

# Curriculum Vitae di Alessio Rocchi

## Dati personali

- Nazionalità: Italiana
- Data di nascita: 11/06/1971
- Luogo di nascita: Roma
- Residenza: Roma
- Professione: Primo Ricercatore a tempo indeterminato dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN), II livello professionale, presso la Sezione di Roma Tor Vergata
- E-mail: [alessio.rocchi@roma2.infn.it](mailto:alessio.rocchi@roma2.infn.it)
- Web: [people.roma2.infn.it/~rocchi/](http://people.roma2.infn.it/~rocchi/)

Fisico sperimentale, è autore e co-autore di oltre 200 articoli scientifici, h-index 60 ([WOS](#)).

Ha svolto la sua attività scientifica, oltre che in Italia (Laboratori Nazionali di Frascati, European Gravitational Observatory), nei seguenti istituti di ricerca esteri:

- CERN (Ginevra, Svizzera);
- California Institute of Technology (Pasadena, USA);
- Leiden University (Leida, Olanda).
- Adelaide University (Adelaide, Australia)

## Riconoscimenti

- Nel 2018 consegue l'abilitazione scientifica nazionale a professore di I fascia ai sensi dell'art. 16 della legge n. 240 del 2010 per il settore concorsuale 02/A1 ricompreso nel macrosettore 02/A - Fisica delle interazioni fondamentali.
- Nel 2017 è tra i vincitori della *Albert Einstein Medal* - Albert Einstein Society, <https://www.einstein-bern.ch/en/einstein-society>;
- Nel 2016 è tra i vincitori del *Gruber Cosmology Prize* - The Gruber Foundation – USA, <http://gruber.yale.edu/prize/2016-gruber-cosmology-prize>;
- Nel 2016 è tra i vincitori del *2016 Special Breakthrough Prize in Fundamental Physics*, "For the observation of gravitational waves, opening new horizons in astronomy and physics." <https://breakthroughprize.org/News/32> .
- Nel 2013 consegue l'abilitazione scientifica nazionale a professore di II fascia ai sensi dell'art. 16 della legge n. 240 del 2010 per il settore concorsuale 02/A1 ricompreso nel macrosettore 02/A - Fisica delle interazioni fondamentali.

## Posizioni Professionali e Formazione

- Primo Ricercatore INFN con contratto a tempo indeterminato II livello professionale, in servizio presso la Sezione INFN di Roma Tor Vergata.
- Dal 2013 al 2019, Ricercatore INFN con contratto a tempo indeterminato III livello professionale, in servizio presso la Sezione INFN di Roma Tor Vergata.
- Da febbraio 2008 al 2013, Tecnologo INFN con contratto a tempo indeterminato III livello professionale, in servizio presso la Sezione INFN di Roma Tor Vergata.  
Vincitore nel 2006 del concorso pubblico, bando n. 10608/2004, per un contratto a tempo indeterminato, con presa di servizio il 5 febbraio 2008 (attività di progettazione, realizzazione e gestione di strumentazione elettronica per apparati di rivelazione in fisica nucleare, subnucleare e delle astroparticelle).

- Dal dicembre 2005 a febbraio 2008, dipendente dell'INFN presso la Sezione di Roma Tor Vergata con contratto a tempo determinato ai sensi dell'Art. 23, con inquadramento nel profilo di Ricercatore di III livello professionale.
- Da novembre 2003 a novembre 2005, è titolare di un Assegno di Ricerca presso il Dipartimento di Fisica dell'Università degli Studi di Roma "Tor Vergata" per attività di ricerca, settore disciplinare FIS/05 e programma di ricerca "Rivelazione di segnali monocromatici nei dati dell'antenna Nautilus".
- Nel marzo 2004 consegue il titolo di Dottore di Ricerca in Fisica, presso l'Università degli Studi di Roma "Tor Vergata", discutendo la tesi sperimentale, svolta ai Laboratori Nazionali di Frascati (INFN) nell'ambito della Collaborazione ROG, dal titolo "*Ottimizzazione del rumore elettronico per antenne gravitazionali di nuova generazione*", supervisore Prof. E. Coccia.

