

Curriculum Vitae e Curriculum Scientifico

Angela D.V. Di Virgilio

La mia carriera scientifica ha visto una prima fase in cui ho partecipato a due grandi collaborazioni scientifiche, CDF e Virgo, seguita da una fase successiva in cui, combinando le mie esperienze precedenti, ho proposto in prima persona, introdotto in ambito INFN e coordinato, una linea di ricerca nuova, basata sull' utilizzo dei Ring Laser, volta a realizzare con esperimenti terrestri, tutta una serie di misure di fisica fondamentale, e di test di relatività in particolare, finora in principio possibili solo in ambito spaziale. I principali vantaggi degli esperimenti basati sulla Terra sono: (i) che forniscono risposte locali, non medie; (ii) possono essere ripetuti in luoghi diversi; (iii) non richiedono modelli perturbativi esterni, né mappe gravitazionali indipendenti; (iv) la sincronizzazione e la sintonizzazione sono più semplici degli analoghi esperimenti spaziali; e (v) infine, gli apparati possono essere periodicamente aggiornati per affinare le misurazioni. Per sommi capi, i Ring Laser sono misuratori inerziali di rotazione angolare, e permettono quindi di aggiungere il grado di libertà rotazionale al novero degli osservabili adatti all'investigazione per la fisica fondamentale; hanno anche una forte valenza interdisciplinare per il loro possibile utilizzo in contesti geofisici e sismologici.

Descrivo nel seguito in dettaglio tutte queste attività, in paragrafi separati: le citazioni – limitate ad alcuni lavori maggiormente significativi – si riferiscono all'elenco di pubblicazioni allegato (e sono in grassetto se si riferiscono ai lavori presentati per questa procedura); le note interne Virgo sono citate come A.

La partecipazione a CDF

Ho iniziato la mia carriera scientifica con CDF[293-297,299-304,306], CSN1, l'esperimento che nel 1995 ha scoperto il quark Top. In CDF ho partecipato alla costruzione e calibrazione dei calorimetri adronici centrali e delle end-walls[307,308], allo sviluppo del software on-line dell'esperimento oltre che allo studio preliminare dei calorimetri e del rivelatore in silicio a piccolo angolo [314-316], sviluppando programmi originali di simulazione. Per quanto agli inizi della carriera, ho dato un contributo originale mettendo a punto e analizzando i dati del test con i raggi cosmici dei calorimetri centrali [310], per valutare l'uniformità dei calorimetri. I calorimetri adronici hanno avuto un ruolo fondamentale nell'efficienza del trigger per selezionare eventi molto rari, e nello studio della fisica dei 'jets'. L'esperienza di CDF ha permesso di acquisire le tecniche base di simulazione e analisi, e di gestione diretta di apparati sperimentali complessi, come erano gli apparati di test dei calorimetri. Inoltre ho preso parte alla messa a punto del software online dell'esperimento, collaborando tra gli altri con [REDACTED], attuale Direttore di Fermilab.

Il contributo a Virgo

Ho lasciato nel 1986 CDF, e sono stata la prima collaboratrice di [REDACTED], con il quale ho partecipato a tutte le varie attività pionieristiche [n6,311,309] che hanno poi portato alla maturazione della tecnica interferometrica su larga scala per la rivelazione delle onde gravitazionali, dalla nascita di Virgo [291-292, 289] fino alla rivelazione delle onde gravitazionali [n5, 31-40-47,49-54,59-65,68]. A valle dell'intuizione fisica della necessità di allargare alle basse frequenze la banda utile per la rivelazione, il problema sperimentale fondamentale era quello dell'isolamento sismico[282-286,278-279]. In questo contesto ho partecipato a tutta la fase iniziale di realizzazione di sospensioni innovative per le masse di

