

Volume 11

IL COLLE  
di  
GALILEO

2 · 2022

# IL COLLE di GALILEO



ISSN  
2281-7727



# Il Colle di Galileo

Volume 11, 2, 2022



## Il Colle di Galileo

### Direttore

Daniele Dominici, *Dipartimento di Fisica e Astronomia,  
Università degli Studi di Firenze*  
email: dominici@fi.infn.it

### Comitato di Redazione

Elisabetta Baldanzi, *CNR Istituto Nazionale di Ottica*  
email: elisabetta.baldanzi@cnr.it

Roberto Casalbuoni, *Dipartimento di Fisica e Astronomia,  
Università degli Studi di Firenze*  
email: casalbuoni@fi.infn.it

Stefania De Curtis, *Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione  
di Firenze*  
email: decurtis@fi.infn.it

Daniele Galli, *INAF Osservatorio Astrofisico di Arcetri*  
email: daniele.galli@inaf.it

### Comitato Scientifico

Oscar Adriani, *Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di  
Firenze, Direttore*  
email: oscar.adriani@unifi.it

Roberto Casalbuoni, *Dipartimento di Fisica e Astronomia,  
Università degli Studi di Firenze*  
email: casalbuoni@fi.infn.it

Francesco Saverio Cataliotti, *Dipartimento di Fisica e Astronomia,  
Università degli Studi di Firenze*  
email: francescosaverio.cataliotti@unifi.it

Stefania De Curtis, *Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione  
di Firenze*  
email: decurtis@fi.infn.it

Paolo De Natale, *CNR Istituto Nazionale di Ottica*  
email: paolo.denatale@ino.it

Daniele Dominici, *Dipartimento di Fisica e Astronomia,  
Università degli Studi di Firenze*  
email: dominici@fi.infn.it

Pier Andrea Mandò, *Dipartimento di Fisica e Astronomia,  
Università degli Studi di Firenze*  
email: mando@fi.infn.it

Giuseppe Pelosi, *Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione,  
Università di Firenze*  
email: giuseppe.pelosi@unifi.it

Giacomo Poggi, *Dipartimento di Fisica e Astronomia, Università  
degli Studi di Firenze*  
email: poggi@fi.infn.it

Maria Sofia Randich, *INAF Osservatorio Astrofisico di Arcetri,  
Direttore*  
email: sofia.randich@inaf.it

### Presidente del Sistema Museale d'Ateneo

Marco Benvenuti, *Dipartimento di Scienze della Terra*  
email: m.benvenuti@unifi.it



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
FIRENZE



Istituto Nazionale di Fisica Nucleare



ISTITUTO NAZIONALE DI OTTICA  
CONSIGLIO NAZIONALE DELLE RICERCHE



INAF  
ISTITUTO NAZIONALE  
DI ASTROFISICA

OSSERVATORIO ASTROFISICO DI ARCETRI

Versione elettronica / Online version:  
<http://www.fupress.com/cdg>

ISSN (print) 2281-7727; ISSN (online) 2281-9711

© 2022 Firenze University Press  
Università degli Studi di Firenze  
Firenze University Press  
via Cittadella, 7, 50144 Firenze, Italy  
[www.fupress.com/](http://www.fupress.com/)  
Printed in Italy



Il Colle di  
Galileo

# Sommario

## *Table of contents*

### PILLOLE DI STORIA / HISTORICAL PILLS

- 5 Beatrice, laureata in Fisica a 19 anni al tempo di Garbasso  
Beatrice, a degree in Physics at the age of 19 at the time of Garbasso  
*Massimo Mazzoni, Alberto Righini, Piero Mazzinghi*

### RAPPORTI DI ATTIVITÀ / ACTIVITY REPORTS

- 23 Topological properties of gauge theories and their applications to high-energy and condensed-matter physics
- 27 Gravitational scattering, inspiral, and radiation

### IN EVIDENZA / HIGHLIGHTS

- 31 La ricerca della vita nel Sistema Solare passa attraverso il Laboratorio di Astrobiologia dell'INAF-Osservatorio Astrofisico di Arcetri  
The search for life in the Solar System passes through the Astrobiology Laboratory of the INAF-Arcetri Astrophysical Observatory  
*Teresa Fornaro, John Robert Brucato*
- 41 PLATO e Ariel, le prossime missioni di classe media del programma dell'ESA sulla scoperta e caratterizzazione di esopianeti dallo spazio: il contributo di INAF-Arcetri  
PLATO and Ariel, the next medium-class Missions of the ESA's roadmap on the discovery and characterization of exoplanets from space: the contribution of INAF-OAA  
*Mauro Focardi*
- 49 Il contributo dell'INAF-Osservatorio Astrofisico di Arcetri alla tecnologia ed alle prime osservazioni di SKA-Low  
The INAF-Arcetri Astrophysical Observatory contribution to SKA-Low: technology and first observations  
*Giulia Macario, Carlo Baffa, Carolina Belli, Pietro Bolli, Simone Chiarucci, Giovanni Comoretto, Paola Di Ninni, Elisabetta Giani, Georgios Kyriakou*

- 61 La cristallizzazione di un superfluido: il supersolido  
The crystallization of a superfluid: the supersolid  
*Nicolò Antolini, Giulio Biagioni*



Il Colle di  
Galileo

# Beatrice, laureata in Fisica a 19 anni al tempo di Garbasso

*Beatrice, a degree in Physics at the age of 19 at the time of Garbasso*

Massimo Mazzoni<sup>1</sup>, Alberto Righini<sup>2</sup>, Piero Mazzinghi<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Fondazione Osservatorio Ximeniano, Firenze

<sup>2</sup> Già Professore associato al Dipartimento di Fisica e Astronomia, Università degli Studi di Firenze

<sup>3</sup> CNR - Istituto Nazionale di Ottica, Firenze

**Riassunto.** Grazie ad un'estesa ricerca archivistica, finalizzata a celebrare i 100 anni dall'inaugurazione dell'Istituto di Fisica ad Arcetri, si è ricostruito il panorama dell'epoca completo del profilo dei suoi protagonisti: professori, giovani ricercatori e studenti. Tra questi ultimi, compare una brillante figura femminile, Beatrice Crinò, il cui *curriculum studiorum* e professionale merita a nostro avviso qualche approfondimento, insieme al suo contesto familiare e culturale.

**Keywords.** Beatrice Crinò, Corso di Laurea in Fisica, Guglielmo Righini, Istituto Nazionale di Ottica.

A Firenze, il Corso di Laurea in Fisica venne attivato nell'anno accademico 1924-25 quando il "Regio Istituto di Studi Superiori Pratici e di Perfezionamento" (nel seguito ISSPP) rinunciò ad un modello di istruzione ispirato all'ordinamento francese, per trasformarsi in una regolare Università simile ad altre già esistenti

**Abstract.** Thanks to extensive archive research, aimed at celebrating the 100<sup>th</sup> anniversary of the inauguration of the Institute of Physics at Arcetri, we have reconstructed the panorama of the period complete with the profiles of its key figures: professors, young researchers and students. The latter include a brilliant young woman, Beatrice Crinò, whose *curriculum studiorum* and career profile deserve some in-depth study, together with her family and cultural background.

**Keywords.** Beatrice Crinò, Physics Degree Course, Guglielmo Righini, National Institute of Optics.

The Physics Degree Course at Florence University was inaugurated in academic year 1924-25, when the "Regio Istituto di Studi Superiori Pratici e di Perfezionamento" (hereinafter ISSPP) renounced an education model inspired by the French system and became a regular university similar to others already existing in Italy. However, with some differences compared to larger universities such as, for example, financial support. This support did not come from the

nel nostro Paese. Con alcune differenze, però, rispetto ad Atenei maggiori come, per esempio, il supporto finanziario: non governativo ma affidato principalmente ai contributi di 26 comuni dell'area fiorentina<sup>1</sup>, i quali tuttavia iniziarono a ritirarsi dall'impegno una decina di anni più tardi. Anteriormente al 1924, l'esistente Gabinetto di Fisica sito in Via Gino Capponi, divenuto poi Laboratorio di Fisica, oltre a svolgere attività di ricerca aveva solo la funzione di provvedere i mezzi ed il personale per l'insegnamento della disciplina nell'ambito degli altri indirizzi di studio. Di conseguenza le prime lauree in Fisica furono rilasciate nell'anno accademico 1927-28, anzi si deve usare il singolare, perché vi fu in quella sessione un solo dottore in Fisica: Mario Conti<sup>2</sup>. In seguito il numero dei nuovi laureati rimase piuttosto stabile, intorno alle quattro unità per ogni anno accademico, e così avvenne anche nell'a. a. 1932-33. Nella sessione estiva di quell'anno uno dei neolaureati, a pieni voti, aveva soltanto 19 anni: era una giovane donna iscrittasi all'università appena quindicenne, età alla quale aveva conseguito il diploma di Maturità classica saltando diverse classi intermedie e presentandosi da privatista agli esami finali.

La neolaureata Beatrice Crinò, all'anagrafe Beatrice Giuseppina Isola, era nata a Catania il 7 giugno del 1913, secondogenita di Sebastiano e di Sofia de' Trombetti, ma era venuta a Firenze con la famiglia all'età di due anni e quindi può essere considerata fiorentina di adozione. Sebastiano, figlio di una modesta famiglia di Barcellona Pozzo di Gotto (ME), aveva studiato al Liceo Classico di Messina e poi alla Facoltà di Lettere nell'Università di quella città, dove fu allievo di Giovanni Pascoli. I suoi interessi erano però orientati alla Geografia, materia che insegnerà

government, but was entrusted mainly to contributions from 26 municipalities in the Florentine area<sup>1</sup>, which began to withdraw from the commitment about ten years later. Prior to 1924, the existing "Gabinetto di Fisica" in Via Gino Capponi, which later became the Physics Laboratory, besides carrying out research activities, had only the function of providing means and staff for teaching the discipline within other study courses. Consequently, the first degrees in Physics were assigned in academic year 1927-28. Actually we need to use the singular form, because there was only one Physics graduate in that session: Mario Conti<sup>2</sup>. Later, the number of new graduates remained fairly stable, at around four per academic year, and this was also the case in academic year 1932-33. In the summer session of that year, one of the new graduates, who graduated with top marks, was only 19 years old. She was a young woman who had enrolled at the university when she was just 15, the age at which she had obtained her classical high school diploma by skipping several intermediate classes and sitting for her final exams as a private student.

The newly graduated Beatrice Crinò, born Beatrice Giuseppina Isola on 7 June 1913 in Catania, the second child of Sebastiano and Sofia de' Trombetti, came to Florence with her family at the age of two and can therefore be considered Florentine by adoption. Sebastiano, the son of a modest family from Barcellona Pozzo di Gotto (ME), studied at the Classical High School in Messina and then at the Faculty of Letters at the city's University, where he was a student of Giovanni Pascoli. His interests were, however, oriented towards Geography, a subject he would teach throughout his entire life, becoming a renowned scholar<sup>3</sup>. Sofia was the



Figura 1. Beatrice nel 1928. Foto dal libretto universitario. ASUF, fascicolo studente, filza 557, inserto 15223.  
Figure 1. Beatrice in 1928. Photo from the university booklet. ASUF, student file, filza 557, insert 15223.

daughter of a staff officer from the Lombardy-Veneto region, who joined the Italian Army after the unification of Italy. Orphaned at a very young age, thanks to various scholarships she attended the Collegio degli Angeli in Verona, where she graduated, going on to complete her studies at the ISSPP in Florence and qualifying to teach German and French.

