

REGIMI ESTREMI IN GRAVITÀ QUANTISTICA

Emmanuele Battista

Riassunto

Il presente articolo riassume brevemente il contenuto della mia tesi di dottorato, grazie alla quale ho avuto l'onore di risultare vincitore della IX edizione del premio "Vincenza Celluprica".

Vengono descritti i regimi di bassa e di alta energia della teoria quantistica della campo gravitazionale.

Nella prima parte, mediante l'approccio delle teorie efficaci della gravitazione, analizzo le correzioni quantistiche alle posizioni newtoniane dei punti lagrangiani del sistema Terra-Luna. La differenza rispetto ai valori classici è dell'ordine dei pochi millimetri, una discrepanza che potrebbe essere testata con l'ausilio delle moderne tecniche del laser ranging. Sul versante delle alte energie, viene studiata la curvatura di Riemann della geometria che si ottiene applicando la procedura del boost alla metrica di Schwarzschild-de Sitter. Lo spazio-tempo che ne risulta è caratterizzato da un lato dall'esistenza di una 3-sfera di singolarità e dall'altro dall'intervento di meccanismi anti-gravitazionali, innescati dalla presenza di un muro elastico che ho denominato boosted horizon.

Parole chiave: *Gravità Quantistica, Punti lagrangiani, Curvatura di Riemann.*

Abstract

In this article I briefly summarize the content of my PhD thesis, thanks to which I have had the privilege to be awarded the ninth edition of "Vincenza Celluprica" prize.

I analyze both the low-energy limit and the high-energy domain of quantum gravity.

In the first part, by employing the effective field theory approach, I find quantum corrections in the position of Newtonian Lagrangian points of the Earth-Moon system of the order of few millimeters. These tiny effects may be tested with the help of the modern laser ranging techniques.

The second part deals with the high-energy domain of quantum gravity, where I investigate the Riemannian curvature of the boosted Schwarzschild-de Sitter space-time. It turns out that this peculiar geometry is characterized both by the presence of a singularity 3-sphere and by the appearance of some antigravity effects, which are due to the occurrence of an elastic wall which I have called boosted horizon.

Keywords: *Quantum Gravity, Lagrangian Points, Riemann Curvature.*

Introduzione

Lo scopo di questo articolo consiste nel fornire un breve riassunto della mia tesi di dottorato. L'elaborato è intitolato "*Extreme Regimes in Quantum Gravity*" ed è stato difeso presso l'Università "*Federico II*" di Napoli il 29 Aprile 2016. Tale lavoro rappresenta il frutto di tre anni di intense e stimolanti ricerche culminate con la vittoria del premio indetto dall'ANPRI e intitolato alla memoria della dottoressa Vincenza Celluprica, il quale mi è stato conferito il 22 Maggio 2018 a Roma, presso la sede centrale del CNR.

La motivazione principale che ha ispirato la scelta del titolo del manoscritto è dovuta al fatto che in esso vengono affrontati i due regimi estremi della teoria quantistica della gravitazione, ovvero quelli inerenti i limiti di basse ed alte energie.

La necessità di formulare una corretta teoria quantistica del campo gravitazionale nasce dalla diffusa e ben nota consapevolezza da parte della comunità scientifica che le quattro interazioni fondamentali della natura (l'interazione elettromagnetica, l'inte-

razione nucleare debole, l'interazione nucleare forte ed appunto l'interazione gravitazionale) debbano necessariamente essere descritte a livello fondamentale invocando i principi della meccanica quantistica. Al contrario, la Relatività Generale di Einstein, nonostante rappresenti uno dei più affascinanti e intriganti modelli di campo gravitazionale della fisica teorica, è caratterizzata dal grosso "*limite*" di essere una teoria puramente classica. Ciò significa che essa fornisce eccellenti descrizioni (approssimate) dei processi fisici che avvengono a livello macroscopico, mentre su scale atomiche e sub-atomiche si configura come un modello totalmente inadeguato.