## **Incarichi di coordinamento e responsabilità**

- Nell'ambito della Collaborazione Virgo:
  - Dal 2019, **Co-Chair** del **LIGO-Virgo-KAGRA Joint Run Planning Committee**, è il comitato, composto di sette membri (2 Virgo, 3 LIGO e 2 KAGRA), con l'incarico di (estratto dal Memorandum of Understanding LIGO-Virgo):
    - *Strategic planning of detector upgrades, engineering runs, maintenance intervals, and observations;*
    - *Prioritization and coordination of coincidence operation and of complementary coverage as appropriate;*
    - *Coordination of both coincident and individual-detector observing with current external (non-gravitational wave) observations to optimize scientific opportunity.*
  - Dal 2017 al 2019, **Commissioning Coordinator** di Advanced Virgo dal Febbraio 2017, responsabile delle attività di messa a punto del rivelatore in preparazione ai run scientifici, con l'incarico di:
    - Coordinare le attività degli 11 sottosistemi del team di commissioning e nominarne i coordinatori;
    - Definire il programma delle attività sul rivelatore e assegnare i turni;
    - Definire il piano di installazione di nuovi componenti o aggiornamenti;
    - Definire, durante i run scientifici, il programma delle attività nelle interruzioni di commissioning;
    - Suggestire, in base ai risultati delle attività di commissioning, nuovi sviluppi, modifiche o aggiornamenti del rivelatore;
    - Organizzare i meeting di commissioning su base settimanale;
    - Organizzare la sessione di commissioning ai meeting di collaborazione;
    - Assegnare ai membri della collaborazione l'incarico di "Weekly Coordinator";
    - Definire le date dei Virgo Commissioning Run;
  - Dal 2017 al 2019, **Science Run Coordinator** di Advanced Virgo dal Febbraio 2017, incarico di coordinamento delle attività sul sito di Virgo durante i run scientifici e di collegamento con i siti di LIGO;
  - Membro del **LIGO-Virgo Rapid Response Team**, il comitato ristretto che, in occasione dei trigger di segnali gravitazionali, si riunisce per la validazione dell'evento e invia l'allerta ai partner per il follow-up elettromagnetico;
  - Membro del **Virgo Steering Committee**, l'organo decisionale della Collaborazione Virgo;
  - Convener della sessione "Instrument Science" ai meeting di collaborazione LIGO-Virgo;
  - Membro del **Internal Project Review Board**, comitato di revisione dei sistemi del progetto Advanced Virgo (Injection, Detection e Vacuum);
  - Membro del gruppo di scrittura de "Einstein Telescope Conceptual Design Document" (<https://tds.ego-gw.it/ql/?c=7954>);

- Dal 2007 al 2012, nell'ambito del rivelatore interferometrico Virgo, è responsabile del **Sistema di Compensazione Termica (TCS)** per la correzione delle aberrazioni ottiche nell'interferometro.
- Nell'ambito della Collaborazione LSPE:
  - Membro dell'**LSPE Advisory Committee**;
  - **Responsabile** dei lavori di preparazione del sito presso l'Osservatorio del Teide (Tenerife, Spagna), per l'installazione dello strumento STRIP.
- Incarichi istituzionali INFN:
  - Per il periodo dal 8 novembre 2019 al 7 novembre 2021, è nominato, con disposizione del Presidente n. 21438 del 26 settembre 2019, **membro sostituto** della commissione esaminatrice che giudica sui bandi per assegni di ricerca da conferirsi presso la Sezione di Roma Tor Vergata;
  - Dal 2015 è **responsabile locale** per l'esperimento "Large Scale Polarization Explorer" (LSPE), finanziato dalla Commissione Scientifica Nazionale II;
  - Dal 2014 al 2016 è **responsabile locale** per l'esperimento AdCOAT, finanziato dalla Commissione Scientifica Nazionale V;
  - Dal 2009, è Responsabile Unico del Procedimento per le sigle: Virgo, Ego Virgo\_adv, AdCOAT e LSPE.
- Altri incarichi:
  - Dal 2016 è **responsabile** del Work-package 2.2 ("Thermal aberrations and parametric instabilities") nell'ambito del Progetto Premiale "FIGARO: Fostering Italian Leadership in the Field of Gravitational Wave Astrophysics", finanziato dal MIUR;
  - Membro dell'albo dei revisori per la valutazione dei prodotti di ricerca nell'ambito della VQR 2011-2014;
  - Membro dell'albo dei revisori per la valutazione dei programmi e dei prodotti di ricerca ministeriale (progetti FIRB, PRIN);
  - Dal 2008 al 2012, **responsabile** dell'attività di ricerca e sviluppo sul sistema di correzione delle aberrazioni ottiche nel rivelatore interferometrico per onde gravitazionali Advanced Virgo, finanziata dallo European Gravitational Observatory per un importo di 112 k€ (Grant n. EGO-DIR-95-2008);
  - Membro del Local Organizing Committee della Scuola di Fisica "Looking for a Needle in a Haystack (how to extract a gravitational wave signal from detector data)", Villa Mondragone (Monte Porzio Catone, Roma) Settembre 7-10, 2004, organizzata dalla SIGRAV;
  - Dal 2009 è **referee** per le seguenti riviste internazionali:
    - Optics Express, edita da Optical Society of America;
    - Classical and Quantum Gravity, edita da Institute Of Physics (IOP);
    - Journal of Instrumentation, edita da Institute Of Physics (IOP) e SISSA;
  - **Responsabile** dei fondi e del progetto dal titolo "Sistema di readout e acquisizione dati per antenne gravitazionali sferiche", finanziato nell'ambito del "Progetto Giovani Ricercatori", Bando 2001, Dipartimento di Fisica dell'Università degli Studi di Roma "Tor Vergata".