Beatrice and her elder sister Anna (who went on to become full professor of English literature at Pisa University) grew up in a middle-class environment linked to the Florentine culture of the time. The family was comfortably off thanks to their parents' salaries as teachers (Sofia, their mother, taught French at the Dante classical high school) and particularly due to the success of the geography books for schools that their father Sebastiano wrote in large numbers. Family life was dominated by education, seen as the only real way of getting on in life, and by teaching as the culmination of that education. Both girls absorbed this spirit from the very beginning of their school career. When she enrolled at university, Beatrice chose the Physics and Mathematics Degree Course, which was designed primarily to train high school teachers. However, it only took her a few weeks to realise that her interests were steering her towards a more in-depth course of study, so she immediately requested a transfer<sup>4</sup> to the degree course called Pure Physics at the time. The lectures of this course were held at Arcetri in the Institute directed by Antonio Garbasso, Tenured Professor of Experimental Physics. It was 1928: since the previous academic year, when Enrico Fermi had just left Florence to take up the chair of Theoretical Physics at La Sapienza in Rome, physicist Bruno Rossi had arrived from Bologna as Assistant Professor. He was followed by Gilberto Bernardini, in the same role, together with



per tutta la vita, diventandone un rinomato cultore<sup>3</sup>. Sofia era figlia di un ufficiale di Stato maggiore, originario del Lombardo Veneto, passato all'Esercito italiano dopo l'unificazione; rimasta orfana in tenerissima età frequente, grazie a diverse borse di studio, il collegio degli Angeli di Verona dove si diploma, completando infine i suoi studi presso l'ISSPP di Firenze e conseguendo l'abilitazione all'insegnamento della lingua tedesca e della lingua francese.

Beatrice e sua sorella maggiore Anna (che diventerà professore ordinario di letteratura inglese all'Università di Pisa) crescono in un ambiente borghese legato alla cultura fiorentina del tempo e anche in una certa agiatezza consentita dagli stipendi dei genitori insegnanti (Sofia, la madre, insegnava Francese presso il liceo classico Dante) ma soprattutto dal successo dei libri di geografia per le scuole che il padre Sebastiano scriveva in gran numero. In famiglia era dominante il culto dello studio, visto come vero ed unico mezzo di promozione sociale, e dell'insegnamento come massima realizzazione del proprio percorso di istruzione: le due ragazze assorbono questo spirito fin dall'inizio della loro carriera scolastica. Al momento dell'iscrizione all'Università, Beatrice sceglie il corso di laurea in Fisica Matematica che era disegnato essenzialmente per formare gli insegnanti nelle scuole superiori, ma le bastano poche settimane per accorgersi che i suoi interessi la portano piuttosto verso un indirizzo più approfondito, così chiede subito il trasferimento<sup>4</sup> al corso di laurea che allora era denominato *Fisica pura*, e le cui lezioni sono svolte ad Arcetri nell'Istituto diretto da Antonio Garbasso, Professore stabile di Fisica sperimentale. È il 1928: dal precedente anno accademico, quando Enrico Fermi ha appena lasciato Firenze chiamato sulla cattedra di Fisica teorica

Enrico Persico, Non-tenured Professor of Theoretical Physics, and, shortly afterwards, the young theorist Giulio Racah, nuclear experimentalist Daria Bocciarelli and, lastly, particle physicist Giuseppe Occhialini<sup>5</sup>.

Indeed, the early 1930s, while marred by Garbasso's premature death, witnessed the formation at Arcetri of a class of scholars destined to leave their mark on Physics, not only at Italian level, and this was thanks to Garbasso's work and the influences of Enrico Fermi and Franco Rasetti<sup>6</sup>. After several attempts to verify the principles of Quantum Mechanics with interferometric methods and after the spectroscopic study of comets, Rossi and Bernardini founded a research school on "penetrating radiation", i.e., cosmic rays, which had recently been discovered.

Beatrice Crinò graduated on 27 July 1932, with Bruno Rossi as her supervisor, with a thesis entitled "Research on Secondary Corpuscular Radiation of Penetrating Radiation"; she obtained full marks (90/90), having passed her exams almost always with top marks and often also earning honours, particularly in the course's qualifying subjects, such as Mathematical Analysis, Theoretical Physics, Experimental Physics and Astrophysics. It should be remembered that, in those years, the University's scientific teaching in these subjects was able to boast prestigious names in addition to those already mentioned above, such as Bruno Caldonazzo, Giovanni Sansone, Giorgio Abetti and Vasco Ronchi, who were later among her examiners. However, she was not particularly satisfied with the assessment of her thesis work due to the lack of honours, as can be seen from the letters written by Beatrice's mother to her eldest daughter Anna, who was in London at the time. However, given the novelty and interest of the research, An-

alla Sapienza di Roma, è arrivato da Bologna il fisico Bruno Rossi come Assistente incaricato. Seguirà poi Gilberto Bernardini, con lo stesso ruolo, insieme a Enrico Persico, Professore non stabile di Fisica teorica e poco dopo giungono anche il giovane teorico Giulio Racah, la sperimentale nucleare Daria Bocciarelli e infine il fisico delle particelle Giuseppe Occhialini<sup>5</sup>.

In effetti i primi anni '30, pur funestati dalla prematura morte di Garbasso, ma grazie alla sua impostazione e sulla scia di Fermi e Rasetti, vedono la formazione ad Arcetri di una classe di studiosi destinati a lasciare un segno nella Fisica, e non solo in quella italiana<sup>6</sup>. In particolare Rossi e Bernardini, dopo alcuni tentativi per la verifica dei principi della Meccanica Quantistica con metodi interferometrici e dopo lo studio spettroscopico delle comete, fondano una scuola di ricerca sulla 'radiazione penetrante', ossia i raggi cosmici, da poco scoperti.

Beatrice Crinò si laurea il 27 luglio 1932, avendo proprio Bruno Rossi come relatore, discutendo una tesi dal titolo: "Ricerche sulla radiazione corpuscolare secondaria della radiazione penetrante"; ottiene i pieni i voti (90/90), potendo vantare infatti esiti d'esame quasi sempre col massimo risultato e guadagnando spesso anche la lode, in particolare negli insegnamenti qualificanti del Corso, come Analisi matematica, Fisica teorica, Fisica sperimentale, Astrofisica. Si ricordi che in quegli anni la docenza scientifica dell'Ateneo in queste materie poteva vantare nomi prestigiosi, oltre a quelli già ricordati sopra, come Bruno Caldo-



Figura 2. I giovani fisici di Arcetri, circa 1931. Da sinistra: Lorenzo Emo Capodilista, Beatrice Crinò, Gilberto Bernardini, Assistente, Attilio Colacevich, astronomo e Daria Bocciarelli.

Figure 2. The young physicists of Arcetri, circa 1931. From left: Lorenzo Emo Capodilista, Beatrice Crinò, Gilberto Bernardini, Assistant, Attilio Colacevich, astronomer, and Daria Bocciarelli.

nazzo, Giovanni Sansone, Giorgio Abetti e Vasco Ronchi, che ritroviamo poi anche come suoi esaminatori. Tuttavia non rimane particolarmente soddisfatta della valutazione del suo lavoro di tesi a causa della mancata lode, come risulta dalle lettere che sua madre scrive alla figlia maggiore Anna, all'epoca a Londra. Data però la novità e l'interesse della ricerca, Antonio Garbasso aveva riassunto il lavoro di tesi in una comunicazione all'Accademia dei Lincei con due nomi, quello di Bruno Rossi e quello di Beatrice Crinò; ciò non piacque a quest'ultima, tanto che si fece rilasciare dal relatore una dichiarazione in cui era specificato il suo personale contributo al lavoro. Di questo documento non è rimasta traccia, per quanto risulti<sup>7</sup> che lei avesse intenzione di recarsi a casa del Direttore d'Istituto, malato, per salutarlo ma anche per fargli controfirmare tale dichiarazione. Difatti in quei mesi Garbasso aveva chiesto più volte al Rettore congedi per gravi problemi di salute che si erano manifestati già da alcuni anni.

Probabilmente la giovane età di Beatrice, a quei tempi ancora minorenni, e l'essere donna, giocarono a suo sfavore<sup>8</sup>. Dalla corrispondenza risulta che era buona amica di Lorenzo Emo Capodilista, nobile veneziano che si era laureato ventiquattrenne nella sessione successiva, tuttavia Beatrice non manca di notare, scrivendo a sua sorella, che per Lorenzo è già pronto un posto di assistente<sup>9</sup>, mentre per lei non ci sono prospettive; inoltre egli, subito dopo la laurea, ha potuto recarsi in Germania con Gilberto Bernardini per proseguire i suoi studi. Per la ragazza sarebbe stato sicuramente più difficile passare un periodo di apprendistato all'estero.

Dopo la laurea Beatrice, non vedendo nell'immediato sviluppi di carriera, svolge di malavoglia alcune ricerche bibliografiche di carattere geografico per il

tonio Garbasso summarised the thesis work in a communication to the Accademia dei Lincei with two names, that of Bruno Rossi and that of Beatrice Crinò. Beatrice was unhappy about this, so much so that she had the supervisor to issue a statement specifying his personal contribution to the work. No trace remains of this document, although apparently<sup>7</sup> she intended to visit the Director of the Institute, who was ill, at home, to see how he was but also to have him sign this declaration. It is known that Garbasso had repeatedly asked the Rector for leave of absence due to serious health problems that had been bothering him for several years.

Presumably Beatrice's young age (she was still a minor at the time) and the fact that she was a woman played against her<sup>8</sup>. From the correspondence, it appears that she was good friends with Lorenzo Emo Capodilista, a Venetian nobleman who had graduated at the age of 24 in the following session. However, Beatrice did not fail to note, when writing to her sister, that a position as an assistant was available for Lorenzo<sup>9</sup>, while there were no prospects for her; furthermore, immediately after graduating, Lorenzo was able to travel to Germany with Gilberto Bernardini to continue his studies. It would certainly have been more difficult for the girl to spend a period of apprenticeship abroad.

After graduating, Beatrice, seeing no immediate career development, reluctantly carried out some bibliographic research of a geographical nature for her father. Fortunately, Vasco Ronchi, director of the Institute of Optics, succeeded in obtaining a scholarship from the CNR. The scholarship was to study at the Institute itself, established in July 1930 and located on the same hill of Arcetri, just beyond the Physics Institute, so Beatrice studied hard on the discipline

padre. Fortunatamente Vasco Ronchi, direttore dell'Istituto di Ottica, riesce ad ottenere dal CNR una borsa di studio che viene messa a concorso. La borsa doveva essere fruita presso l'Istituto stesso, costituito nel luglio 1930 e situato sullo stesso colle di Arcetri, poco oltre quello di Fisica; quindi Beatrice si prepara con impegno su quella disciplina e in particolare sulla nascente ottica fisica. Vinta