A titolo di esempio, si consideri il fenomeno della precessione del perielio dell'orbita di Mercurio, per il quale la teoria di Einstein prevede un *rate* di precessione pari ad 43 secondi d'arco ogni 100 anni, un valore meravigliosamente in accordo con le osservazioni astronomiche. D'altro canto, la Relatività Generale prevede la presenza di singolarità nella struttura dello spazio-tempo ogniqualvolta si è interessati allo studio dei meccanismi che regolano

il collasso gravitazionale e, più in generale, in ambito cosmologico, sbarrando in questo modo la strada verso una completa comprensione dello stato iniziale del nostro Universo.

Un altro importante motivo che spinge la comunità scientifica verso la ricerca di un corretto modello quantistico del campo gravitazionale va ricercato nell'ambito della fisica delle particelle elementari. In questo contesto infatti è ben noto il principio secondo cui la vera teoria fondamentale in grado di descrivere la natura in ogni suo aspetto debba prevedere una “grande unificazione” delle quattro interazioni fondamentali, circostanza che richiede inevitabilmente che i processi gravitazionali vadano compresi in chiave quantistica.

È dunque chiaro che uno degli straordinari problemi aperti che “affligge” la fisica teorica consiste nel ricercare la teoria che descriva correttamente le caratteristiche del campo gravitazionale in regime quantistico. Ad oggi infatti un siffatto modello (nella sua forma definitiva) che sia accettato dall'intera comunità scientifica non esiste. Al contrario, due teorie, denominate gravità quantistica a *loop* e teoria delle stringhe, si contendono lo scettro di teoria della *quantum gravity*.

Nonostante l'assenza di una teoria della *quantum gravity* universalmente riconosciuta, risulta comunque possibile descrivere correttamente alcuni aspetti quantistici del campo gravitazionale, purché si adotti un approccio che permette di separare gli eventi quantistici che avvengono alle scale di alte energie (o equivalentemente alle scale microscopiche) da quelli che caratterizzano il regime di basse energie (o analogamente le grandi scale di distanza). Tale approccio rappresenta il principio fondamentale su cui si basano le teorie efficaci del campo gravitazionale (*effective field theories*). Una *effective field theory* permette di analizzare correttamente una determinata classe di fenomeni quantistici che coinvolgono il campo gravitazionale, a patto che ci si limiti ad una descrizione che implichi soltanto le scale di basse energie. Tutte le previsioni ottenute mediante tale schema rappresentano una necessaria conseguenza dell'ancora sconosciuta teoria della *quantum gravity*.

Nella prima parte della mia tesi di dottorato, ovvero quella inerente il limite delle basse energie della teoria quantistica della gravitazione, ho applicato il modello delle *effective field theories* allo studio delle correzioni quantistiche della posizione dei punti lagrangiani del sistema Terra-Luna. Lo scostamento dai corrispondenti valori classici (ovvero quelli attesi dalla teoria di Newton) risulta essere dell'ordine dei pochi millimetri, ovvero un ordine di grandezza sorprendentemente elevato se confrontato con le tipiche

predizioni teoriche fornite dalla gravità quantistica a *loop* o dalla teoria delle stringhe, le quali prevedono generalmente effetti la cui osservazione va ben al di là delle possibilità delle nostre moderne tecnologie. Al contrario, il modello proposto nella prima parte della mia tesi di dottorato possiede una *chance* di essere testato con l'ausilio delle recenti tecniche del *satellite/lunar laser ranging*.

Come annunciato in precedenza, la seconda parte della tesi riguarda lo studio del limite di alte energie della *quantum gravity*. Viene infatti descritto il campo gravitazionale prodotto da una particella avente massa a riposo nulla ed in moto con una velocità pari a quella della luce nel vuoto ($c = 2.99792\,458 \times 10^8$ m/s). Questa peculiare configurazione geometrica comporta la produzione di un'onda gravitazionale di *shock*, ovvero un'onda avente un forte profilo impulsivo. Il metodo formale che consente di descrivere un siffatto spazio-tempo è noto in letteratura come *boost* di una metrica¹ spazio-temporale. Il *boost* è rappresentato da una particolare trasformazione di coordinate che consente di visualizzare la forma che assume la metrica dal punto di vista di un osservatore in moto rispetto ad un osservatore statico.