### **Partecipazione a progetti di ricerca nazionali e internazionali**

- Membro della collaborazione ROG (Ricerca di Onde Gravitazionali), tramite gli esperimenti NAUTILUS (presso i Laboratori Nazionali di Frascati dell'INFN) e EXPLORER (presso il CERN);
- Membro della collaborazione RAP (Rivelazione Acustica di Particelle), presso i Laboratori Nazionali di Frascati dell'INFN;
- Membro della collaborazione internazionale MINIGRAIL, esperimento di ricerca di onde gravitazionali tramite rivelatori risonanti sferici (Leida, Olanda);

- Membro della collaborazione internazionale Virgo, presso lo European Gravitational Observatory (Cascina, Pisa);
- Membro della collaborazione internazionale LSPE (Large Scale Polarization Explorer), esperimento volto alla misura dello stato di polarizzazione della CMB;
- Progetto “Einstein Telescope Design Study”, finanziato dalla Comunità Europea dell’ambito del Framework Programme 7 (FP7, grant agreement 211743);
- Progetto PRIN 2004 “Sviluppo di antenne gravitazionali criogeniche di elevata sensibilità”;
- Progetto PRIN 2007 “Studio di problematiche sperimentali degli interferometri per onde gravitazionali criogenici e sotterranei”;
- Progetto PRIN 2011 “Sviluppo di interferometri ottici ultra low-loss in regime ponderomotivo per la riduzione del rumore quantistico in rivelatori di onde gravitazionali e rivelazione ultrasensibile di piccole forze in sistemi micromeccanici.”;
- Progetto PRIN 2015 “Interferometro atomico avanzato per esperimenti su gravità e fisica quantistica e applicazioni alla geofisica”.

### **Attività di divulgazione scientifica**

- Dal 2011, partecipa in qualità di tutor al programma INSPYRE (INternational School on modern PhYsics and REsearch), rivolto agli studenti di scuola media superiore italiani e stranieri, organizzato presso i Laboratori Nazionali di Frascati;
- Dal 2003, partecipa in qualità di tutor al programma “Incontri di Fisica”, indirizzato ad insegnanti di scuola media superiore, organizzato presso i Laboratori Nazionali di Frascati;
- Seminario divulgativo presso l’Associazione Astrofili “Antares” di Legnano (MI);
- Seminario divulgativo presso l’I.I.S. Felice Bisazza di Messina, nell’ambito della manifestazione “Settimana della Scienza”;
- Ha tenuto conferenze divulgative in diverse scuole medie superiori.

### **Relazioni a Conferenze**

- **2018:** “Rivelatori gravitazionali: presente e futuro prossimo” **invited talk** al LXII Congresso della Società Astronomica Italiana, Teramo;
- **2017:** “Advanced Virgo commissioning status” **invited talk** al Gravitational-Wave Advanced Detectors Workshop, Hamilton Island Queensland (Australia);
- **2017:** “Lessons learned from AdV TCS and TCS in AdV+ and ET” **invited talk** al Gravitational-Wave Advanced Detectors Workshop, Hamilton Island Queensland (Australia);
- **2016:** “Results from the first science run of advanced GW detectors” **invited talk** ai 51<sup>st</sup> Rencontres di Moriond, La Thuile (Italia);
- **2015:** “Adaptive optical systems for next generation interferometric detectors”, **invited talk** al Topics in Astroparticle and Underground Physics, Torino (Italia);
- **2015:** “Techniques for thermal compensation of wavefront distortions in high power interferometers”, **invited talk** al Workshop on the Next Detectors for Gravitational Wave Astronomy, Pechino (Repubblica Popolare Cinese);
- **2012:** “Thermal effects and other wave-front aberrations in recycling cavities”, **invited lecture** alla VESF (Virgo-EGO Scientific Forum) School on “Advanced Detectors of Gravitational Waves”, Cascina (Pisa, Italia);
- **2012:** “Correction of wave-front aberrations in Advanced Virgo recycling cavities” al 13<sup>th</sup> Marcell Grossman Meeting on General Relativity, Stoccolma (Svezia);
- **2011:** “Control of thermal effects in future GW interferometers” alla 9<sup>th</sup> Edoardo Amaldi Conference on Gravitational Waves, Cardiff (Gran Bretagna);
- **2011:** “Thermal effects and their compensation in Advanced Virgo” ai 46<sup>th</sup> Rencontres di Moriond, La Thuile (Italia);

- **2010:** “Compensation of thermal effects in future detectors” al Gravitational-Wave Advanced Detectors Workshop, Kyoto (Giappone);
- **2009:** “Plans for IliasNext” al 2<sup>nd</sup> Einstein Telescope Annual Workshop, Erice (Italia);
- **2009:** “Virgo+ Thermal Compensation system” alla 8<sup>th</sup> Edoardo Amaldi Conference on Gravitational Waves, New York (USA);
- **2005:** “Approaching the quantum limit with a new read-out on EXPLORER and NAUTILUS” alla 6<sup>th</sup> Edoardo Amaldi Conference on Gravitational Waves, Okinawa (Giappone);
- **2004:** “Present status of EXPLORER and NAUTILUS” alla 17<sup>th</sup> International Conference on General Relativity and Gravitation, Dublino (Irlanda);
- **2003:** “EXPLORER and NAUTILUS: present status” **invited talk** al 10<sup>th</sup> Marcell Grossman Meeting on General Relativity, Rio de Janeiro (Brasile);
- **2002:** “The next science run of the gravitational wave detector NAUTILUS” al LXXXVIII Congresso Nazionale della Società Italiana di Fisica, Alghero.