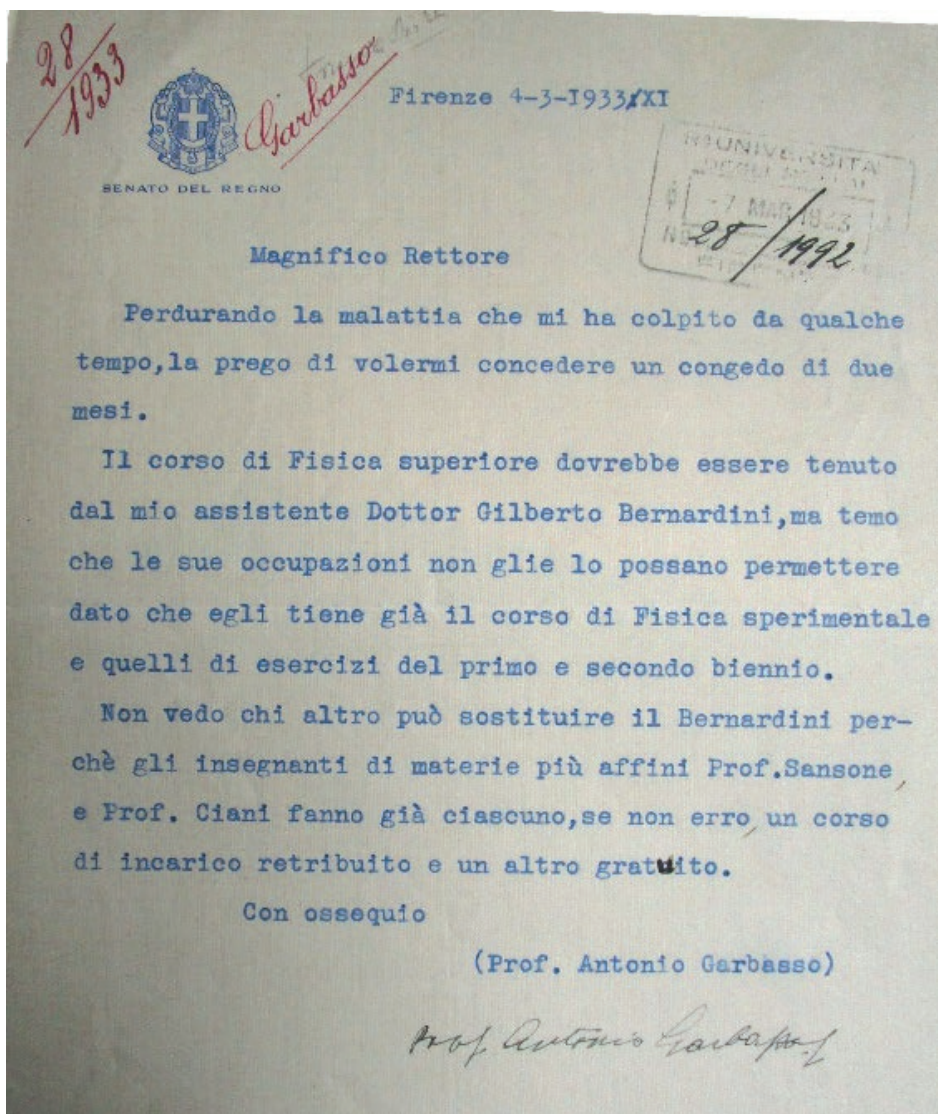


Figura 3. L'ultima richiesta di congedo di Antonio Garbasso, datata inizio marzo 1933, dove suggerisce che sia Gilberto Bernardini a subentrargli sul corso di Fisica superiore. Morirà dieci giorni dopo. ASUF, anno 1933, filza 621, fascicolo 28, prot. 1992.

Figure 3. Antonio Garbasso's last request for a leave of absence, dated early March 1933, where he suggests that Gilberto Bernardini take over his course in Higher Physics. He died ten days later. ASUF, year 1933, filza 621, file 28, prot. 1992.



Figura 4. Luglio 1933: Insegnanti ed allievi dell'Istituto Nazionale di Ottica alla chiusura del III Corso di Specializzazione. Il Direttore Ronchi è secondo da sinistra; Beatrice Crinò è riconoscibile al centro - Bollettino dell'Associazione Ottica Italiana.

Figure 4. July 1933: Teachers and students of the National Institute of Optics at the closing of the 3rd Specialisation Course. The Director Ronchi is second from the left; Beatrice Crinò is recognisable in the centre - Bulletin of the Italian Optical Association.

and in particular on the emerging subject of physical optics. After winning the scholarship, in January 1934 she began working at the Institute directed by Vasco Ronchi, with whom she effectively collaborated in the field of instrumental optics, particularly in the qualification of photographic plate emulsions. She also lectured in the courses held at the Institute for optometrists, teaching Elementary Geometry and Trigonometry, Eye Diseases and Ophthalmic Instruments<sup>10</sup>.

This research extended well beyond the duration of the scholarship, and continued until the command at the Officine Galileo (1940), resuming after the war.

When her scholarship expired, Beatrice began teaching in high schools, which she saw as a possible form of stable employment as opposed to the unpredictability of university job. As there were no teaching posts available in Florence, she applied to go and teach Mathematics and Physics in the university town of Urbino, so that she could work as a teacher while continuing her university studies. She turned her attention to less speculative studies that offered more professional opportunities, probably amidst a difficult relationship with her family, who already badly accepted her decision to study physics at university. In September she enrolled for the degree course in Pharmacy at Urbino University for the 1934-35 academic year. The following year, in order to be closer to Florence, she obtained a transfer to Genoa, where she enrolled in the degree course in Chemistry. In 1936, she obtained a qualification to teach Mathematics and Physics at high school, and she was finally granted a transfer to Florence for the following year. The ministerial decree of 10 December 1937 appointed her, following her success in the competitive examination, as a tenured teacher of Mathematics and Physics

la borsa, dal gennaio 1934 inizia a lavorare all'Istituto diretto da Vasco Ronchi, con il quale effettivamente collabora nel campo dell'ottica strumentale, in particolare nella qualificazione delle emulsioni di lastre fotografiche. Ricopre anche la funzione di docente ai corsi che in quell'Istituto si tengono per gli optometri- sti, insegnando Geometria e Trigonometria elementare, Malattie dell'occhio e Strumenti oftalmici<sup>10</sup>.

Questo impegno di ricerca si estende ben oltre la durata della borsa di studio, e continuerà fino al comando presso le Officine Galileo (1940) per riprendere poi dopo gli eventi bellici.

Allo scadere della borsa, Beatrice si orienta verso l'insegnamento nelle scuole superiori, visto come possibile impiego stabile da contrapporsi all'aleatorio impiego universitario. Non essendoci cattedre di insegnamento disponibili a Firenze, fa domanda per andare ad insegnare Matematica e Fisica ad Urbino, città universitaria, in modo da poter lavorare come insegnante e insieme continuare gli studi universitari, indirizzandosi però verso quelli meno speculativi e più professionalizzanti, verosimilmente nell'ambito di una dialettica non facile con la famiglia che già al momento dell'iscrizione all'università, aveva male accettato la sua decisione di studiare fisica. A settembre si immatricola a Urbino al Corso di laurea in Farmacia per l'anno accademico 1934-35, e l'anno successivo per avvicinarsi a Firenze ottiene il trasferimento a Genova, dove si iscrive al Corso di laurea in Chimica. Nel 1936 ottiene l'abilitazione per l'insegnamento della Matematica e Fisica alle scuole superiori, e finalmente le viene concesso il trasferimento a Firenze per l'anno seguente. Il decreto ministeriale del 10 dicembre 1937 la nomina, in

at the Florentine "Leonardo da Vinci" Scientific High School<sup>11</sup>. She was to retain this position until her early retirement, due to ill health.

In Florence she was able to complete her second course of studies: in April 1937 she again enrolled at the Florentine University as an out-of-school student of the Faculty of Pure Chemistry. She completed the course very quickly, having probably already passed all her exams at the previous universities, and, in June 1937, at the age of 24, she obtained her second degree, this time in Chemistry, with a thesis entitled "*Leghe argento manganese*" (Silver Manganese Alloys) and also preparing a paper on "*Chimica Fisica delle macromolecole*" (Physical Chemistry of Macromolecules)<sup>12</sup>. Approved again with the highest mark (110/110 cum laude), she immediately set about passing the exam to qualify as a professional chemist.

The year she spent on a scholarship at the National Institute of Optics and the school of Vasco Ronchi had strongly steered Beatrice Crinò's scientific interests towards studies on the characterisation of aberrations in optical systems and on the limits of resolution of photographic emulsions, a subject of particular interest for aerial photographic reconnaissance and the new photogrammetric techniques that were being developed in Florence at the Military Geographical Institute. For the rest of her life, Beatrice would always try to use the time left free from her teaching commitments to pursue the research and studies that so interested her. Her studies on optical aberrations conducted in 1933 during her fellowship using the "Ronchi rulings" were mentioned in a review written much later by Ronchi himself on Applied Optics<sup>13</sup>. Ronchi acknowledges that we owe the complete treatment of spherical aberration detectable

seguito a vincita di concorso, insegnante di ruolo sulla cattedra di Matematica e Fisica del fiorentino liceo Scientifico “Leonardo da Vinci”<sup>11</sup>. Manterrà questa posizione fino al suo precoce pensionamento, per motivi di salute.

A Firenze può completare il suo secondo percorso di studi: nell’aprile 1937 è di nuovo iscritta all’Università fiorentina come studentessa fuori corso della Facoltà di Chimica pura. Risulta un *cursus* rapidissimo, avendo verosimilmente già superato tutti gli esami nei precedenti Atenei, e nel giugno dello stesso 1937, all’età di 24 anni, prende la sua seconda laurea, stavolta in Chimica, discutendo una tesi dal titolo “*Leghe argento manganese*” e preparando inoltre una tesina sulla “*Chimica Fisica delle macromolecole*”<sup>12</sup>. Approvata anche stavolta con la massima votazione (110/110 e lode), si impegna subito a superare l’esame per l’abilitazione alla professione di Chimico.

L’anno trascorso con la borsa di studio all’Istituto Nazionale di Ottica e la scuola di Vasco Ronchi avevano fortemente indirizzato gli interessi scientifici di Beatrice Crinò verso gli studi sulla caratterizzazione delle aberrazioni dei sistemi ottici e sui limiti di risoluzione delle emulsioni fotografiche, argomento quest’ultimo di particolare interesse per la ricognizione aerea fotografica e le nuove tecniche fotogrammetriche che si stavano sviluppando a Firenze presso l’Istituto Geografico Militare. Beatrice, per il resto della sua vita, cercherà sempre di impiegare il tempo lasciatole libero dagli impegni dell’insegnamento per proseguire le ricerche e gli studi che tanto la interessavano. I suoi studi sulle aberrazioni ottiche condotti nel 1933 durante la borsa di studio utilizzando i “reticoli Ronchi” sono stati citati in un articolo di rassegna scritto molto dopo

by the shape of the fringes produced by the rulings to the studies by Raffaello Brusciaglioni<sup>14</sup>, Giulio Calamai<sup>15</sup> and Beatrice Crinò.

In around 1938, interest in the study of the resolving power of photographic emulsions developed at the Institute of Optics for the reasons already mentioned. Brusciaglioni had developed a device called a “resolvimeter” which, using a Young’s interferometer, allowed the production of fringes in monochromatic light of varying width, with which to illuminate the sensitive emulsions he wanted to measure the resolving power. However, the use of emulsions for photographic purposes is essentially in white light. This is why, in order to extend Brusciaglioni’s studies, Beatrice Crinò resorted to a simple optical assembly using a Ronchi ruling illuminated by an optic diaphragm in its central part. In the interferogram, in the part coupled with the diaphragm area, only the interference between -1 and +1 is observed, i.e.: the sum of two plane waves, whose intensity distribution (fringes) is governed only by position and is practically independent of the wavelength. With this device, Beatrice Crinò was able to study the resolving power of certain photographic emulsions as a function of wavelength in both white and monochromatic light. She found that the emulsions had the highest resolving power in white light obtained in violet monochromatic light. The result is easily explained by the fact that the emulsions used at the time were mainly sensitive to the violet part of the spectrum.

The Italian government joined the war in June 1940 and national industry was asked for a renewed production effort. In a letter to her sister, Beatrice reported that she had a successful meeting with the Naval Weapons Office at the Galileo workshops in Florence, where

dallo stesso Ronchi su *Applied Optics*<sup>13</sup>. In particolare Ronchi riconosce che si deve agli studi di Raffaello Brusaglioni<sup>14</sup>, Giulio Calamai<sup>15</sup> e Beatrice Crinò la trattazione completa dell'aberrazione sferica rilevabile dalla forma delle frange prodotte dai reticoli.

Intorno al 1938 all'Istituto di ottica si sviluppò l'interesse per lo studio del potere risolvante delle emulsioni fotografiche per i motivi a cui abbiamo accennato. Brusaglioni aveva sviluppato un apparecchio, detto "risolvimetro", che, utilizzando un interferometro di Young, consentiva di produrre frange in luce monocromatica di larghezza variabile con cui illuminare le emulsioni sensibili di cui si voleva misurare il potere risolvante. Tuttavia l'impiego delle emulsioni per scopi fotografici è essenzialmente in luce bianca. Per questo motivo Beatrice Crinò, per estendere gli studi di Brusaglioni, ricorse ad un semplice montaggio ottico che utilizzava un reticolo Ronchi illuminato da un'ottica diaframmata nella sua parte centrale. Nell'interferogramma, nella parte coniugata con la zona diaframmata, si osserva solo l'interferenza tra gli ordini -1 e +1, ovvero la somma di due onde piane, la cui distribuzione di intensità (frange) è regolata solo dalla posizione ed è praticamente indipendente dalla lunghezza d'onda. Con questo dispositivo Beatrice Crinò ha potuto studiare il potere risolutivo di alcune emulsioni fotografiche in funzione della lunghezza d'onda sia in luce bianca, che in quella monocromatica, trovando che le emulsioni presentavano in luce bianca il potere risolutivo massimo ottenuto in luce monocromatica violetta. Il risultato è facilmente spiegabile essendo le emulsioni usate allora soprattutto sensibili alla parte violetta dello spettro.