Nella mia tesi ho analizzato le caratteristiche dello spazio-tempo che si ottiene dopo aver applicato il *boost* alla metrica di Schwarzschild-de Sitter, una peculiare soluzione delle equazioni di Einstein che descrive un buco nero generalizzato. L'analisi della curvatura di Riemann di questa geometria ha evidenziato la presenza di una sorta di muro elastico, che ho denominato *boosted horizon*, dove una generica particella dotata di massa viene vista rimbalzare. Tale fenomeno suggerisce dunque la presenza di meccanismi anti-gravitazionali attorno al *boosted horizon*. Inoltre il mio studio ha anche portato alla luce la presenza di una 3-sfera, che circonda il *boosted horizon*, dove la curvatura dello spazio-tempo diventa infinita. Tale 3-sfera si configura dunque come una singolarità di questa particolare geometria che si ottiene dopo aver applicato il *boost* allo spazio-tempo di Schwarzschild-de Sitter (e che chiameremo spazio-tempo *boosted* di Schwarzschild-de Sitter).

Limite delle basse energie della quantum gravity: il sistema terra-luna

Nell'ambito delle *effective field theories* è possibile valutare le correzioni quantistiche dominanti al potenziale newtoniano. Con il termine “*dominante*” mi riferisco a quei termini che giocano un ruolo prioritario alle basse scale di energia.

Ricordiamo che il potenziale newtoniano classico

per il sistema composto da due corpi celesti aventi masse m_A e m_B è rappresentato da:

$$V_N(r) = -\frac{Gm_A m_B}{r},$$

dove $G = 6.67 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{Kg}^2$ indica la costante di gravitazione universale, mentre r la distanza tra le masse m_A e m_B . Il potenziale quantistico invece è dato da (fino all'ordine G^3)

$$V_Q(r) = -\frac{Gm_A m_B}{r} \left[1 + \left(\frac{k_1}{r} + \frac{k_2}{r^2} \right) + O(G^2) \right],$$

dove

$$k_1 \equiv \kappa_1 \frac{G(m_A + m_B)}{c^2}, \quad (1.1)$$

$$k_2 \equiv \kappa_2 \frac{G\hbar}{c^3} = \kappa_2 (l_p)^2, \quad (1.2)$$

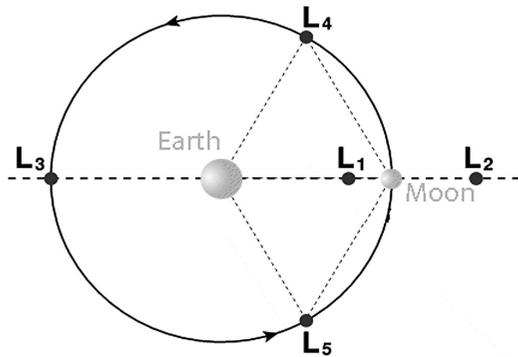


Fig. 1. Rappresentazione pittorica della posizione, così come prevista dalla teoria di Newton, dei punti lagrangiani nel sistema Terra-Luna.

mentre κ_1 e κ_2 rappresentano dei coefficienti numerici di cui esporrò i dettagli a breve. Le grandezze (1.1) e (1.2) rappresentano dunque le correzioni dominanti al potenziale classico $V_N(r)$. In particolare, l'equazione (1.1) è detta correzione post-newtoniana (per il suo essere proporzionale ad $1/c^2$), mentre la (1.2) esprime il vero effetto quantistico, essendo dipendente dal quadrato della lunghezza di Planck, il cui valore è fornito da:

$$l_p = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^3}} = 1.616252 \times 10^{-35} \text{ m}.$$

Tale grandezza fisica fissa infatti la scala di lunghezza alla quale il modello classico di Einstein del campo gravitazionale diventa inadatto. Le costanti numeriche che appaiono nelle (1.1) e (1.2) sono riportate nella seguente tabella (Tab. 1).

Risulta dunque evidente che esistono tre differenti set di valori che possono essere assunti da κ_1 e κ_2 .