### **Attività didattica presso l’Università degli Studi di Roma “Tor Vergata”**

- Dal 2015 è membro della Commissione Didattica del Dipartimento di Fisica dell’Università degli Studi di Roma “Tor Vergata”.
- Dal 2016, nell’ambito del Corso di Laurea Magistrale in Fisica, curriculum di Astrofisica, è docente titolare del corso di Fisica della Gravitazione.
- Dal 2015, nell’ambito del Corso di Laurea triennale in Fisica, è co-docente del corso di Laboratorio 3.
- Dal 2013, nell’ambito del Corso di Laurea triennale in Fisica, è co-docente del corso di Fisica Generale 1.
- Dal 2013, nell’ambito del Corso di Laurea Magistrale in Fisica, curriculum di Astrofisica, all’interno del corso di Laboratorio di Astrofisica, è titolare di una delle esperienze didattiche del corso.
- A partire dal 2010, nell’ambito del Corso di Laurea Magistrale in Fisica, curriculum di Astrofisica, all’interno del corso di Onde Gravitazionali, svolge una serie di lezioni su ottica avanzata, teoria delle aberrazioni, generazione e propagazione di fasci laser, interferometria e rivelatori interferometrici di onde gravitazionali.

### **Attività di correlatore e di tutor di dottorandi e post-doc**

Tesi di Laurea Magistrale:

- Matteo Cortese, “*Misura delle aberrazioni ottiche in rivelatori interferometrici di onde gravitazionali: caratterizzazione di un sensore Hartmann di fronte d’onda e progettazione del sistema ottico per Advanced Virgo*”, Anno Accademico **2012/2013**, Università degli Studi di Roma “Tor Vergata”, Dipartimento di Fisica.
- Lorenzo Aiello, “*Optimization of sensors and actuators for the correction of optical aberrations in the advanced gravitational waves detectors*”, Anno Accademico **2014/2015**, Università degli Studi di Roma “Tor Vergata”, Dipartimento di Fisica.
- Priyanka Giri, “*Modeling of High Finesse Optical Cavities for the Reduction of Scattering Losses in Advanced Virgo*”, Anno Accademico **2018/2019**, Astromundus Master Program, Università degli Studi di Roma “Tor Vergata”, Dipartimento di Fisica.

Tesi di Dottorato:

- Dott. Maurizio Di Paolo Emilio, “*Compensation of thermal effects in core optics of the gravitational wave detector Virgo*”, XXII Ciclo, Università degli Studi dell’Aquila, Dipartimento di Fisica.
- Dott.ssa Ilaria Nardecchia, “*Control of wavefront distortions in the interferometric gravitational wave detector Advanced Virgo*”, XXVIII Ciclo, Università di Roma Tor Vergata e La Sapienza,

corso di dottorato congiunto in “Astronomy, Astrophysics and Space Science”, Dipartimento di Fisica.

- Dott. Lorenzo Aiello, “*Development of new approaches for Advanced Virgo aberrations control*”, XXXI Ciclo, Gran Sasso Science Institute.

Post-doc:

- Dott. Maurizio Di Paolo Emilio.
- Dott.ssa Laura Sperandio.
- Dott.ssa Valeria Malvezzi.
- Dott.ssa Elisabetta Cesarini.
- Dott.ssa Valeria Sequino.
- Dott. Matteo Lorenzini.

## **Attività scientifica**

Il mio interesse scientifico primario è lo studio delle sorgenti cosmiche di onde gravitazionali e la realizzazione di strumenti atti ad osservarle.

Durante la mia attività mi sono occupato di migliorare le prestazioni dei rivelatori risonanti criogenici (sviluppo del sistema di readout elettronico) e di quelli interferometrici (sviluppo di sistemi ottici adattivi, generazione di stati di luce compressa, abbattimento del rumore termico) e di studiarne gli sviluppi futuri. Inoltre, mi occupo della prima misura diretta dello stato di polarizzazione del fondo cosmico di microonde (CMB), dovuto alle onde gravitazionali primordiali emesse nel processo inflazionario.

### Rivelatori risonanti criogenici (NAUTILUS, EXPLORER e MINIGRAIL)

Nell’ambito del gruppo romano di ricerca delle onde gravitazionali (ROG), ho svolto sia il lavoro di tesi di laurea che quello di dottorato, partecipando costantemente alle attività necessarie al mantenimento in funzione di entrambi i rivelatori.

Durante questi periodi mi sono occupato dell’elettronica superconduttrice (realizzando, durante la tesi di laurea, un trasformatore superconduttore a bassissime perdite, con fattore di merito superiore a  $10^6$ ) e dello sviluppo di amplificatori prossimi al limite quantistico basati su dc SQUID, curando le fasi di progettazione, assemblaggio e test in una facility a 4.2 K, da me progettata e realizzata. Parte di questa attività è stata svolta in collaborazione, **da me coordinata**, con l’Istituto di Fotonica e Nanotecnologie del CNR. Il frutto di questa ricerca è stato la realizzazione di un dispositivo a doppio SQUID con una risoluzione in energia pari a  $70\hbar$  alla temperatura di 2 K, il miglior risultato mai ottenuto con questo tipo di sistemi a questa temperatura.

