiche e la dinamica rotazionale del sito.



Fig. 3

L'anello di GINGERino realizzato nei Laboratori Nazionali del Gran Sasso. Il quadrato percorso dalla luce ha un lato di circa quattro metri. La base, con i suoi quattro bracci a croce, è costruita in granito.

Se tutto va bene, GINGER vero e proprio dovrebbe essere completato e cominciare a raccogliere dati entro il 2018. Le rotazioni, a differenza dei moti traslazionali che sono sempre relativi, sono *assolute*. In un certo senso esse sono sempre definite rispetto alle "stelle fisse", e così è anche per tutto quanto è affine alle rotazioni, come appunto il campo gravitomagnetico terrestre. È affascinante l'idea che degli anelli di luce, in una profonda caverna possano "sentire" il cielo e darci informazioni fondamentali sulla struttura dello spazio tempo.

### **Angelo Tartaglia**

Fisico teorico e ingegnere, è *Senior professor* al Dipartimento di Scienza Applicata del Politecnico di Torino, membro dell'INFN e del Gruppo nazionale di fisica matematica; partecipa al progetto GINGER. Insegna Relatività alla Scuola di Dottorato in fisica del Politecnico. Si occupa di relatività generale e di cosmologia.