κ_i	one-particle reducible	scattering	bound-states
κ_1	-1	3	$-\frac{1}{2}$
κ_2	$-\frac{167}{30\pi}$	$\frac{41}{10\pi}$	$\frac{41}{10\pi}$

Tab. 1. Valori delle costanti numeriche che appaiono nelle equazioni (1.1) e (1.2) per i tre tipi di potenziale.

Questa circostanza è dovuta al fatto che in regime quantistico non esiste una definizione univoca di potenziale e dunque, a seconda dello schema adottato, si possono ottenere *output* diversi per κ_1 e κ_2 , che conducono a loro volta a tre diversi tipi di potenziale, denominati in letteratura *one-particle reducible potential*, *scattering potential* ed *bound-states potential*.

Utilizzando la forma del potenziale $V_Q(r)$, ho studiato le correzioni quantistiche alla posizione dei punti lagrangiani nell'ambito del problema ristretto a tre corpi che coinvolge la Terra, la Luna ed un piccolo planetoido. Il problema ristretto a tre corpi fu analizzato per la prima volta da Jules Henri Poincaré (illustre matematico e fisico teorico francese) intorno al 1889. Tale configurazione è caratterizzata dalla presenza di tre masse soggette unicamente alla loro mutua interazione gravitazionale e prevede di ricavare la loro posizione ad ogni istante di tempo successivo ad un istante iniziale t_0 , una volta che le posizioni e le velocità dei corpi sono state assegnate al tempo iniziale $t = t_0$. In particolare, e ciò spiega il motivo della presenza dell'aggettivo "ristretto", i tre corpi celesti A , B , e C sono tali che A e B (detti primari) hanno una massa notevolmente superiore rispetto a quella del terzo corpo C , denominato per tal motivo planetoido. Inoltre, i primari A e B sono tali che $m_A \gg m_B$. Dunque il problema ristretto a tre corpi rappresenta un modello semplificativo rispetto al più generale (ed analiticamente privo di soluzione) problema a tre corpi completo, dato che nel primo sistema si suppone che il planetoido sia in moto nel campo gravitazionale noto ed imperturbabile dei due primari, ipotesi non applicabile invece nel secondo caso, dove le masse possono assumere valori del tutto generali. Per il problema ristretto a tre corpi la teoria di Newton prevede la presenza di cinque posizioni in cui il planetoido, sottoposto all'influenza gravitazionale dei primari, si trova in condizioni di equilibrio. Tali punti sono denominati punti lagrangiani L_1, L_2, L_3, L_4 e L_5 , in onore del famoso matematico italiano Joseph-Louis Lagrange (vedi Fig. 1). In particolare, i punti L_1, L_2 e L_3 giacciono sulla retta che congiunge i primari e sono perciò

denominati punti collineari. D'altro canto, i punti L_4 e L_5 definiscono con i primari due triangoli equilateri e per tal motivo sono indicati come punti triangolari (o non collineari). I punti collinari rappresentano posizioni di equilibrio instabile, mentre quelli triangolari corrispondono a punti di equilibrio stabile.

Nella mia tesi di dottorato ho analizzato, in regime quantistico, le caratteristiche del problema ristretto a tre corpi in cui il ruolo dei primari A e B è svolto rispettivamente dalla Terra ($m_A \equiv m_T = 5.972 \times 10^{24} \text{Kg}$) e dalla Luna ($m_B \equiv m_L = 7.348 \times 10^{22} \text{Kg}$), mentre quello del planetoido può essere assunto da un satellite artificiale. In primo luogo, ho mostrato che la *picture* classica in cui L_4 e L_5 definiscono, insieme ai primari, i vertici di due triangoli rettangoli, viene