Figura 5. Beatrice Crinò nel 1937 al tempo della sua seconda laurea in chimica.

Figure 5. Beatrice Crinò in 1937, at the time of her second degree in chemistry.





Figura 6. Il risolvimetro interferenziale progettato da Raffaello Bruscaaglioni. Lo strumento è ancora conservato, funzionante, all'Istituto Nazionale di Ottica. Foto P. Mazzinghi. Cortesia INO-CNR.

Figure 6. The interferential resolvimeter designed by Raffaello Bruscaaglioni. The instrument is still preserved, in working order, at the National Institute of Optics. Photo P. Mazzinghi. Courtesy INO-CNR.

she was commanded by the Ministry of National Education and was apparently assigned to the optical design offices for war supplies. She only stayed there until December of that year, when she asked, and was granted, a transfer to the Galileo plant in Milan. This work experience, however, soon came to an end. She resigned in February to marry Guglielmo Righini, to whom she had been engaged since the previous year, on 12 March 1941. The couple had two children, Alberto (b. 1942), who went on to become an astronomer, and Giovanna (1946-96), an astronomer and later an economist.

Guglielmo Righini, an astronomer at the Arcetri Observatory and its future director, did his active military service in Sardinia, but even after his discharge he stayed on the island, much to the chagrin of the then director Giorgio Abetti, in order to maintain his commitments as lecturer at the University of Cagliari, where he had taught Astronomy and Theoretical Physics since his military service. Consequently, Beatrice and Guglielmo moved to Sardinia until the end of the 1940-41 academic year. They then returned to Florence at the end of their lessons, first to a house near the Leonardo Da Vinci high school, then, when life in the city became difficult due to the war, to the house in the Arcetri district reserved for the First Astronomer. Unfortunately, the wartime hardships weakened Beatrice's health and forced her to spend a long time in hospital from 1946 to 1949. In March 1949, temporarily cured, she was able to return home and resume her attendance of the National Institute of Optics, also continuing her research in optics and chemistry, as she had been dismissed from teaching for health reasons. The results obtained are published in the papers of the "Giorgio Ronchi" foundation, in the most prestig-

Nel giugno 1940 il governo italiano entra in guerra e quindi all'industria nazionale viene chiesto un rinnovato sforzo produttivo. In una lettera alla sorella, Beatrice comunica di avere avuto un incontro positivo con l'ufficio Armi Navali presso le officine Galileo di Firenze, dove viene comandata dal Ministero dell'Educazione Nazionale e sembra che fosse stata assegnata agli uffici di progettazione ottica per le forniture belliche. Vi resta solo fino a dicembre di quell'anno, quando chiede, ed ottiene, di essere trasferita negli impianti Galileo di Milano, ma quell'esperienza lavorativa si conclude presto: si licenzia già a febbraio per sposarsi, il 12 marzo 1941, con Guglielmo Righini col quale era fidanzata dall'anno precedente. Dal matrimonio nasceranno Alberto (1942), astronomo, e Giovanna (1946-96), astronoma ed in seguito economista.

Guglielmo Righini, astronomo presso l'Osservatorio di Arcetri e suo futuro direttore, aveva svolto in Sardegna il servizio militare attivo, ma anche dopo il congedo si era trattenuto nell'isola, con grande disappunto dell'allora direttore Giorgio Abetti, per mantenere i suoi impegni di docente incaricato all'Università di Cagliari, presso cui insegnava Astronomia e Fisica teorica già da militare. Per questo motivo Beatrice e Guglielmo si trasferiscono in Sardegna fino alla fine dell'anno accademico 1940-41. Tornano poi a Firenze alla fine delle lezioni, prima in una abitazione vicino al liceo Leonardo Da Vinci, poi, quando la vita in città diviene difficile per gli eventi bellici, nella casa posta nel comprensorio in Arcetri e riservata al Primo Astronomo. Purtroppo le privazioni legate al periodo bellico hanno indebolito l'organismo di Beatrice e la costringono a una lunga degenza ospedaliera dal 1946 al 1949. Nel marzo 1949, temporaneamente guarita, può tornare a casa e così ripren-

ious French astronomy journal, the *Annales d'Astrophysique*, and in the magazine *Il Nuovo Cimento*, between 1950 and 1953. These works are quite different in character from the first publications that were part of her collaboration with the Institute of Optics. The three publications in the *Annales d'Astrophysique* show a full command of the mathematics associated with physical optics and diffraction theory, and deal with the problem of determining the instrumental profile of high-resolution spectrographs, such as that of the Solar Tower of the Arcetri Observatory, which were used at the time to study the absorption profiles of the lines of the solar spectrum; in the work in the journal of the Italian Physics Society, she explores issues relating to Van Der Waals forces that are probably linked to topics dealt with in her studies of chemistry. So far, it has been possible to reconstruct a dozen of her publications, including those in French mentioned above, as listed below.

Unfortunately, as time went by, Beatrice Crinò's health deteriorated and she passed away, in her early 40s, on 22 April 1954 in Rome, while being admitted to a specialised clinic.

Thanks go to Fioranna Salvadori, Fabio Silari and Manila Soffici, of the Historic Archive of the University of Florence, for their helpfulness and competent cooperation.

dere a frequentare l'Istituto Nazionale di Ottica, proseguendo anche le sue ricerche di ottica e di chimica, poiché era stata congedata dall'insegnamento per motivi di salute. I risultati ottenuti sono pubblicati sugli atti della fondazione "Giorgio Ronchi", sulla più prestigiosa rivista francese di astronomia, gli *Annales d'Astrophysique*, e sulla rivista *Il Nuovo Cimento*, tra il 1950 e il 1953. Questi lavori hanno un carattere ben diverso dalle prime pubblicazioni fatte nell'ambito della sua collaborazione con l'Istituto di Ottica. Le tre pubblicazioni sugli *Annales d'Astrophysique* mostrano una piena padronanza della matematica connessa con l'ottica fisica e con la teoria della diffrazione, e riguardano il problema della determinazione del profilo strumentale degli spettrografi ad alta risoluzione, come quello della Torre Solare dell'Osservatorio di Arcetri, che si utilizzavano a quel tempo per studiare i profili di assorbimento delle righe dello spettro solare; nel lavoro sul giornale della Società Italiana di Fisica approfondisce questioni relative alle forze di Van Der Waals verosimilmente legate ad argomenti trattati nei suoi studi di chimica. Fino ad adesso è stato possibile ricostruire una dozzina di sue pubblicazioni, comprese quelle in francese ricordate sopra, e la cui lista è riportata più sotto.

Sfortunatamente, col tempo, la salute di Beatrice Crinò peggiora e lei viene a mancare, poco più che quarantenne, il 22 aprile 1954 a Roma, durante il ricovero in una clinica specializzata.

Si ringraziano Fioranna Salvadori, Fabio Silari e Manila Soffici, dell'Archivio Storico dell'Università di Firenze, per la disponibilità e per la competente collaborazione.

## Notes

<sup>1</sup> See, among the other documents: *Archivio Storico dell'Università degli Studi di Firenze* (ASUF), 1931, filza 598, file 1.

<sup>2</sup> Who, in academic year 1924-25 was enrolled in the second year of the Physics and Mathematics degree course.

<sup>3</sup> See Wikipedia, *ad vocem*: Sebastiano Crinò. (url consulted on 18-10-2021)

<sup>4</sup> Student file kept at the ASUF, filza 557, Inserto 15223, from which the subsequent information on the thesis and this curriculum of exams are also taken.

<sup>5</sup> For a review of these physicists and of Florentine physics, also in the following decades, see R. Casalbuni et al., *Lo spirito di Arcetri*, Firenze University Press, 2021.

<sup>6</sup> A clear picture of "Arcetrine" physics and its protagonists also emerges from the words of Bruno Rossi in: A. Bonetti, M. Mazzoni, *L'Università degli Studi di Firenze nel centenario della nascita di Giuseppe Occhialini*, Firenze University Press, 2007, p. 79 et seq. Rossi remembers, among other collaborators, also Beatrice Crinò.

<sup>7</sup> Private correspondence, Alberto Righini Archive, from which the documents mentioned later on also originate.

<sup>8</sup> Unexpectedly, the presence of women on the Physics Degree Course was not marginal. In the first decade of Physics and Mathematics degrees (a. y. 1928-29 – a. y. 1937-38) there were 40 graduates: 18 of whom, almost half, were women (Florence University Yearbooks, ASUF).

## Note

<sup>1</sup> Si veda, tra gli altri documenti: *Archivio Storico dell'Università degli Studi di Firenze* (ASUF), anno 1931, filza 598, fasc. 1.

<sup>2</sup> Che nell'a. a. 1924-25 risulta iscritto al II anno del corso di laurea in Fisica e Matematica.

<sup>3</sup> Vedi Wikipedia, ad vocem: Sebastiano Crinò. (url consultata il 18-10-2021)

<sup>4</sup> Fascicolo *studente* conservato presso l'ASUF, Filza 557, Inserto 15223, dal quale sono tratte anche le successive informazioni sulla tesi e su questo curriculum degli esami.

<sup>5</sup> Per una rassegna di questi fisici e della fisica fiorentina, anche dei decenni seguenti, si veda R. Casalbuoni et al., *Lo spirito di Arcetri*, Firenze University Press, 2021.

<sup>6</sup> Un nitido affresco della fisica 'arcetrina' e dei suoi protagonisti emerge anche dalle parole di Bruno Rossi in: A. Bonetti, M. Mazzoni, *L'Università degli Studi di Firenze nel centenario della nascita di Giuseppe Occhialini*, Firenze University Press, 2007, p. 79 e seguenti. Rossi ricorda, tra gli altri collaboratori, anche Beatrice Crinò.

<sup>7</sup> Corrispondenza privata, Archivio Alberto Righini, dal quale provengono anche i carteggi citati più avanti.

<sup>8</sup> Inaspettatamente, la presenza femminile al Corso di Laurea in Fisica non fu marginale. Nel primo decennio di lauree in Fisica e in Fisica e Matematica (a. a. 1928-29 – a. a. 1937-38) si contano 40 laureati: di questi, ben 18, ossia quasi la metà, sono donne (Annuari Università di Firenze, ASUF).

<sup>9</sup> In effetti Emo Capodilista risulta Assistente incaricato a Fisica dall'anno accademico 1932-33 a quello 1934-35.

<sup>10</sup> La legge 1264 del giugno 1927 obbligava chi voleva esercitare la professione di optometrista al possesso di una «licenza di abilitazione», rilasciata da apposite scuole specializzate. L'Istituto di Ronchi era praticamente l'unica scuola del genere in Italia, o almeno una delle pochissime.

<sup>9</sup> In fact, Emo Capodilista was appointed to the post of Physics Assistant from academic year 1932-33 to 1934-35.

<sup>10</sup> Law 1264 of June 1927 obliged anyone wishing to pursue the profession of optometrist to possess a "licence of qualification", issued by a special school. The Ronchi Institute was practically the only school of its kind in Italy, or at least one of very few.

<sup>11</sup> It had been established in 1923, and was one of the first scientific high schools in Italy.

<sup>12</sup> Student file kept at the ASUF, filza 618, Insert 16730.

<sup>13</sup> Ronchi, V.: *Applied Optics* vol. 3, N. 4, pages 437-451.

<sup>14</sup> Enrolled in Physics and Mathematics in academic year 1924-25 after his classical studies, he took leave at the end of the two-year period to transfer to the R. Politecnico di Torino (ASUF, Register of Students' Careers, VI, p. 189).

<sup>15</sup> After graduating from Classical High School, in academic year 1924-25 he enrolled in the degree course in Mathematics at the University of Florence, but was allowed to attend the final year at the Royal School of Engineering in Pisa (ASUF, Register of Students' Careers, VII, p. 14). He graduated in Florence in December 1929.