Inoltre, mi sono occupato della calibrazione dei rivelatori, mettendo a punto un sistema automatizzato per l’iniezione hardware di segnali impulsivi con diversi SNR per la misura dell’efficienza degli algoritmi di filtraggio dati.

I dati registrati dai rivelatori nel corso degli anni sono stati utilizzati per condurre ricerche di segnali gravitazionali impulsivi, anche in correlazione con gamma-ray burst, e continui.

Come attività collaterale alla ricerca di onde gravitazionali, ho contribuito all’esperimento RAP (Rivelazione Acustica di Particelle). Infatti, i rivelatori risonanti di o.g., comportandosi come dei macroscopici oscillatori meccanici, vengono messi in vibrazione dal passaggio di particelle cariche. Varie analisi hanno evidenziato nei dati di NAUTILUS la presenza di eventi straordinariamente energetici dovuti al passaggio di raggi cosmici con una frequenza di vari ordini di grandezza superiore all’attesa. Dal momento che tale anomalia sembrava dipendere dallo stato normale o superconduttore della lega di alluminio di cui è costituita la sbarra, è stato realizzato un esperimento volto alla verifica della teoria termo-acustica tramite lo studio del comportamento di un piccolo cilindro dello stesso materiale di NAUTILUS, al variare della temperatura, quando viene colpito da elettroni di energia nota. A questo scopo è stata utilizzata la BTF (Beam Test Facility) dei LNF. In questo esperimento mi sono occupato in prima persona dell’allestimento del criostato e del refrigeratore a diluizione, delle fasi di raffreddamento e dell’elettronica di trasduzione del segnale.

Durante la tesi di dottorato, ho anche collaborato con il gruppo dell'Università di Leida (Olanda), diretto dal Prof. Giorgio Frossati, alla realizzazione di un rivelatore gravitazionale sferico di circa 1100 kg di peso, denominato MiniGrail. Questa geometria, infatti, presenta notevoli vantaggi rispetto alle antenne cilindriche: omnidirezionalità, possibilità di misurare lo stato di polarizzazione e di determinare la direzione di provenienza dell'o.g. con un solo rivelatore. Infine utilizzando un'antenna sferica è possibile discriminare tra diverse teorie metriche della gravitazione.

Ho partecipato ad una misura di rumore browniano di MiniGrail, la prima in assoluto con questo tipo di rivelatore, contribuendo alla misura stessa e implementando gli algoritmi per l'analisi dei dati on-line e off-line. Nel corso del 2004 ho trascorso lunghi periodi presso l'Università di Leida che hanno portato a maggio 2004 a raffreddare per la prima volta un rivelatore sferico con tre catene di trasduzione, raggiungendo una temperatura di rumore dell'ordine dei 100 mK.

### Rivelatori interferometrici (Virgo, Advanced Virgo e Einstein Telescope)

Virgo è il più grande rivelatore interferometrico europeo, nato da una collaborazione italo-francese, situato presso l'European Gravitational Observatory (EGO) vicino Pisa. Attualmente sono 20 i laboratori che partecipano all'esperimento, da più nazioni europee (oltre all'Italia e la Francia, si sono recentemente unite l'Olanda, la Polonia, la Bulgaria, la Spagna, la Germania e il Belgio).

Il rivelatore è costituito da un interferometro di Michelson i cui bracci, lunghi 3 chilometri, sono cavità risonanti Fabry-Perot (con un cammino ottico effettivo di circa 120 chilometri). L'intervallo di frequenze in cui il rivelatore è sensibile a segnali gravitazionali va da 10 Hz a 10 kHz. Questo ampio intervallo, insieme con l'elevata sensibilità, consente di rivelare radiazione gravitazionale prodotta da supernovae, binarie coalescenti e pulsar proveniente da distanze fino all'ammasso della Vergine.

Nell'ambito dell'esperimento Virgo, nel periodo dal 2008 al 2012, sono stato **responsabile** della definizione, dello sviluppo e dell'installazione del sistema di ottica adattiva (denominato "Thermal Compensation System", TCS) per la correzione delle aberrazioni termiche negli specchi dell'interferometro, gestendo un budget, allocato presso EGO, di circa 200 k€.

La necessità di un sistema di compensazione deriva dal fatto che una frazione (alcune parti per milione) della potenza del fascio laser viene assorbita dallo specchio, provocando un riscaldamento locale non uniforme, seppur estremamente piccolo (frazioni di grado). I risultati di questo gradiente di temperatura sono un incremento non uniforme del cammino ottico all'interno dello specchio e la deformazione termo-elastica della superficie riflettente. Queste aberrazioni impediscono il normale funzionamento dell'interferometro, limitandone la sensibilità a frequenze superiori ai 200 Hz.