L_i	One-particle reducible	Scattering	Bound-states
L_4	$r_Q - r_{cl} = -2.96 \text{ mm}$	$r_Q - r_{cl} = 8.87 \text{ mm}$	$r_Q - r_{cl} = -1.48 \text{ mm}$
	$x_Q - x_{cl} = -2.92 \text{ mm}$	$x_Q - x_{cl} = 8.76 \text{ mm}$	$x_Q - x_{cl} = -1.46 \text{ mm}$
	$y_Q - y_{cl} = -1.73 \text{ mm}$	$y_Q - y_{cl} = 5.18 \text{ mm}$	$y_Q - y_{cl} = -0.864 \text{ mm}$
L_5	$r_Q - r_{cl} = -2.96 \text{ mm}$	$r_Q - r_{cl} = 8.87 \text{ mm}$	$r_Q - r_{cl} = -1.48 \text{ mm}$
	$x_Q - x_{cl} = -2.92 \text{ mm}$	$x_Q - x_{cl} = 8.76 \text{ mm}$	$x_Q - x_{cl} = -1.46 \text{ mm}$
	$y_Q - y_{cl} = 1.73 \text{ mm}$	$y_Q - y_{cl} = -5.18 \text{ mm}$	$y_Q - y_{cl} = 0.864 \text{ mm}$

Tab. 2. Correzioni quantistiche alla posizione newtoniana dei punti lagrangiani non collineari del sistema Terra-Luna per i tre diversi tipi di potenziale. Le coordinate (x_{cl}, y_{cl}) e (x_Q, y_Q) si riferiscono rispettivamente all'ascissa e all'ordinata classica e quantistica di L_i in un sistema di riferimento cartesiano con origine nel centro di massa del sistema Terra-Luna. Le distanze indicate con r_{cl} e r_Q si riferiscono rispettivamente alle distanze classiche e quantistiche di L_i dalla Terra.

L_i	One-particle reducible	Scattering	Bound-states
L_1	$r_Q - r_{cl} = -1.23 \text{ mm}$	$r_Q - r_{cl} = 3.70 \text{ mm}$	$r_Q - r_{cl} = -0.617 \text{ mm}$
	$x_Q - x_{cl} = -1.23 \text{ mm}$	$x_Q - x_{cl} = 3.70 \text{ mm}$	$x_Q - x_{cl} = -0.617 \text{ mm}$
L_2	$r_Q - r_{cl} = -0.783 \text{ mm}$	$r_Q - r_{cl} = 2.35 \text{ mm}$	$r_Q - r_{cl} = -0.392 \text{ mm}$
	$x_Q - x_{cl} = -0.783 \text{ mm}$	$x_Q - x_{cl} = 2.35 \text{ mm}$	$x_Q - x_{cl} = -0.392 \text{ mm}$
L_3	$r_Q - r_{cl} = -2.96 \text{ mm}$	$r_Q - r_{cl} = 8.89 \text{ mm}$	$r_Q - r_{cl} = -1.48 \text{ mm}$
	$x_Q - x_{cl} = 2.96 \text{ mm}$	$x_Q - x_{cl} = -8.89 \text{ mm}$	$x_Q - x_{cl} = 1.48 \text{ mm}$

Tab. 3. Correzioni quantistiche alla posizione newtoniana dei punti lagrangiani collineari del sistema Terra-Luna per i tre diversi tipi di potenziale. Le coordinate x_{cl} e x_Q si riferiscono rispettivamente all'ascissa classica e quantistica di L_i in un sistema di riferimento cartesiano con origine nel centro di massa del sistema Terra-Luna. Le distanze indicate con r_{cl} e r_Q si riferiscono rispettivamente alle distanze classiche e quantistiche di L_i dalla Terra.

completamente distrutta in regime quantistico. Infatti, il modello analizzato prevede correzioni sulla posizione newtoniana di L_4 e L_5 di pochi millimetri, come si evince dalla Tab. 2.

Per quanto riguarda i punti lagrangiani collineari, le correzioni quantistiche sui corrispondenti valori classici si attestano nuovamente intorno all'ordine dei pochi millimetri, come mostrato in Tab. 3.