## Publications

1) Rossi, B., Crinò, B.: *Le anomalie di assorbimento della radiazione penetrante*, Rendiconti della R. Accademia dei Lincei Classe di Scienze Fisiche, Matematiche e Naturali Vol. XV,

<sup>11</sup> Era stato istituito nel 1923, e fu uno dei primi licei scientifici d'Italia.

<sup>12</sup> Fascicolo *studente* conservato presso l'ASUF, Filza 618, Insetto 16730.

<sup>13</sup> Ronchi, V.: *Applied Optics* vol. 3, N. 4, pagg. 437-451.

<sup>14</sup> Iscritto a Fisica e Matematica nell'a. a. 1924-25 dopo gli studi classici, alla fine del biennio si congeda per trasferirsi al R. Politecnico di Torino (ASUF, Registro delle carriere degli studenti, VI, p. 189).

<sup>15</sup> Conseguita la Maturità Classica, nell'a.a. 1924-25 si iscrive al Corso di laurea in Matematica dell'Ateneo fiorentino, ma ottiene di frequentare l'ultimo anno presso la R. Scuola di Ingegneria di Pisa (ASUF, Registro delle carriere degli studenti, VII, p. 14). Infine si laurea a Firenze nel dicembre 1929.

## Pubblicazioni

- 1) Rossi, B., Crinò, B.: *Le anomalie di assorbimento della radiazione penetrante*, Rendiconti della R. Accademia dei Lincei Classe di Scienze Fisiche, Matematiche e Naturali Vol. XV, serie 6, 1 sem. fasc. 9 - Roma, Maggio 1932 - X
- 2) Crinò, B.: *Sulla misura dell'aberrazione sferica, coma e astigmatismo mediante frange d'ombra erta-assiali ottenute con reticoli rettilinei*, Bollettino sull'associazione Ottica Italiana Dicembre 1933 - XII
- 3) Crinò, B.: *Limiti teorici alla realizzazione della cinematografia stereoscopica*, "Ottica", Rivista dell'Associazione Ottica Italiana n. 3-4, Luglio-Ottobre 1936 - XIV
- 4) Crinò, B.: *Sul potere risolutivo delle emulsioni sensibili in luce bianca*, "Ottica",

serie 6, 1 sem. fasc. 9 - Rome, May 1932 - X

- 2) Crinò, B.: *Sulla misura dell'aberrazione sferica, coma e astigmatismo mediante frange d'ombra erta-assiali ottenute con reticoli rettilinei*, Bollettino sull'associazione Ottica Italiana December 1933 - XII
- 3) Crinò, B.: *Limiti teorici alla realizzazione della cinematografia stereoscopica*, "Ottica", Rivista dell'Associazione Ottica Italiana n. 3-4, July-October 1936 - XIV
- 4) Crinò, B.: *Sul potere risolutivo delle emulsioni sensibili in luce bianca*, "Ottica", Rivista dell'Associazione Ottica Italiana n. 4, October 1938 - XVII
- 5) Crinò, B.: *Nuovi Risultati nello studio analitico delle frange d'ombra ottenute per interferenza di onde aberranti*, "Ottica", Rivista dell'Associazione Ottica Italiana n. 2, April 1939 - XVII
- 6) Crinò, B.: *Un'equazione dei diagrammi di Potere Risolutivo delle emulsioni fotografiche*, "Ottica", Rivista dell'Associazione Ottica Italiana n. 2, April 1939 - XVII
- 7) Crinò, B.: *Il Mesotrone*, Atti Società Italiana Mathesis, 1940 - XVIII, n. 1
- 8) Righini Crinò, B.: *Sulle forze molecolari*, "Il Nuovo Cimento", Serie nona, Vol III N. 6, December 1946
- 9) Righini Crinò, B.: *L'influence de la largeur de la fente du spectrographe sur la répartition d'énergie du Spectre continu*, Ann. Astrophys. Tome 14, Fascicule 1, Janvier - Mars 1951
- 10) Righini Crinò, B.: *L'influence de la largeur de la fente du spectrographe sur la répartition d'énergie du Spectre continu (II)*, Ann. Astrophys. Tome 14, Fascicule 2 - Mai - Juin 1951
- 11) Righini Crinò, B.: *L'influenza dei fenomeni di diffrazione della fenditura dello spettrografo*

- Rivista dell'Associazione Ottica Italiana n. 4, Ottobre 1938 - XVII
- 5) Crinò, B.: *Nuovi Risultati nello studio analitico delle frange d'ombra ottenute per interferenza di onde aberranti*, "Ottica", Rivista dell'Associazione Ottica Italiana n. 2, Aprile 1939 - XVII
  - 6) Crinò, B.: *Un'equazione dei diagrammi di Potere Risolutivo delle emulsioni fotografiche*, "Ottica", Rivista dell'Associazione Ottica Italiana n. 2, Aprile 1939 - XVII
  - 7) Crinò, B.: *Il Mesotrone*, Atti Società Italiana Mathesis, anno 1940 - XVIII, n. 1
  - 8) Righini Crinò, B.: *Sulle forze molecolari*, "Il Nuovo Cimento", Serie nona, Vol III N. 6, Dicembre 1946
  - 9) Righini Crinò, B.: *L'Influence de la largeur de la fente du spectrographe sur la répartition d'énergie du Spectre continu*, Ann. Astrophys. Tome 14, Fascicule 1, Janvier - Mars 1951
  - 10) Righini Crinò, B.: *L'Influence de la largeur de la fente du spectrographe sur la répartition d'énergie du Spectre continu (II)*, Ann. Astrophys. Tome 14, Fascicule 2 - Mai - Juin 1951
  - 11) Righini Crinò, B.: *L'influenza dei fenomeni di diffrazione della fenditura dello spettrografo sulla intensità delle righe spettrali*, Atti della Fondazione G. Ronchi, Anno VII - N. 4 - Luglio Agosto 1952
  - 12) Righini Crinò, B.: *Détermination du pouvoir réservant d'un spectrographe au moyen de raies d'absorption et de raies d'émission*, Annales d'Astrophysique, Vol 16, Gennaio 1953

*sulla intensità delle righe spettrali*, Atti della Fondazione G. Ronchi, Year VII - N. 4 - July August 1952

- 12) Righini Crinò, B.: *Détermination du pouvoir réservant d'un spectrographe au moyen de raies d'absorption et de raies d'émission*, Annales d'Astrophysique, Vol 16, January 1953

Massimo Mazzoni, astronomer, was a researcher at the Department of Physics and Astronomy at the University of Florence. He worked, from its construction, on the European interferometric antenna Ego Virgo - INFN for the detection of gravitational waves, and also directed the XUV spectroscopy laboratory at the Arcetri Astrophysical Observatory for the measurement of stellar parameters. He maintains an interest in the history of Italian Physics and Astronomy of the 19<sup>th</sup> and 20<sup>th</sup> centuries.

Alberto Righini, astronomer in the Astronomical Observatories, then assistant professor and associate professor of astronomical subjects at the Department of Physics and Astrophysics of the University of Florence. He dealt with the problems associated with the high spatial resolution observation of the Sun and studied the observational evidence of the modulation of energy transport in the different physical conditions of the solar atmosphere.

He has collaborated extensively on university education programmes for the school system and has studied the scientific and political life of Galileo Galilei. He has written a book on this subject and held several conferences in Italy and abroad.

Massimo Mazzoni, astronomo, è stato ricercatore al Dipartimento di Fisica e Astronomia dell'Università di Firenze. Ha collaborato fin dalla sua costruzione all'antenna interferometrica europea Ego Virgo – Infn per la rivelazione delle onde gravitazionali, ed ha anche diretto il laboratorio di spettroscopia XUV dell'Osservatorio Astrofisico di Arcetri per la misura di parametri stellari. Si interessa alla storia della Fisica e dell'Astronomia italiane dei secoli XIX e XX.

Alberto Righini, astronomo nei ruoli degli Osservatori Astronomici, poi assistente Universitario e Professore Associato di materie astronomiche presso il Dipartimento di Fisica ed Astrofisica dell'Università di Firenze. Si è occupato dei problemi connessi con l'osservazione ad alta risoluzione spaziale del Sole e ha studiato le evidenze osservative della modulazione del trasporto dell'energia nelle diverse condizioni fisiche dell'atmosfera solare.

Ha collaborato ampiamente a programmi universitari di didattica verso il sistema scolastico e si è interessato allo studio della vicenda scientifica e politica di Galileo Galilei. Su questo argomento ha scritto un libro e tenuto diverse conferenze in Italia e all'estero.

Piero Mazzinghi, laureato in Fisica nel 1976. Dal 1977 è stato presso il CNR, Istituto di Elettronica Quantistica. Dal 1998 è stato con l'Istituto Nazionale di Ottica, come Dirigente di Ricerca e responsabile del gruppo "Ottica Aerospaziale ed Ambientale". Dal 2007 al 2015 è stato Addetto Scientifico in Svezia, con incarico per Norvegia ed Islanda.

Piero Mazzinghi graduated in Physics in 1976. A researcher at the CNR, Institute of Quantum Electronics from 1977, from 1998, he was with the National Institute of Optics, as Research Director and head of the "Aerospace and Environmental Optics" group. From 2007 to 2015, he was Scientific Attaché in Sweden, with assignments for Norway and Iceland.

# Topological properties of gauge theories and their applications to high-energy and condensed-matter physics

Arcetri, August 23 - October 01, 2021

Organizers:

Francesco Benini (SISSA, Trieste)

Andrea Cappelli (INFN, Florence)

Zohar Komargodski (Stony Brook University)

Shinsei Ryu (Princeton University)

Ashvin Vishwanath (Harvard University, Cambridge)

Paul Wiegmann (University of Chicago)

**Abstract.** Many remarkable properties of gauge theories rely on the topology of field configurations and/or ambient spacetime and are connected with quantum anomalies and nonperturbative excitations. These often exact properties have many implications on the physics of fundamental interactions, condensed matter systems and statistical mechanics models. They also account for a large part of the investigations in string theory and, combined with supersymmetry, have led to exact solutions of low-energy theories and the discovery of duality relations between supersymmetric gauge theories. The goal of this GGI activity has been that of bringing together theoreticians from different backgrounds, in condensed matter, high energy and mathematical physics, and encouraging discussion and collaboration.

**Keywords.** Quantum field theory anomalies, topological excitations, topological states of matter, field theory dualities.

## Context

A renewed interest in topological aspects has emerged from condensed matter physics in recent years, through the study of topological phases of quantum matter. Their low-energy properties are not determined by the behaviour of the local order parameter but follow by the presence of global effects and massless boundary excitations. The bulk features can be described by topological gauge theories and the boundary excitations by relativistic effective theories. In the simplest case, boundary excitations are massless fermions and their quantum anomalies provide a robust characterization. Topological invariant quantities, associated to the anomalies and taking integer values, classify the possible phases. In the case



of interacting states and boundary excitations, the classification is not yet understood and this has led to intense investigations of topological theories and global anomalies. These studies have come in relation to independent analyses of the low-energy phases of supersymmetric theories, in three spacetime dimensions in particular, and their non-perturbative duality relations. Other researches into the properties of extended objects, like Wilson loops and defects, carried out over the last five to six years, have also found an interplay. These interdisciplinary research connections have led to substantial progress which continues today.

## Topics

- Anomalies of quantum field theories
- Generalized symmetries
- Topological aspects of quantum states in condensed matter
- (Supersymmetric) dualities in (2+1)-dimensions
- Time-reversal symmetry and 4d theta-terms

## Scientific activity

The workshop was run in dual mode, in presence and online. Thanks to the GGI audio-video facilities, all seminars and lectures were broadcast on Zoom. A discussion channel was also set up on the Slack platform.

The scientific activity was broadly divided in three two-week sections.

Weeks 1-2: topological phases of matter; weeks 3-4: symmetries and anomalies; weeks 5-6: dualities, supersymmetry, bosonization.

Each week, a two-hour lecture was delivered by key participants, either in-person or online, to introduce the themes. These lectures were also meant to present the subjects to a broader audience that usually participates in the conference associated with the workshop, which could not be organized due to COVID.