Il sistema TCS, installato nel corso del 2008, ha consentito di aumentare per la prima volta la potenza di input dell'interferometro da circa 8W durante il primo run scientifico (VSR1) ai 17W utilizzati in VSR2, migliorando la sensibilità del rivelatore di un fattore  $\sqrt{2}$  nella banda di frequenza oltre i 200 Hz grazie alla diminuzione del rumore shot.

Durante questo periodo, ho instaurato e coordinato una fruttuosa collaborazione (tuttora in corso) con il gruppo LIGO, presso Caltech, responsabile dell'ottica adattiva, con importanti conseguenze nella progettazione e realizzazione di Advanced LIGO.

Il rivelatore Virgo è stato decommissionato nel corso del 2012 per dare inizio all'installazione di Advanced Virgo, che sonderà un volume di universo 1000 volte più grande di quello accessibile ai rivelatori di prima generazione, con una sensibilità un ordine di grandezza migliore su tutta la banda di rivelazione.

Ad Advanced Virgo ho personalmente dato contributi in diversi ambiti. Innanzitutto, ho progettato il nuovo sistema di ottica adattiva, reso ancor più complesso dalla maggiore potenza circolante nelle cavità Fabry-Perot e dalla migliore sensibilità del rivelatore. In qualità di **RUP** per la sigla "Ego Virgo\_adv" di CSNII, ho coordinato sia tutte le fasi di acquisto dei componenti, gestendo un budget di circa 1,2 M€, che della loro installazione sul sito. Inoltre, nel quadriennio 2008-2012, sono stato **Principal Investigator** di un finanziamento di oltre 100 k€ dallo European Gravitational Observatory, per la realizzazione di una facility, presso i laboratori della Sezione INFN di Roma Tor Vergata, per la definizione del sistema di compensazione termica di Advanced Virgo e delle future generazioni di rivelatori interferometrici terrestri. La facility, unica al mondo e denominata TeTis (Testing the effects of TCS Integrated Strategies), consente lo sviluppo e la caratterizzazione sia di

attuatori (basati su laser a CO<sub>2</sub> o elementi radianti) che di sensori (Hartmann e Shack-Hartmann) di nuova concezione.

In qualità di membro dell'**Internal Project Review Board**, ho personalmente seguito la revisione di alcuni sottosistemi del progetto Advanced Virgo, in particolare del sistema da vuoto (il più grande in Europa), del sistema di iniezione del laser nell'interferometro e del sistema di rivelazione del segnale gravitazionale.

Inoltre, sono stato coinvolto in una attività (finanziata dalla CSNII) legata al miglioramento della sensibilità dei rivelatori interferometrici avanzati, tramite la generazione di stati di luce compressa. Infatti, una limitazione alla sensibilità di questi strumenti è dovuta al rumore quantistico derivante dal principio di indeterminazione di Heisenberg e questo può essere superato iniettando stati di luce non classici, o compressi, attraverso la porta antisimmetrica dell'interferometro. Presso il laboratorio Virgo della Sezione INFN di Roma Tor Vergata, si è svolta un'attività sperimentale, da me coordinata, mirata alla realizzazione di una sorgente di stati di vuoto compressi utilizzando cristalli non lineari, i cosiddetti optical parametric oscillators (OPOs).

Nel triennio 2014-2016, sono stato **responsabile locale** per la Sezione di Roma Tor Vergata del progetto AdCOAT, finanziato dalla Commissione Scientifica Nazionale V dell'INFN, rivolto alla modellazione, caratterizzazione e progettazione dei coating riflettenti degli specchi di nuova concezione, con il fine di abbattere il rumore termico nei rivelatori interferometrici di onde gravitazionali avanzati, che limita la sensibilità nella banda di frequenze di più alto interesse scientifico (tipicamente tra 60 Hz e 200 Hz). Questa attività ha permesso di stabilire delle importanti collaborazioni internazionali con i Laboratoire des Matériaux Avancés (Lione, Francia), produttore degli specchi sia di Advanced Virgo che di Advanced LIGO, e con la National Tsing Hua University di Taiwan.

Oltre al coinvolgimento nella progettazione e installazione del rivelatore, posso sicuramente affermare che il mio contributo più importante al progetto Advanced Virgo inizia dalla mia nomina a coordinatore della messa a punto dello strumento (**Commissioning Coordinator**) e del run di presa dati (**Science Run Coordinator**), avvenuta nel Febbraio 2017. Con l'interferometro non ancora funzionante, in quel momento la Collaborazione Virgo vedeva poche possibilità di riuscire ad affiancare Advanced LIGO nell'ultima frazione del secondo run osservativo (O2), il cui termine era previsto a fine Agosto 2017. In queste condizioni e con la fortissima pressione degli enti finanziatori, la gestione del team internazionale di commissioning (composto da 11 sottosistemi con altrettanti responsabili) è risultata particolarmente delicata. I risultati del nuovo modello di attività sul sito, da me introdotto, non hanno però tardato ad arrivare. A Marzo è stata raggiunta una delle milestone fondamentali del progetto: mantenere l'interferometro operante in frangia scura per almeno un'ora. A Maggio la stabilità del rivelatore aveva raggiunto un livello tale da consentirci di effettuare un run di commissioning durante un fine settimana con un duty cycle dell'85%. Nei mesi di Giugno e Luglio, la sensibilità del rivelatore è migliorata fino a raggiungere un range (distanza alla quale è possibile osservare la coalescenza di un sistema binario di stelle di neutroni – BNS – con SNR pari a 8) di 20 Mpc. Quindi, il primo Agosto 2017, Advanced Virgo inizia il suo primo run osservativo, in coincidenza con Advanced LIGO, con una sensibilità di 28 Mpc. In pochi mesi, il commissioning ha raggiunto e superato i risultati che in Virgo hanno richiesto anni di lavoro: il range è più che raddoppiato (da 11 Mpc a 28 Mpc), con un conseguente aumento del volume di universo osservabile di un fattore 10.