La grande innovazione introdotta da questo tipo di approccio alla *quantum gravity* consiste nel fatto che esso conduce, in un sistema "familiare" ed "accessibile" come quello Terra-Luna, a predizioni quantistiche che hanno la possibilità di essere testate con l'ausilio delle moderne tecnologie, a differenza di ciò che accade, ad esempio, nel caso della gravitazione quantistica a *loop* ed della teoria delle stringhe, le quali conducono a previsioni che, allo stato attuale, non sono verificabili sperimentalmente. Le correzioni riportate nelle Tab. 2 ed 3 hanno infatti la possibilità di essere misurate sfruttando le innovative tecniche del *satellite/lunar laser ranging* (Fig. 2). Tale metodo consiste nell'indirizzare un fascio laser verso un satellite artificiale (che gioca il ruolo di planetoido) preventivamente inviato in orbita in una zona di interesse.

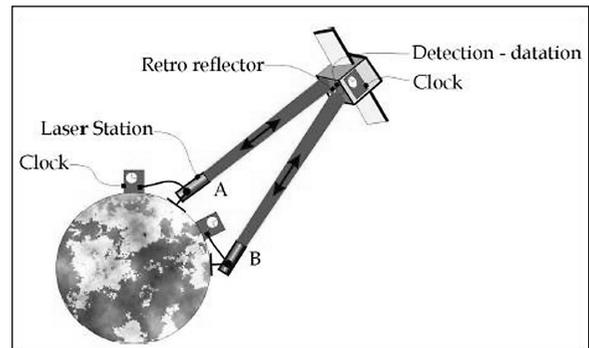


Fig. 2. Schema del set-up del satellite/lunar laser ranging.

Il satellite è munito di specchi retro-riflettenti atti a consentire la riflessione del raggio laser così che, misurando l'intervallo di tempo che esso impiega a ritornare sul punto della Terra da cui è stato lanciato, e nota la sua velocità (pari, con buona approssimazione, a c), si possono effettuare misure di distanza molto precise.

L'effettiva possibilità di poter testare le previsioni di questo modello rappresenta una sfida essenziale al fine di stabilire la sua reale validità.

Limite delle alte energie della quantum gravity: lo spazio-tempo *boosted* di Schwarzschild-De Sitter

La procedura del *boost* è utilizzata in fisica teorica per mappare soluzioni esatte delle equazioni di

Einstein in una classe di geometrie spazio-temporali caratterizzate dalla presenza di onde gravitazionali di *shock*, ovvero onde che coinvolgono scale di energie notevolmente elevate. Nonostante questo *modus operandi* rappresenti una tecnica puramente classica, esso comporta notevoli implicazioni a livello quantistico. Infatti tale metodo consente, ad esempio, di descrivere alcuni aspetti dell'effetto Hawking (ovvero della radiazione emessa da un buco nero) e di analizzare la radiazione emessa nell'incontro tra due buchi neri, uno spettacolare evento astronomico tornato di recente alla ribalta per l'aver rappresentato la sorgente delle onde gravitazionali osservate, per la prima volta nella storia in maniera diretta, il 14 Settembre 2015 negli Stati Uniti, presso l'osservatorio denominato LIGO, acronimo di *Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory*.

Il *boost* di una metrica spatio-temporale è una trasformazione di coordinate che consente di esprimere la metrica dal punto di vista di un osservatore in moto con velocità v rispetto ad un osservatore statico. Se si fa tendere, in maniera opportuna, la velocità v al valore assunto dalla velocità della luce nel vuoto c , la metrica così ottenuta corrisponde al campo gravitazionale generato da una particella avente massa a riposo nulla e in moto con velocità pari a quella della luce. Tale geometria è caratterizzata dalla presenza di onde gravitazionali di *shock*, che viaggiano e si propagano insieme alla particella.

Nella mia tesi ho applicato questo formalismo alla metrica di Schwarzschild-de Sitter e ho successivamente studiato le peculiarità della curvatura (di Riemann) dello spazio-tempo *boosted* di Schwarzschild-de Sitter.

La curvatura è un concetto geometrico che indica quanto la geometria in esame differisce da quella del mondo piatto, ovvero la geometria di Euclide se ci riferiamo ad un mondo in tre dimensioni o la geometria di Minkowski se consideriamo quattro dimensioni. In Relatività Generale la curvatura dello spazio-tempo (che rappresenta un ambiente quadridimensionale) è descritta in termini del tensore² di Riemann.