The schedule involved an average of two seminars a day plus informal discussions and lectures, which were planned rather spontaneously following debates among participants. Speakers and topics of the informal sessions included: A. Cappelli and C. Mudry (classification of topological phases of matter) J. Viti (entanglement in quantum field theory), P. Nair and P. Putrov (global anomalies and cobordism), P. Wiegmann, P. Nair and A. Abanov (hydrodynamic approaches), M. Bertolini and D. Delmastro (phases of supersymmetric gauge theories), D. Brennan (higher-form symmetries). These informal off-the-record discussions were particularly appreciated by participants.

## Attendance and funding

This workshop was the first in-person GGI activity after the break of over a year due to COVID. It began on August 23, 2021 and lasted six weeks. There were 50 in-person participants in total, most of them came for two weeks, but there also were longer stays. The average participation was 20 people per week. There were about 25 online participants, attending and presenting lectures and seminars. These should be considered as very successful figures given the circumstances: many planned participations were cancelled due to travel restrictions. We actually received more than 100 applications, but many did not come.

Four distinguished scientists attended the workshops for an extended period, supported by the Simons Foundation: Alexander Abanov (Stony Brook Univ, USA), Riccardo Argurio (ULB, Bruxelles), Christopher Mudry (PSI, Villigen, Switzerland) and Parameswaran Nair (City College, New York, USA). Among the organizers, Andrea Cappelli (INFN, Florence) stayed for six weeks, Francesco Benini (Sissa, Trieste) for four weeks and Paul Wiegmann (Chicago University, USA) for two weeks. Another participant, Shinsei Ryu (Princeton University, USA) could not come but attended all the online activities throughout the six weeks.

From the point of view of logistics, everything went smoothly thanks to the excellent support by the GGI staff. The COVID sanitary precautions were very carefully implemented. A social dinner was held every week at a nearby open-air restaurant, which helped welcome the new arrivals and socialize in an informal setting.

## Final remarks

Altogether, we believe the workshop was very successful at scientific level. The participants really enjoyed meeting and talking to each other in person again after many difficult months. Many were young researchers and postdocs who had the opportunity to present their work and learn new topics from various communities. Video recordings, slides and other complementary material stored in the Slack channel (notes and papers of informal discussions) provide a valuable source of information on this field of current research.





Il Colle di  
Galileo

# Gravitational scattering, inspiral, and radiation

Florence, 19/04 - 21/05 2021

Organizers:

Dimitri Colferai (University of Florence)

Claudia de Rham (Imperial College, London)

Alessandro Nagar (INFN, Turin)

Donal O'Connell (University of Edinburgh)

Pierre Vanhove (CEA, Saclay)

Gabriele Veneziano (CERN)

Alexander Zhiboedov (CERN)

**Abstract.** The workshop gathered theorists working on different though connected areas concerning the recent discovery of gravitational waves. It fostered new collaborations between the quantum gravitational scattering amplitude and the general relativity community, leading to the calculation of new, high-order, terms in the post-Newtonian and post-Minkowskian perturbative approaches to the physics of binary systems, at both analytical and numerical level, in order to construct the waveform templates necessary for the analysis of LIGO/Virgo data. The use of recent progress on gravitational scattering and radiation in ultra-relativistic collisions of elementary particles or strings improved the determination of parameters appearing in the effective-one-body approach to the relativistic two-body problem. Various consequences of modified gravity theories for the LIGO/Virgo discoveries were also explored.

**Keywords.** Gravitational waves, numerical relativity, perturbative calculations, string theory, modified theories of gravity.

## Topic and context

The remarkable recent detection of gravitational waves from the coalescence of two black holes or of two neutron stars, as well as of the electromagnetic radiation in the latter case, began a new era in astrophysics. Prospects for the future are very bright: after the upgrade of LIGO and VIRGO, and with the addition of other earth-based interferometers such as KAGRA by the end of 2019, gravitational wave astronomy will enter a precision era. In the more distant future, LISA will detect many more sources in a very interesting lower-frequency range.

The interplay between theory and observations, which has already had a major impact on gravitational wave theory and on the proper interpretation of gravitational wave data, is very important to this end. Interpretation rests on the construction of accurate gravitational waveform models for coalescing relativistic binaries. This construction was enabled by foundational progress in numerical

relativity and in analytical general relativity, with particular regard to perturbative approximations and the effective-one-body formalism, which mutually enrich one another.

## Motivations

The discoveries stemming from the observation and interpretation of gravitational waves will have a profound impact on fundamental theoretical physics. As with the standard model of particle physics, precision future observations demand similarly precise theoretical predictions. So we believe that the theory community will increasingly turn to the problem of calculating detailed predictions of general relativity, and to test it against alternative theories.

The aim of the workshop was to bring together theorists working in different – yet related – areas of theoretical gravitational physics. In particular, we aimed to:

- deepen links and foster new collaborations between the quantum gravitational scattering amplitude and the classical general relativity communities, that will lead to the calculation of new terms in the post-Newtonian and post-Minkowskian perturbative approaches to the physics of binary systems;
- identify new synergies between the general relativity analytical and numerical communities, which have already proved crucial in providing the reliable waveform templates needed for the analysis of LIGO/VIRGO data;
- use recent progress on gravitational scattering and radiation in ultra-relativistic collisions of elementary particles or strings to improve the determination of parameters appearing in the effective-one-body approach to the relativistic two-body problem;
- connect properties of the gravitational wave spectrum at low frequencies to recent developments in soft-graviton theorems at sub- and sub-sub-leading level, including predictions for gravitational memory, Bondi-Metzner-Sachs asymptotic symmetries, and logarithmic enhancements;
- explore various consequences of modified gravity theories for the LIGO/VIRGO present and future observations.

## Results

The first part of the event was a “training week”, in which several experts provided a pedagogical introduction to the main topics addressed during the workshop, for the benefit of students, young researchers and those working in different fields. An average 30 participants attended each training lecture.

The second part of the event hosted the “Conference week”, with the delivery of 20 talks by eminent scientists. The conference was opened by the three recipients of the 2021 Galileo Medal, Alessandra Buonanno, Thibault Damour and Frans

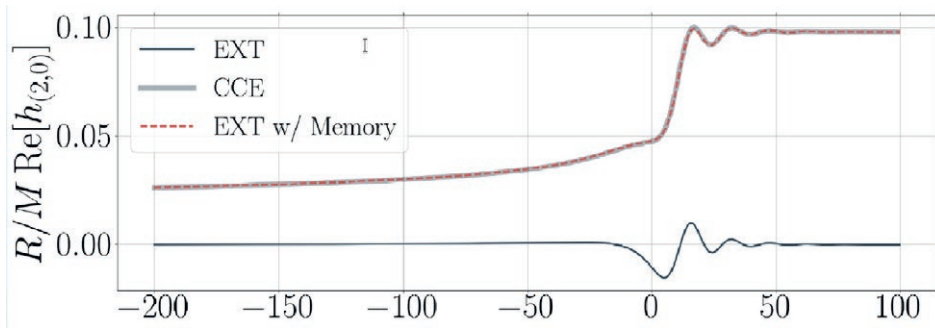


Figure 1. Gravitational waves produced by the coalescence of two black holes: the black curve represents the wave without memory effect. The red-dashed curve includes the memory effect, which amounts in a residual offset of the metric coefficients.

Pretorius, who gave their own appreciation of the state of the art and challenges in their respective domains. The average attendance during the conference was of about 70 participants.

The workshop took place over the last three weeks. It was attended by over 110 scientists from numerous countries around the world. Every day ended with a lively and often long discussion.

Much of the first week was devoted to analysing the connection of the so-called “infrared triangle”, which relates asymptotic symmetries, soft theorems and memory effects in gravity. Advances in this field were the extension of the concept of asymptotic symmetries to time-like infinity and its role in the definition of angular momentum in general relativity, as well as the extension of the concept of gravitational memory to string-string interactions. The second week focused on the relativistic two-body problem. An important relationship between the scattering (i.e.: unbound or hyperbolic) and the inspiral (i.e.: bound or elliptic) problem was presented. Another central topic was the connection between scattering amplitudes and classical general relativity methods. In the approximation that neglects the radiation of waves, the effective Hamiltonians were derived at high perturbative levels both in the post-Newtonian and post-Minkowskian expansion. This allows accurate determination of the orbit when gravity is strong. Some studies took into account the radiation process, regarding the contributions of radiation reaction to elastic processes, as well as describing the calculation of the gravitational wave-forms emitted in inspiralling orbits.

In the last week, various efficient loop techniques were presented, in order to calculate gravitational observables both at conservative (without radiation) and dissipative (with gravitational waves) levels. Some of these studies also involved the connection between gauge theories and gravity, with emphasis on particle scattering off a large black hole at small impact parameters; lastly, very recent work on tidal deformations and dissipation of rotating black holes was present-

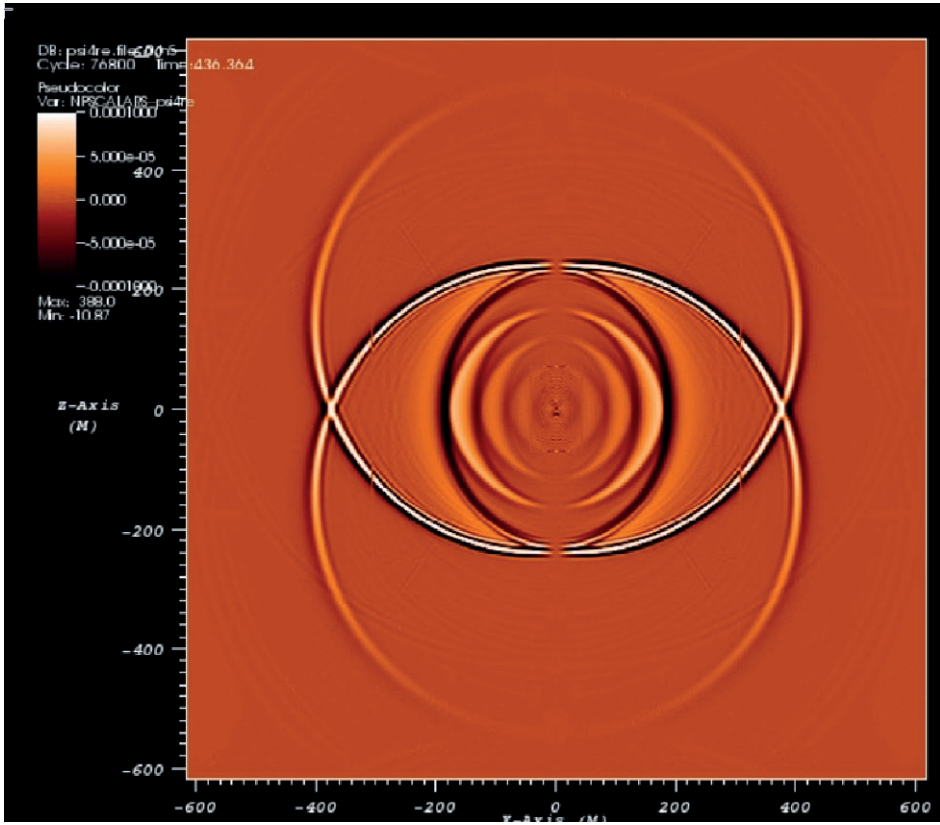


Figure 2. Numerical simulation of the metric deformation following a head-on black hole collision. In the central region, the event horizon of the resulting black hole is visible. On the edges, the expanding shock-wave originated from the collision.

ed. Most of the analyses were performed in “conventional” general relativity and quantum-field theory. However, many aspects were also considered in alternative theories of gravity, trying to identify observational signatures of deviation from the standard predictions.

The workshop ended with a long, lively and informative discussion entitled “Inspiralling Discussion Around the Two-Body problem”. At the end, the suggestion was made – given the vitality of this rapidly developing subject – to update the situation with a new edition of the workshop in a couple of years. A year after the end of the workshop, dozens of papers originating (or benefiting greatly) from it have already appeared. We expect many more to follow.