test degli interferometri [311,309,305], nell' ambito dell' esperimento IRAS, da cui poi si è sviluppato VIRGO. Sono stata coinvolta nella progettazione, costruzione e test con sistemi ottici di alta precisione delle sospensioni di Virgo, firmando tutti gli articoli relativi fin dal 1987 [313,n6]. Tali sospensioni, generalmente note come i Super Attenuatori (SA), sono state (e sono tuttora) essenziali per permettere la rivelazione di segnali gravitazionali con frequenza inferiore a 100Hz. In generale mi sono occupata di progettazione, calibrazione e analisi di apparati opto-meccanici di altissima precisione, sviluppati per il test delle sospensioni stesse. Negli anni dal 1990 circa, presso la sezione di Pisa, ho creato un laboratorio di ottica specializzato per interferometria, acquisendo le conoscenze necessarie alla messa a punto di questa strumentazione e portando in questo ambito i metodi di analisi e simulazione acquisiti nell' esperienza di CDF[282-287,275]. Le prime misure dirette sui prototipi dei SA sono state fatte con un accelerometro realizzato artigianalmente dai tecnici della Sezione di Pisa, usando come trasduttore il sistema bobina /magnete di un altoparlante. Per i test abbiamo messo a punto diverse tecniche: ceramiche piezoelettriche usate come trasduttori, shadowmeters basati su led e fotodiodi (che facilmente riuscivano a misurare frazioni di nano metri), e che furono alla base del primo *damping* dei primi SA prototipo [304], e gli LVDT (Linear Voltage Differential Transducer), che successivamente sono stati usati sul pendolo invertito. Per acquisire la tecnica di misura interferometrica, ho realizzato un piccolo interferometro rigido da banco, che ha ottenuto un record di sensibilità alle basse frequenze[286]. Ho fatto la prima misura della distanza relativa tra i primi due SA prototipo, basati sulle molle a gas, realizzando un interferometro con un ramo rigido e l'altro definito dalla distanza tra le masse di test sospese, usando come sorgente un laser ad argon, stabilizzato in frequenza con una cavità di riferimento in invar [285,282]. Successivamente il laser ad argon è stato sostituito da un laser neodimio YAG, costruito per essere stabilizzato in frequenza e poco rumoroso. Dal 1994 al 2004 circa ho portato avanti diversi test sulle sospensioni di Virgo, come i test sul Filtro7 di cui sono stata responsabile [255, A20, A28].

Da questo background e' nata nel 1991 una collaborazione con [REDACTED] per il progetto di una sospensione adatta ad essere installata in un laboratorio spaziale (*picogravity box*) [289], per il quale ho ottenuto un brevetto per Invenzione Industriale insieme ad [REDACTED].

La Low Frequency Facility

Raggiunta una sufficiente confidenza nelle possibilità di realizzare un esperimento sensibile a onde gravitazionali di frequenza intorno a 100 Hz, si è naturalmente posto il problema di capire quanto fosse possibile estendere la misura verso frequenze significativamente più basse. Sicuramente proporre la rivelazione diretta a 10Hz, a quei tempi era considerato avveniristico, e si rendeva necessario investigare direttamente i rumori della sospensione quanto più possibile vicino a 10Hz. A questo scopo ho proposto e coordinato un esperimento dedicato, utilizzando il SA prototipo costruito nella sede INFN di Pisa. Questo esperimento, chiamato Low Frequency facility (LFF), mirava a misurare la densità spettrale di rumore termico a 10Hz. Sin dal suo nascere sono stata responsabile della LFF, in collaborazione con il gruppo Virgo-Roma1 e con un gruppo di ottici di Napoli ([REDACTED]). LFF non era una sigla separata da Virgo, ma aveva finanziamenti distinti. Il trasduttore di tipo ottico consisteva in una cavità Fabry-Perot di 1cm di lunghezza. Abbiamo modificato il meno possibile la sospensione prototipo, in modo da sostenere lo specchio tipo Virgo ed un secondo specchio più leggero [267,257,258]. L' esperimento è stato progettato minimizzando i cambiamenti rispetto ai SA di Virgo, adoperando quindi la marionetta e la massa di riferimento per contro-reagire lo specchio e portare la cavità Fabry-Perot a lavorare in risonanza, avere una risposta lineare degli spostamenti relativi, per ricostruire, in sostanza, il rumore a livello degli specchi. L' elettronica si basava sul primo prototipo dei DSP sviluppati per Virgo. Il banco di