Tra le tante applicazioni che trova nella teoria di Einstein questo indispensabile oggetto, vale la pena citare la sua connessione con il V postulato di Euclide. Il tensore di Riemann infatti permette di ottenere una misura di quanto due rette, inizialmente parallele, falliscono poi nel mantenersi parallele durante il loro propagarsi all'interno di un campo gravitazionale.

Al fine di studiare la curvatura dello spazio-tempo *boosted* di Schwarzschild-de Sitter, ho analizzato il comportamento di un importante invariante di curvatura, denominato scalare di Kretschmann e definibile

come il quadrato del tensore di Riemann. Il grosso vantaggio di questa grandezza scalare consiste nel fatto che essa assume lo stesso valore in ogni sistema di riferimento e dunque specifica in maniera univoca le caratteristiche della geometria in esame. Per comprendere al meglio questo concetto, si consideri il nome proprio di una persona: questa informazione rappresenta un marchio indelebile per un soggetto che non cambia la propria essenza in nessun luogo o nazione della Terra. Lo scalare di Kretschmann rappresenta una sorta di nome proprio dello spazio-tempo *boosted* di Schwarzschild-de Sitter. L'analisi di tale invariante ha portato alla luce la presenza di una 3-sfera³ di singolarità dove la curvatura dello spazio-tempo raggiunge valori infiniti. Se indichiamo con $(i = 1, 2, 3, 4)$ le coordinate dello spazio-tempo *boosted* di Schwarzschild-de Sitter, l'equazione della 3-sfera di singolarità assume la forma

$$(Y_1)^2 + (Y_2)^2 + (Y_3)^2 + (Y_4)^2 = a^2$$

dove a rappresenta il raggio. Per poter visualizzare il comportamento dell'invariante di Kretschmann, abbiamo prodotto, limitatamente al piano Y_1 - Y_2 , un *countour plot*, ovvero un grafico dove le differenti tonalità di colore indicano i diversi valori assunti dallo scalare di Kretschmann (Fig. 3).

Inoltre, lo studio delle traiettorie assunte dalle particelle massive che si propagano all'interno dello spazio-tempo *boosted* di Schwarzschild-de Sitter ha evidenziato la presenza di un muro elastico, che circonda la 3-sfera di singolarità, che ho denominato *boosted horizon*, dove hanno origine una serie di interessanti effetti anti-gravitazionali. Infatti tutte le particelle che incontrano nel loro tragitto tale barriera rimbalzano

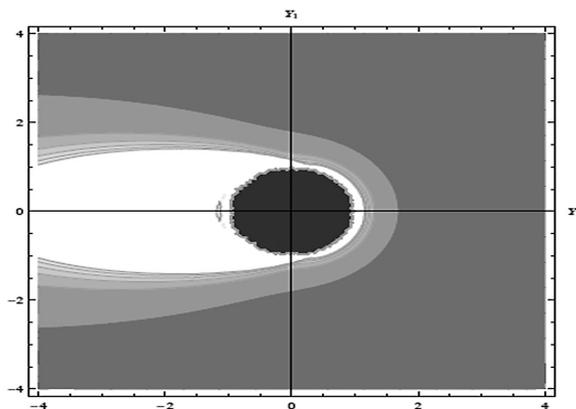


Fig. 3. *Countour plot* dello scalare di Kretschmann nel piano Y_1 - Y_2 . Il cerchio al centro della figura rappresenta ciò che diviene la 3-sfera di singolarità dopo aver posto uguale a zero le variabili Y_3 e Y_4 .

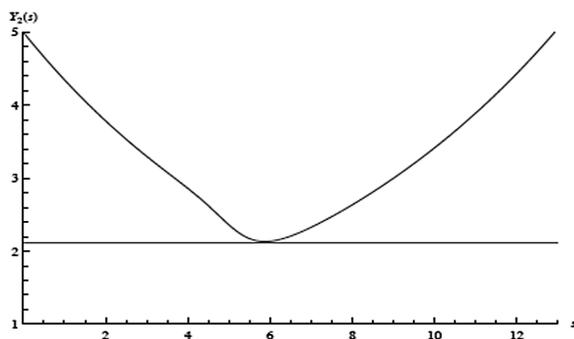


Fig. 4. Grafico della funzione $Y_2 = Y_2(s)$ (con s parametro reale) che descrive la traiettoria di una particella massiva in moto verso il *boosted horizon*, rappresentato dalla retta orizzontale.

per poi ritornare nel punto da cui erano partite, come mostrato in Fig. 4.