Il Colle di  
Galileo

# La ricerca della vita nel Sistema Solare passa attraverso il Laboratorio di Astrobiologia dell'INAF-Osservatorio Astrofisico di Arcetri

*The search for life in the Solar System passes through the Astrobiology Laboratory of the INAF-Arcetri Astrophysical Observatory*

Teresa Fornaro, John Robert Brucato  
INAF-Osservatorio Astrofisico di Arcetri, Firenze

**Sommario.** L'attività scientifica del Laboratorio di Astrobiologia dell'Osservatorio Astrofisico di Arcetri spazia dalla ricerca sull'origine della vita, a simulazioni di processi rilevanti da un punto di vista astrobiologico, ricerca di tracce di vita nel Sistema Solare, sviluppo di tecnologie per l'esplorazione planetaria, fino all'analisi di campioni extraterrestri riportati sulla Terra e sviluppo di metodologie di protezione planetaria e strutture per la curatela di campioni extraterrestri.

**Parole chiave.** Astrobiologia, rilevamento di tracce di vita, biofirme, esplorazione di Marte, strumenti spaziali da volo, protezione planetaria.

**Abstract.** The scientific activity of the Astrobiology Laboratory of the Arcetri Astrophysical Observatory spans from research on the origin of life to simulations of astrobiologically relevant processes, the search for life in the Solar System and the development of planetary exploration technologies, along with the analysis of extraterrestrial samples brought back to Earth and the development of planetary protection methodologies and facilities for the curation of extraterrestrial samples.

**Keywords.** Astrobiology, life detection, biosignatures, exploration of Mars, space flight instruments, planetary protection.

Overview of the research activities and instrumentation of the Astrobiology Laboratory

The Astrobiology Laboratory of the INAF-Astrophysical Observatory of Arcetri, established by Dr. John Robert Brucato in 2010, is involved in many research projects to support the search



## Panoramica delle attività di ricerca e della strumentazione del Laboratorio di Astrobiologia

Il Laboratorio di Astrobiologia dell'INAF-Osservatorio Astrofisico di Arcetri, fondato dal Dr. John Robert Brucato nel 2010, è coinvolto in numerosi progetti di ricerca a supporto della ricerca di tracce di vita passata o presente, le cosiddette biofirme, su corpi astrobiologicamente rilevanti del Sistema Solare come il pianeta Marte.

L'obiettivo principale delle attività di laboratorio è quello di rilevare e identificare molecole organiche in questi corpi, poiché composti organici semplici costituiscono nutrienti per la vita e la loro scoperta su altri corpi del Sistema Solare potrebbe rappresentare una prova cruciale di abitabilità, mentre molecole organiche complesse potrebbero rappresentare tracce reali di vita estinta/presente e fornire prove dirette di attività biologica.

Per rilevare gli organici e poter distinguere se essi derivano da processi geochimici (abiotici) o biologici (biotici), il gruppo di ricerca del Laboratorio di Astrobiologia ha acquisito esperienza nella simulazione di una vasta gamma di ambienti extraterrestri (Fornaro et al., 2013a; Fornaro et al., 2013b; Fornaro et al., 2013c; Potenti et al., 2018; Fornaro et al., 2018a; Fornaro et al., 2018b; Poggiali et al., 2020; Fornaro et al., 2020; Corazzi et al., 2020; Razzell Hollis et al., 2021). Alcune delle attività principali riguardano: (i) preparazione di campioni analoghi planetari, composti da minerali e sali rappresentativi, dopati con diverse classi di composti organici, incluse possibili biofirme molecolari; (ii) trattamento dei

for traces of past or present life, the so-called biosignatures, on astrobiologically relevant bodies in the Solar System like the planet Mars.

The main objective of the laboratory activities is to detect and identify organic molecules in these bodies, as simple organic compounds constitute nutrients for life and their discovery on other bodies in the Solar System may represent crucial proof of habitability, while complex organic molecules may represent actual traces of extinct/extant life and provide direct evidence of biological activity.

To detect organics and to be see whether they originate from geochemical (abiotic) or biological (biotic) processes, the Astrobiology Laboratory research team has been gaining expertise in the simulation of a wide range of extraterrestrial environments (Fornaro et al., 2013a; Fornaro et al., 2013b; Fornaro et al., 2013c; Potenti et al., 2018; Fornaro et al., 2018a; Fornaro et al., 2018b; Poggiali et al., 2020; Fornaro et al., 2020; Corazzi et al., 2020; Razzell Hollis et al., 2021). Some of the main activities are: (i) preparation of analog planetary samples, made up of representative minerals and salts, doped with different classes of organic compounds, including possible molecular biosignatures; (ii) processing of the analog planetary samples under simulated planetary conditions to investigate stability/preservation of organic compounds and their degradation mechanisms, in order to gain insights into the possible transformation of the organics in extreme planetary conditions, more accurately define molecular targets to seek, and predict the likelihood of finding organics preserved in specific mineral matrices; (iii) characterization of analog planetary samples with techniques similar to those

campioni analoghi planetari in condizioni planetarie simulate per studiare la stabilità/preservazione dei composti organici e i loro meccanismi di degradazione, al fine di ottenere informazioni sulla possibile trasformazione degli organici in condizioni planetarie estreme, definire più accuratamente i target molecolari da cercare, e prevedere la probabilità di trovare organici preservati in specifiche matrici minerali; (iii) caratterizzazione di campioni analoghi planetari con tecniche simili a quelle a bordo delle missioni spaziali per confrontare direttamente il dataset di laboratorio con i dati di missione e aiutarne l'interpretazione.

Questi esperimenti vengono eseguiti con la strumentazione disponibile nel laboratorio che include: spettrofotometro UV, interferometro FT-IR e microscopio per spettroscopia infrarossa in trasmittanza e riflettanza, una camera ad ultra alto vuoto per la gascromatografia-spettrometria di massa, e un setup di cromatografia liquida-spettrometria di massa. In entrambi gli apparati FT-IR ed alto vuoto, è possibile riprodurre una vasta gamma di ambienti extraterrestri attraverso il controllo termico da criogenico a temperature elevate e irraggiamento UV in-situ.

La Figura 1 riporta il setup sperimentale utilizzato per eseguire l'irraggiamento di campioni analoghi con luce UV in condizioni controllate di pressione e temperatura che simulano le condizioni planetarie.

Il laboratorio è anche attrezzato per la manipolazione di meteoriti e campioni riportati sulla Terra da missioni spaziali, in conformità con i requisiti di pulizia per evitare contaminazioni organiche. La collezione del laboratorio comprende decine di minerali, molecole e meteoriti.

onboard the space missions in order to directly compare the laboratory dataset with mission data and help their interpretation.

These experiments are performed with the laboratory equipment that includes: UV spectrophotometer, FT-IR interferometer and microscope for transmission and reflectance IR spectroscopy, an Ultra-high vacuum chamber for gas chromatography mass spectrometry and a Liquid Chromatography-Mass Spectrometry setup. In both FT-IR and high vacuum apparatus, it is possible to reproduce a wide range of extraterrestrial environments through thermal control from cryogenic to high temperatures and UV in-situ irradiation.

Figure 1 shows the experimental setup used to perform irradiation of analog samples with UV light under controlled pressure and temperature, simulating planetary conditions.

The laboratory is also equipped for the manipulation and handling of meteorites and samples brought back to Earth from space missions, in compliance with cleanliness requirements to avoid organic contamination. The laboratory collection includes dozens of minerals, molecules and meteorites.

#### Scientific Support to Mars exploration rover missions

Some members of the Astrobiology Laboratory are actively participating in the NASA Mars 2020 rover mission, which took the Perseverance rover to the Jezero crater on Mars on February 18<sup>th</sup> 2021, to seek traces of past life in the remains of an ancient delta-lake system



Figura 1. Setup di irraggiamento UV presso il Laboratorio di Astrobiologia dell'Osservatorio Astrofisico di Arcetri.

Figure 1. UV irradiation setup at the Astrobiology Laboratory of the Arcetri Astrophysical Observatory.

## Supporto scientifico alle missioni robotiche di esplorazione di Marte

Alcuni membri del Laboratorio di Astrobiologia partecipano attivamente alla missione robotica della NASA Mars 2020, che ha portato il rover Perseverance

and collect samples to be brought back to Earth in subsequent space missions in cooperation between NASA and the European Space Agency (ESA) (Williford et al., 2018). In particular, the Arcetri Astrobiology laboratory provides scientific support to help with the identification of organics and their state of preservation in the samples currently under investigation by the Perseverance rover at the Jezero crater, and to assist with the selection of the best samples to collect to bring back to Earth in the future.

Another mission in which the laboratory is involved is the ESA ExoMars mission, which, for the first time ever, will explore the subsurface of Mars up to a depth of two meters, where we expect to find much better conditions for the preservation of biosignatures. In particular, some members of the Astrobiology Laboratory are co-investigators of the *Mars Organics Molecule Analyser (MOMA)* instrument, which is the key instrument on board the ExoMars Rosalind Franklin rover to detect organic molecules and possible molecular biosignatures (Goesmann et al., 2017).

## Development of technologies for planetary exploration

The activities of the Astrobiology Laboratory also support the design and technological development of space flight instruments. In particular, the laboratory is responsible for the management and functional testing of AstroBio CubeSat (ABCS), a 3U cubesat selected by ESA, which hosts a mini laboratory payload based on innovative lab-on-chip technology suitable

al cratere Jezero su Marte il 18 febbraio 2021, per cercare tracce di vita passata nei resti di un antico sistema caratterizzato dalla presenza di un lago e del delta di un fiume e raccogliere campioni da riportare sulla Terra attraverso successive missioni spaziali in cooperazione tra NASA e Agenzia Spaziale Europea (ESA) (Williford et al., 2018). In particolare, il laboratorio di astrobiologia di Arcetri fornisce supporto scientifico per aiutare l'identificazione di organici e del loro stato di preservazione nei campioni attualmente sotto investigazione dal rover Perseverance al cratere Jezero, e per assistere la selezione dei campioni più convincenti da raccogliere per il futuro ritorno sulla Terra.

Un'altra missione in cui il laboratorio è coinvolto è ExoMars dell'ESA, che esplorerà per la prima volta in assoluto il sottosuolo di Marte fino ad una profondità di due metri, dove ci aspettiamo di trovare condizioni molto migliori per la conservazione di biofirme. In particolare, alcuni membri del Laboratorio di Astrobiologia sono co-investigatori dello strumento *Mars Organics Molecule Analyser (MOMA)*, che è lo strumento chiave a bordo del rover di ExoMars Rosalind Franklin per rilevare molecole organiche e possibili biofirme molecolari (Goesmann et al., 2017).

### Sviluppo di tecnologie per l'esplorazione planetaria

Le attività del Laboratorio di Astrobiologia forniscono anche un supporto alla progettazione e allo sviluppo tecnologico di strumenti spaziali da volo. In

for research in the life sciences, biotechnology and pharmaceutical technologies sectors. The aim of the project is to test, in space environments, an automatic laboratory based on lab-on-chip technology capable of providing a highly integrated in-situ multiparameter platform that uses immunoassay tests, exploiting chemiluminescence detection. In-orbit validation of the technology proposed would represent a significant breakthrough for autonomous execution of bio-analytical experiments in space with potential application in planetary exploration for biomarker detection, astronaut healthcare, space station environmental monitoring and more. Development of this kind of technology for space application will enable its use in future astrobiology missions in the Solar System (Brucato et al., 2020).