O2 si è concluso il 25 Agosto con i seguenti fatti: Advanced Virgo è stato in misura con un duty cycle dell'85% (il migliore del network) e sono stati rivelati diversi eventi gravitazionali, tra i quali meritano una menzione speciale:

- **GW170814**: coalescenza di due buchi neri di masse stellari, distanti 500 Mpc. Primo evento registrato in coincidenza tripla e, combinando i dati dei tre rivelatori, è stato possibile ridurre l'incertezza nella determinazione della direzione di provenienza del segnale da 1200 gradi quadrati (con i dati dei soli LIGO) a 60 gradi quadrati (utilizzando anche le informazioni di Virgo) e misurare lo stato di polarizzazione, determinando dei limiti superiori alle componenti non tensoriali;



- **GW170817**: prima osservazione della coalescenza di due stelle di neutroni, distanti 40 Mpc. Localizzazione nel cielo con un'incertezza di soli 16 gradi quadrati, che ha permesso di identificare la galassia ospite (NGC4993) e di rivelare la controparte elettromagnetica, dallo short gamma-ray burst osservato da Fermi e INTEGRAL, fino all'emissione nel visibile, nel radio e nell'infrarosso. Questo evento segna la nascita dell'astronomia multimessaggera.

Per entrambi gli eventi, in qualità di **Science Run Coordinator** e membro del **LIGO-Virgo Rapid Response Team**, ho partecipato alla fase di validazione dei trigger e all'emissione dell'allerta per gli osservatori elettromagnetici e neutrini.

Da Settembre 2017 ad oggi, Advanced Virgo ha alternato fasi di commissioning e di installazione di nuove componenti hardware: un laser in grado di fornire fino a 70 W di potenza, una sorgente di stati di vuoto compressi e ora gli specchi sono sospesi con fibre di vetro. Il programma di queste attività, le date per i run ingegneristici, l'inizio del prossimo run osservativo (O3) e le policy per l'emissione degli allarmi dei trigger vengono coordinate con Advanced LIGO nell'ambito del **Joint Run Planning Committee**, di cui sono Co-Chair. L'obiettivo di Virgo per O3 è di entrare in misura con un range minimo di 60 Mpc per le BNS. Dopo pochi mesi dall'inizio della fase di commissioning, la sensibilità ha registrato dei grandi miglioramenti, soprattutto nella banda di frequenza da 10 Hz a 50 Hz (già conforme con i requisiti di O3), rendendo Advanced Virgo il rivelatore più sensibile al mondo al di sotto dei 20 Hz. Questo si riflette in un netto aumento del range per la rivelazione della coalescenza di buchi neri di massa stellare, che è passato dai 300 Mpc in O2 a circa 450 Mpc attuali.

La prima fase del terzo run osservativo, dal primo aprile 2019 al primo ottobre 2019, denominata O3a, si chiude con importantissimi risultati osservativi. Va, innanzitutto, menzionata la nuova procedura di annuncio dei trigger gravitazionali tramite circolari sul Gamma-ray Coordinates Network (GCN) della NASA, aperte a tutti gli osservatori elettromagnetici e neutrini, in modo da massimizzare la probabilità di osservazioni multimessaggera e, quindi, i risultati scientifici. Durante O3a sono stati osservati 33 eventi candidati (maggiore della somma dei run osservativi del 2015 e 2017), di cui alcuni rivestono un particolare interesse scientifico:

- **S190425z**: probabile coalescenza di due stelle di neutroni;
- **S190814bv**: la prima probabile osservazione della coalescenza di un sistema misto, formato da un buco nero e da una stella di neutroni;
- **S190706ai**: la più lontana coalescenza di due buchi neri mai osservata, ad una distanza di circa 5.3 Gpc (corrispondente ad un redshift  $z \sim 1.2$ ).

Durante il mese di ottobre, tutti e tre gli interferometri interromperanno le osservazioni per una breve fase di messa a punto, con l'obiettivo di apportare piccole modifiche che possano ulteriormente migliorare la sensibilità degli strumenti.

La seconda frazione di O3, denominata O3b, inizierà il primo novembre 2019 per concludersi il 30 aprile 2020, in modo che l'intero periodo osservativo duri un anno di calendario. Durante questi mesi, è prevista l'entrata in misura anche del rivelatore giapponese KAGRA, il quale, sebbene avrà una sensibilità più bassa rispetto agli altri osservatori, migliorerà le capacità di localizzazione nel cielo del network, aumentando ulteriormente la possibilità di osservazioni multimessaggera.