Il *boosted horizon* e la 3-sfera di singolarità rappresentano due intriganti aspetti che caratterizzano la curvatura di Riemann della geometria *boosted* di Schwarzschild-de Sitter.

Conclusioni

In questo articolo ho brevemente riassunto gli argomenti affrontati nella mia tesi di dottorato, elaborato grazie al quale sono risultato vincitore della IX edizione del premio “*Vincenza Celluprica*”.

Nella prima parte ho analizzato il limite di basse energie della *quantum gravity* mediante l’approccio delle *effective field theories*. È stato mostrato come tale modello fornisca correzioni quantistiche alle posizioni classiche dei punti lagrangiani del sistema Terra-Luna dell’ordine dei pochi millimetri (Tab. 2 e 3), aprendo la strada alla possibilità di effettuare test di verifica sperimentali mediante le innovative tecniche del *satellite/lunar laser ranging*. Questa circostanza rappresenterebbe una svolta rivoluzionaria nell’ambito delle teorie quantistiche della gravitazione, le quali si sono rivelate incapaci, ad oggi, di fornire predizioni teoriche effettivamente confermabili empiricamente.

Un progetto così ambizioso richiede, in primis, lo studio teorico di tutte le fonti di perturbazione del sistema Terra-Luna, come ad esempio l’influenza gravitazionale esercitata dal Sole e da Giove. Una siffatta

analisi è stata condotta nell’ambito del progetto scientifico denominato *NEWREFLECTIONS*.

Nella seconda parte ho affrontato il regime di alte energie della *quantum gravity*, introducendo il concetto di *boost* di una metrica, ovvero un metodo che consente di analizzare particolari geometrie spazio-temporali che coinvolgono la presenza di onde gravitazionali di *shock*. Tale tecnica è stata in seguito applicata alla soluzione delle equazioni di Einstein nota come metrica di Schwarzschild-de Sitter e la risultante geometria, denominata spazio-tempo *boosted* di Schwarzschild-de Sitter, è risultata essere caratterizzata da fenomeni anti-gravitazionali, come dimostra la presenza del *boosted horizon*, una sorta di muro elastico che avvolge la 3-sfera di singolarità in cui la curvatura di Riemann non è definita.

Bibliografia

Battista E. (2017). *Extreme Regimes in Quantum Gravity*, Nova Science Publishers, Hauppauge, New York. ISBN 978-1-53612-336-4.

Note

¹ La metrica dello spazio-tempo rappresenta lo strumento grazie al quale possiamo valutare la distanza spazio-temporale tra due qualsiasi punti (detti eventi). Tale entità può essere visualizzata come una sorta di righello, munito di un orologio, che consente di calcolare la distanza spaziale e temporale tra due punti dello spazio-tempo.

² Si definisce tensore una applicazione multilineare che associa ad un certo numero di vettori e covettori un quantità scalare. Si tratta in pratica di una generalizzazione dell’elementare concetto di funzione, introdotto tipicamente nei corsi di Analisi.

³ Una 3-sfera è la generalizzazione a quattro dimensioni della usuale sfera tridimensionale (detta anche 2-sfera).

EMMANUELE BATTISTA

Emmanuele Battista ha conseguito il titolo di dottore di Ricerca presso l’Università “Federico II” di Napoli il 29 Aprile 2016. Successivamente è divenuto titolare di un assegno di ricerca presso la sezione di Napoli dell’INFN. Attualmente collabora con alcuni ricercatori dell’International Space Science Institute (ISSI), sita a Berna (Svizzera). È autore di 11 pubblicazioni su riviste con referees ed di un libro intitolato “Extreme Regimes in Quantum Gravity”, che rappresenta una versione estesa della sua tesi di dottorato.

Contatti: emmanuelebattista@gmail.com