iniezione era stato progettato e realizzato negli anni e consisteva nel Nd-YAG stabilizzato in frequenza, usando una cavità di riferimento in ULE, tenuta sotto vuoto. La tecnica di Pound-Drever-Hall era usata per interrogare la cavità sospesa. Questo apparato è servito a testare l'elettronica del DSP ed è stato il primo banco di test del controllo degli specchi sospesi usando marionetta e massa di riferimento. L'apparato sperimentale è stato completato e messo sottovuoto alla fine di luglio 2001. La sperimentazione è iniziata dopo pochi mesi, le prime misure del moto relativo sono del 2002, mentre le misure con la cavità sospesa controllata sono state fatte nel 2003. L'interpretazione dei dati ha richiesto lo sviluppo di modelli matematici. Lo studio della distanza relativa dei due specchi ha permesso di misurare direttamente la risonanza prodotta dell'accoppiamento opto-meccanico della luce con gli specchi del Fabry-Perot (optical spring, articolo **n9** nei 10 articoli più significativi) e ha dato delle stime dirette della densità spettrale di rumore ottenibile a 10Hz degli specchi sospesi dal SA. In tal modo già nel 2007 sono stata in grado di predire i limiti di rumore possibili in tale contesto (ad esempio, la mia stime a 20Hz ($10^{-18} \frac{m}{\sqrt{Hz}}$, vedi fig. 7 dell'articolo **n10** nei 10 articoli più significativi, e' del tutto compatibile con la densità spettrale di rumore di LIGO mostrata nella fig. 3 dell'articolo **n5** della lista: $2-3 \cdot 10^{-22} \frac{1}{\sqrt{Hz}}$, che equivale a $0.8-1.5 \cdot 10^{-18} \frac{m}{\sqrt{Hz}}$ considerando che Ligo ha bracci di 4km.

I giroscopi Laser, Ring Laser Gyroscope (RLG), le misure di relatività generale sulla Terra e la collaborazione interdisciplinare con la geofisica

Il mio interesse per i Ring Laser si è sviluppato negli anni a partire da alcune esigenze specifiche maturate nel contesto di Virgo e successivamente è diventata una attività scientifica indipendente che ho proposto, sviluppato e coordinato in prima persona. Nel 2007 all'interno di Virgo si è presentata la necessità di sviluppare sensori inerziali per misure di rotazioni intorno ad assi orizzontali (tilt). In generale i sensori inerziali potrebbero essere utilizzati per migliorare le sospensioni alle basse frequenze, per esempio creando stadi attivi tra gli elementi del SA vicini allo specchio usando RLG come sensore[A11], o per la cancellazione off-line del rumore newtoniano, che limita le antenne a bassa frequenza. Nel 2006 ho iniziato ad interessarmi dei ring-laser, sensori inerziali di rotazione basati sull'effetto Sagnac, aprendo una collaborazione informale con Ulrich Schreiber responsabile del GrossRing G della stazione geodetica di Wettzell, in Baviera; il GrossRing G e' stato per molto tempo il giroscopio terrestre più sensibile al mondo, raggiungendo una decina di anni fa la sensibilità di alcuni prad/s per misure di 1s. Nel 2006 ho iniziato una collaborazione con un gruppo dell'Università di Pisa, leader nella fisica dei laser, guidato da [REDACTED]. Nel 2007 ho presentato al Gruppo V la proposta G-Pisa, ed ho ottenuto un primo finanziamento con l'obiettivo di:

- acquisire la tecnica dei ring-laser di altissima precisione, per applicazioni per la ricerca delle onde gravitazionali.
- sviluppare i concetti fondamentali di un nuovo esperimento di fisica fondamentale basato sui ring-laser, in particolare per test di Relatività Generale.

La struttura del ring laser G di Wettzell è rigida, utilizza un grande monilite di zerodur a cui sono attaccati a contatto ottico gli specchi che definiscono la cavità ottica; in questo modo la cavità è insensibile alle variazioni di temperatura, ma ha un costo elevatissimo, ed è molto difficile creare un array con RLG orientamenti opportunamente. Noi abbiamo costruito e sviluppato prototipi così detti eterolitici, cioè composti da pezzi meccanici modulari e corredati di un controllo attivo per irrigidire la posizione relativa degli specchi. Il prototipo

G-Pisa è stato costruito nel 2007-2008; ed è stato il primo RLG eterolitico, con alta sensibilità (nano-rad/s) e con controllo attivo del perimetro, in grado di operare in modo continuo e automatico per mesi. G-Pisa è stato installato nella zona centrale dell'antenna Virgo, rimanendo operativo per circa un anno (2009-2010), dando modo di misurare direttamente il 'tilt' del terreno, che, durante le giornate con vento forte, limitavano le performances dell'antenna [A9].