Infine, una frazione del mio tempo viene dedicata allo studio dei futuri sviluppi dei rivelatori interferometrici terrestri. Questi includono AdV+, un progetto di miglioramento di Advanced Virgo, sfruttando l'infrastruttura esistente, che dovrebbe consentire un aumento del range di un fattore 3 (e quindi di universo osservabile di un fattore quasi 30) ed entrare in misura nel 2024. In questo ambito, sono **responsabile** del Work-package 2.2 ("Thermal aberrations and parametric instabilities") del Progetto Premiale FIGARO ("Fostering Italian Leadership in the Field of Gravitational Wave Astrophysics"), finanziato dal MIUR.

Contemporaneamente, vengono condotti studi per rivelatori gravitazionali di terza generazione, ospitati in nuove infrastrutture. Infatti, nel 2008, nell'ambito del settimo programma quadro della Comunità Europea, è stato finanziato, per tre milioni di Euro, uno studio di fattibilità dell'osservatorio Einstein Telescope (ET): un rivelatore interferometrico gravitazionale criogenico e sotterraneo, in modo da abbattere le sorgenti di rumore termico e sismico ed ottenere una sensibilità a segnali gravitazionali di ampiezza 100 volte inferiore a quella attuale, aumentando così di un milione di volte

il volume di universo osservabile, sulla più ampia banda accessibile per rivelatori terrestri, da 1 Hz a 10 kHz. Ho attivamente partecipato al progetto in qualità di membro del writing team de “Einstein Telescope Conceptual Design Document”.

È doveroso ricordare il supporto fornito recentemente dal MIUR ad entrambi i progetti (AdV+ e ET) tramite lo stanziamento di 17 M€ a favore dell’INFN.

### Fondo cosmico di microonde (Large Scale Polarization Explorer)

L’esperienza LSPE (Large Scale Polarization Explorer) studia la polarizzazione del fondo cosmico di microonde (CMB), con l’obiettivo di misurare il debole segnale prodotto dall’inflazione cosmica, nei primi istanti dell’evoluzione dell’universo, ad energie dell’ordine di  $10^{16}$  GeV.

Lo stato di polarizzazione dei fotoni del fondo di microonde è sensibile alle perturbazioni di tipo scalare (densità) e tensoriale (onde gravitazionali) presenti all’epoca della ricombinazione. Infatti, la maggior parte dei fotoni CMB viene diffusa da elettroni liberi per l’ultima volta alla ricombinazione. Si tratta di uno scattering Thomson, quindi qualunque anisotropia di tipo quadrupolare presente nei fotoni incidenti sull’elettrone produce un certo grado di polarizzazione lineare dei fotoni diffusi. Alla ricombinazione sono presenti le protostrutture (perturbazioni di densità) che formeranno poi le galassie e gli ammassi, e le onde gravitazionali (perturbazioni tensoriali) prodotte dall’evento inflazionario. Ambedue le perturbazioni hanno una componente di quadrupolo e quindi generano polarizzazione lineare dei fotoni CMB diffusi. Le proprietà di simmetria sono però diverse: nel caso di perturbazioni scalari si genera un campo di polarizzazione (distribuzione dei vettori di polarizzazione sulla sfera celeste, misurabile) che è irrotazionale; nel caso di perturbazioni tensoriali, si crea un campo di polarizzazione sia irrotazionale (modi E) che rotazionale (modi B).

L’esperienza LSPE si propone di studiare lo spettro del segnale della componente di polarizzazione rotazionale, verificandone la consistenza con le aspettative dai modelli inflazionari ed escludendo una possibile origine “locale” (radiazione di sincrotrone o polvere interstellare). Da tali misure sarà, quindi, possibile risalire al background di onde gravitazionali di origine cosmologica.

Questo si compone di due strumenti separati:

- **SWIPE**, che volerà su pallone stratosferico dalle Isole Svalbard durante la notte artica, misura le componenti della CMB ad alta frequenza (140, 220 e 240 GHz);
- **STRIP**, che verrà installato presso l’Osservatorio del Teide (alle Canarie), osserverà il segnale a bassa frequenza (43 e 90 GHz).

Il gruppo di Roma Tor Vergata, di cui sono **responsabile locale** per l’INFN, contribuisce ad entrambi gli strumenti:

- **SWIPE**: Assemblaggio e test del criostato di volo e test criogenici delle principali componenti (cryo-harness, filtri ottici, cavi criogenici...). Partecipazione al lancio alle Svalbard.
- **STRIP**: lavori infrastrutturali di preparazione del sito, analisi termiche e strutturali dello strumento. Partecipazione all’installazione e al commissioning a Tenerife.
- **Analisi dati (SWIPE+STRIP)**: sviluppo e costruzione di diversi stadi della pipeline per l’analisi dei dati; simulazioni dello strumento; metodi di calibrazione; map-making; stime di spettri angolari, stima parametri cosmologici.

Nell’ambito della collaborazione internazionale LSPE, sono inoltre membro del **LSPE Advisory Committee**, organo rappresentante i maggiori collaboratori al progetto.