Il fatto che questi giroscopi siano sensibili al gravito-magnetismo, altrimenti detto effetto Lense Thirring (LT), è un fatto ben noto[30]; per essere più precisi questi sono sensibili in generale alle non reciprocità che i fasci di luce incontrano in funzione della direzione di propagazione. La nostra idea originale è stata di mostrare che la misura è fattibile sulla base della sensibilità raggiunta, e che è possibile farlo con un array solidale alla crosta terrestre. Nel 2010 per questa idea abbiamo ottenuto la menzione d'onore dalla Gravity Research Foundation. Un esperimento basato a terra, oltre a costi ridotti e la possibilità di upgrade futuri dell'apparato stesso, offre la possibilità di fare misure locali in funzione della latitudine, non mediate, e l'interpretazione dei risultati non dipende dalla corretta modellizzazione del 'drag' esterno che perturba la traiettoria dei satelliti.

Nel 2010, abbiamo messo a punto il primo "Design Study", per misurare localmente l'effetto LT terrestre con 1% di precisione, articolo **n8** della lista. In seguito questa proposta è stata chiamata GINGER (Gyroscopes IN General Relativity). Il GrossRing G, costruito sulla superficie della terra, ha mostrato di essere limitato dalle variazioni atmosferiche, che inducono nell'apparato disturbi dell'ordine dei pico-rad/s, circa un fattore 100 maggiori del segnale atteso. Un laboratorio sotterraneo, lontano dagli agenti atmosferici e dall'alternarsi del giorno-notte è sicuramente la scelta giusta, e GINGER è stato quindi proposto al Laboratorio del Gran Sasso. Con questi accorgimenti, ci si può aspettare che GINGER possa anche fare misure di violazione dell'invarianza di Lorentz competitive con quelle fatte con osservazioni astrofisiche. D'altra parte, essendo solidale alla crosta terrestre, GINGER misura sia la velocità angolare terrestre che i segnali di interesse geofisico, ad esempio quelli provenienti da terremoti. Da qui nasce la grande interdisciplinarietà di GINGER, che ci ha portato a intrecciare relazioni scientifiche con geofisici e geodeti.

Sulla base del Design Study, nel 2012 è nato l'esperimento G-GranSasso, R&D di GINGER, sigla ancora attiva, di cui sono responsabile nazionale, e a cui partecipano Pisa, Napoli, Legnaro e Torino. Il Gruppo G-GranSasso è piccolo, ma ha portato avanti un lavoro molto ben articolato nell'arco di 10 anni. Sono stati messi a punto i vari aspetti sia sperimentali che teorici dell'apparato GINGER. Il problema del controllo della geometria [7,41,] è stato studiato e testato sul prototipo di Pisa (GP2), mettendo a punto strategie di aggancio nuove, basate sul controllo delle diagonali e acquisendo le tecniche metrologiche per la misura accurata delle lunghezze, importante per lo studio del fattore di scala geometrico. Tutti i test proposti per GINGER puntano a fare misure molto lunghe e investigare frequenze ultrabasse, che sono poco conosciute. Per misurare direttamente in situ il livello di disturbi sismici, di tipo rotazionale, abbiamo installato i nostri prototipi a LNGS. Nel 2013 abbiamo installato il prototipo G-Pisa, fornendo le prime stime del rumore rotazionale locale alle frequenze molto basse. G-Pisa ha mostrato sensibilità al di sotto del nrad/s, ma era appoggiato al terreno, di conseguenza molto disturbato dalle operazioni fatte nella Hall. Successivamente abbiamo costruito GINGERINO, un prototipo orizzontale, con lato 3.6m, tra i Nodi A e B di LNGS, una zona particolarmente silenziosa. GINGERINO è stato costruito nel 2014, e ha prodotto i

primi dati nel 2015, mostrando da subito la sensibilità di decine di pico-rad/s.

In generale la combinazione dei vari segnali dell'array richiede il monitoraggio degli angoli relativi tra i vari RLG con accuratezze elevate, dell'ordine di pico-radiani, problema sperimentale molto difficile[48]. Nel 2017 abbiamo dimostrando che è possibile risolvere questo problema orientando uno dei RLG dell'array in modo da misurare il modulo della rotazione, articolo **n7**, cioè al massimo segnale di Sagnac (chiamato RLX). Soluzione non solo ottimale da un punto di vista scientifico, ma anche economica. Il limite della misura risiede nella precisione con cui RLX è allineato con l'asse di rotazione, ma le specifiche sono al second'ordine, e si tratta di frazioni di micro-radiani. In aggiunta RLX misura il modulo della velocità angolare terrestre.

Un altro punto estremamente importante riguarda l'analisi dati, o meglio la ricostruzione del segnale di Sagnac, legato alle non reciprocità tra i due modi contro-propaganti. E' un fatto ben noto che la risposta dei RLG è disturbata dalla dinamica non lineare del laser, fatto molto grave, che ha limitato la loro diffusione. I disturbi più comuni sono detti *backscatter* e *null shift*. Nel 2011 abbiamo affrontato per la prima volta questo problema usando la dinamica del laser per sviluppare un filtro Kalman per ridurre il *backscatter*. Dal 2016 GINGERINO ha iniziato a produrre una gran quantità di dati, e abbiamo messo a punto tutta una serie di procedure originali per poter gestire e analizzare i dati[12,28], che in generale mostrano delle discontinuità dovute al fatto che GINGERINO è *free running*, cioè la geometria non è controllata, e presenta salti di modo o *'split modes'*, condizioni in cui il dato non è fruibile per tempi che variano dalla frazione di secondo alle ore. Lo studio dei disturbi ha mostrato da subito che non erano riconducibili alle variazioni ambientali, ma piuttosto legati alla dinamica non lineari dal laser. Abbiamo ripreso le equazioni del laser, e da esse facendo l'assunzione che alle alte frequenze si possono considerare fissi i parametri alla base della dinamica del laser (parametri di Lamb), abbiamo individuato delle relazioni lineari per identificare i disturbi. Su questa base abbiamo sviluppato un metodo originale per ricostruire il vero segnale di Sagnac, articoli **n1**, **n3** e **n4** della lista di 10. Successivamente questa tecnica è stata applicata ai dati di GINGERINO, usando i dati forniti dal sistema internazionale IERS come modello per interpretare i dati, riuscendo a evidenziare dai dati l'effetto del polar motion, **n2**. GINGERINO è il primo giroscopio eterolitico in grado di osservare questi effetti. Siamo stati i primi ad applicare metodi statistici all'analisi dei RLG, strumento di analisi molto importante per investigare il sistema, perché si tratta di strumenti sensibili ai noti segnali globali della terra, misurati indipendentemente e con enorme accuratezza dal sistema internazionale IERS. In questo stadio iniziale hanno la funzione di *'test beam'*, e successivamente saranno necessari per meglio identificare le varie componenti di non reciprocità presenti nel segnale. E' evidente che la maturazione di queste tecniche di misura potrà, nell'arco di alcuni anni, permettere la realizzazione di strumenti di misura locali, di ingombro e costo limitato, in grado di avere la stessa accuratezza di quella ottenuta da IERS, che deve analizzare e correlare i dati provenienti da parecchie decine di radiotelescopi.

Il lavoro preliminare di G-GranSasso si è concluso e sono stata invitata dal Presidente della CSN2 a presentare il Technical Design Report di GINGER. A questa proposta oltre al nucleo originario di G-GranSasso, si sono aggiunti un gruppo INFN di Napoli e Salerno con competenze teoriche, un gruppo INGV, e uno di ingegneria dell'Università dell'Aquila. La misura dell'effetto LT al livello di accuratezza dello 0.1% dovrebbe essere raggiunta nell'arco di 5 anni.