### Planetary Protection

Planetary protection is the name of all the activities and protocols performed in a space mission in order to prevent forward contamination of astrobiologically relevant targets (Mars, Europa, Enceladus...) and backward contamination of Earth with possible extraterrestrial life when bringing back samples. The main activities are the development of protocols, procedures and methods for sterilizing and cleaning instruments on board missions to sensitive targets; the design of curation facilities for analyzing and managing extraterrestrial material brought back to Earth. Some of the members of the Astrobiology Laboratory were involved in planetary protection for the ExoMars mission and sat on several boards to establish international protocols to

particolare, il laboratorio è responsabile della gestione e del test funzionale di AstroBio CubeSat (ABCS), un cubesat 3U selezionato dall'ESA, che ospita un mini payload di laboratorio basato su una tecnologia innovativa lab-on-chip adatta alla ricerca nei settori delle scienze della vita, delle biotecnologie e delle tecnologie farmaceutiche. L'obiettivo del progetto è quello di testare in ambienti spaziali un laboratorio automatico basato sulla tecnologia lab-on-chip, in grado di fornire una piattaforma multiparametrica in-situ altamente integrata che utilizza test immunoassay sfruttando la rilevazione della chemiluminescenza. La convalida in orbita della tecnologia proposta rappresenterebbe un significativo passo avanti per l'esecuzione autonoma di esperimenti bio-analitici nello spazio con potenziale applicazione nell'esplorazione planetaria per il rilevamento di biomarcatori, la salute degli astronauti, il monitoraggio ambientale delle stazioni spaziali e altro ancora. Lo sviluppo di questo tipo di tecnologia per applicazioni spaziali ne permetterà l'uso in future missioni di astrobiologia verso il Sistema Solare (Brucato et al., 2020).

### Protezione planetaria

La protezione planetaria è il nome di tutte le attività e i protocolli operati in una missione spaziale al fine di prevenire la contaminazione sia di target rilevanti da un punto di vista astrobiologico (Marte, Europa, Encelado ...) sia della Terra con possibile vita extraterrestre durante la missione di ritorno del campione.

avoid contamination of the outer Solar System in future missions through the "Planetary Protection of Outer Solar System (PPOSS)" project. This project, funded by the European Commission H2020, ended with the publication of a handbook on the state-of-the-art and good practices to implement planetary protection requirements (PPOSS Consortium 2018). The Astrobiology Laboratory also took part in EURO-CARES, a European Commission H2020 research project which develops a roadmap for a European Sample Curation Facility, to handle extraterrestrial samples brought back to Earth from space exploration missions.

### Bibliography

- Brucato J. R., A. Nascetti, A. Meneghin, D. Paglialunga, G. Poggiali, L. Iannascoli (2020) AstroBio CubeSat a new tool for astrobiology experiments in Medium Earth Orbit. AAS Division of Planetary Science meeting 52, id. 001.03. Bulletin of the American Astronomical Society, 52(6).
- Fornaro T., Boosman A., Brucato J. R., ten Kate I. L., Siljeström S., Poggiali G., Steele A. and Hazen R. M. (2018a) UV irradiation of biomarkers adsorbed on minerals under Martian-like conditions: Hints for life detection on Mars. *Icarus* 313, 38–60.
- Fornaro T., Brucato J., Poggiali G., Corazzi M. A., Biczysko M., Jaber M., Foustoukos D., Hazen R. and Steele A. (2020) UV Irradiation and Near Infrared Characterization of Laboratory Mars Soil Analog Samples: the case of Phthalic Acid, Adenosine 5'-Monophosphate,

Le attività principali riguardano: lo sviluppo di protocolli, procedure e metodi per la sterilizzazione e la pulizia degli strumenti a bordo di missioni verso target sensibili; la progettazione di strutture di curatela per l'analisi e la gestione di materiale extraterrestre riportato sulla Terra. Alcuni membri del Laboratorio di Astrobiologia sono stati coinvolti nella protezione planetaria per la missione ExoMars e hanno partecipato a diversi consigli per stabilire protocolli internazionali per evitare la contaminazione del Sistema Solare esterno nelle missioni future attraverso il progetto "Planetary Protection of Outer Solar System (PPOSS)". Questo progetto finanziato dalla Commissione Europea H2020 si è concluso con la pubblicazione di un manuale sullo stato dell'arte e sulle buone pratiche per implementare i requisiti di protezione planetaria (PPOSS Consortium 2018). Il Laboratorio di Astrobiologia ha partecipato anche all'EURO-CARES, un progetto di ricerca della Commissione Europea H2020, che sviluppa una roadmap per una European Sample Curation Facility, per manipolare campioni extraterrestri riportati sulla Terra da missioni di esplorazione spaziale.

## Bibliografia

Brucato J. R., A. Nascetti, A. Meneghin, D. Paglialunga, G. Poggiali, L. Iannascoli (2020) AstroBio CubeSat a new tool for astrobiology experiments in Medium Earth Orbit. AAS Division of Planetary Science meeting 52, id. 001.03. Bulletin of the American Astronomical Society, 52(6).

L-Glutamic Acid and L-Phenylalanine Adsorbed onto the Clay Mineral Montmorillonite in the Presence of Magnesium Perchlorate. *Front. Astron. Space Sci.* 2020. <https://doi.org/10.3389/fspas.2020.539289>.

Fornaro T., Brucato J. R., Branciamore S. and Pucci A. (2013a) Adsorption of Nucleic Acid Bases on Magnesium Oxide (MgO). *Int. J. Astrobiol.* 12, 78–86.

Fornaro T., Brucato J. R., Feuillie C., Sverjensky D. A., Hazen R. M., Brunetto R., D'Amore M. and Barone V. (2018b) Binding of Nucleic Acid Components to the Serpentinite-hosted Hydrothermal Mineral Brucite. *Astrobiology* 18, 989–1007.

Fornaro T., Brucato J. R., Pace E., Cestelli-Guidi M., Branciamore S. and Pucci A. (2013b) Infrared Spectral Investigations of UV Irradiated Nucleobases Adsorbed on Mineral Surfaces. *Icarus* 226, 1068–1085.

Fornaro T., Brucato J. R., Pucci A., Branciamore S. (2013c) Development of Extraction Protocols for Life Detection Biosensor-based Instruments. *Planetary and Space Science* 86, 75-79.

Goesmann F., Brinckerhoff W. B., Raulin F., Goetz W., Danell R., Getty S., Siljeström S., Mißbach H., Steininger H., Jr. Arevalo R. D., Buch A., Freissinet C., Grubisic A., Meierhenrich U. J., Pinnick V., Stalport F., Szopa C., Vago J. L., Lindner R., Schulte M. D., Brucato J. R., Glavin D. P., Grand N., Li X., van Amerom F. H. W., and the MO-MAX Science Team (2017) The Mars Organic Molecule Analyzer (MOMA) Instrument: Characterization of Organic Material in Martian Sediments. *Astrobiology* 2017, 17(6-7), 655-685.

- Fornaro T., Boosman A., Brucato J. R., ten Kate I. L., Siljeström S., Poggiali G., Steele A. and Hazen R. M. (2018a) UV irradiation of biomarkers adsorbed on minerals under Martian-like conditions: Hints for life detection on Mars. *Icarus* 313, 38–60.
- Fornaro T., Brucato J., Poggiali G., Corazzi M. A., Biczysko M., Jaber M., Foustoukos D., Hazen R. and Steele A. (2020) UV Irradiation and Near Infrared Characterization of Laboratory Mars Soil Analog Samples: the case of Phthalic Acid, Adenosine 5'-Monophosphate, L-Glutamic Acid and L-Phenylalanine Adsorbed onto the Clay Mineral Montmorillonite in the Presence of Magnesium Perchlorate. *Front. Astron. Space Sci.* 2020. <https://doi.org/10.3389/fspas.2020.539289>.
- Fornaro T., Brucato J. R., Branciamore S. and Pucci A. (2013a) Adsorption of Nucleic Acid Bases on Magnesium Oxide (MgO). *Int. J. Astrobiol.* 12, 78–86.
- Fornaro T., Brucato J. R., Feuillie C., Sverjensky D. A., Hazen R. M., Brunetto R., D'Amore M. and Barone V. (2018b) Binding of Nucleic Acid Components to the Serpentine-hosted Hydrothermal Mineral Brucite. *Astrobiology* 18, 989–1007.
- Fornaro T., Brucato J. R., Pace E., Cestelli-Guidi M., Branciamore S. and Pucci A. (2013b) Infrared Spectral Investigations of UV Irradiated Nucleobases Adsorbed on Mineral Surfaces. *Icarus* 226, 1068–1085.
- Fornaro T., Brucato J. R., Pucci A., Branciamore S. (2013c) Development of Extraction Protocols for Life Detection Biosensor-based Instruments. *Planetary and Space Science* 86, 75–79.

Poggiali G., Fornaro T., Potenti S., Corazzi M. A., Brucato J. R. (2020) Ultraviolet photoprocessing of glycine adsorbed on various space-relevant minerals. *Front. Astron. Space Sci.*, doi: 10.3389/fspas.2020.00018.

Potenti S., Manini P., Fornaro T., Poggiali G., Crescenzi O., Napolitano A., Brucato J. R., Barone V., d'Ischia M. (2018) Solid State Photochemistry of Hydroxylated Naphthalenes on Minerals: Probing Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Transformation Pathways under Astrochemically-Relevant Conditions. *ACS Earth Space Chem.*, 2 (10), 977-1000, <https://doi.org/10.1021/acsearthspacechem.8b00060>.

PPOSS Consortium, 2018, The international Planetary Protection Handbook. Committee on Space Research (COSPAR).

Fornaro T., Rapin W., Wade J., Vicente-Retortillo Á., Steele A., Bhartia R., Beegle L. W. (2021) Detection and Degradation of Adenosine Monophosphate in Perchlorate-Spiked Martian Regolith Analogue, by Deep-Ultraviolet Spectroscopy. *J. Razzell Hollis. Astrobiology.* <https://doi.org/10.1089/ast.2020.2362>.

Williford K. H., Farley K. A., Stack K. M., Allwood A. C., Beaty D., Beegle L. W., Bhartia R., Brown A. J., de la Torre Juarez M., Hamran S.-E., Hecht M. H., Hurowitz J. A., Rodriguez-Manfredi J. A., Maurice S., Milkovich S. and Wiens R. C. (2018) The NASA Mars 2020 Rover Mission and the Search for Extraterrestrial Life. In *From Habitability to Life on Mars* Elsevier. pp. 275–308.

- Goesmann F., Brinckerhoff W. B., Raulin F., Goetz W., Danell R., Getty S., Siljeström S., Mißbach H., Steininger H., Jr. Arevalo R. D., Buch A., Freissinet C., Grubisic A., Meierhenrich U. J., Pinnick V., Stalport F., Szopa C., Vago J. L., Lindner R., Schulte M. D., Brucato J. R., Glavin D. P., Grand N., Li X., van Amerom F. H. W., and the MOMA Science Team (2017) The Mars Organic Molecule Analyzer (MOMA) Instrument: Characterization of Organic Material in Martian Sediments. *Astrobiology* 2017, 17(6-7), 655-685.
- Poggiali G., Fornaro T., Potenti S., Corazzi M. A., Brucato J. R. (2020) Ultraviolet photoprocessing of glycine adsorbed on various space-relevant minerals. *Front. Astron. Space Sci.*, doi: 10.3389/fspas.2020.00018.
- Potenti S., Manini P., Fornaro T., Poggiali G., Crescenzi O., Napolitano A., Brucato J. R., Barone V., d'Ischia M. (2018) Solid State Photochemistry of Hydroxylated Naphthalenes on Minerals: Probing Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Transformation Pathways under Astrochemically-Relevant Conditions. *ACS Earth Space Chem.*, 2 (10), 977-1000, <https://doi.org/10.1021/acsearthspacechem.8b00060>.
- PPOSS Consortium, 2018, The international Planetary Protection Handbook. Committee on Space Research (COSPAR).
- Fornaro T., Rapin W., Wade J., Vicente-Retortillo Á., Steele A., Bhartia R., Beegle L. W. (2021) Detection and Degradation of Adenosine Monophosphate in Perchlorate-Spiked Martian Regolith Analogue, by Deep-Ultraviolet Spectroscopy. *J. Razzell Hollis. Astrobiology.* <https://doi.org/10.1089/ast.2020.2362>.

Teresa Fornaro is a researcher at the INAF-Astrophysical Observatory of Arcetri and Professor of Astrobiology at the Department of Physics and Astronomy of the University of Florence. The majority of her work involves life detection investigations on Mars, as participating scientist of the NASA Mars 2020 mission and co-investigator of the MOMA instrument onboard the ESA ExoMars space mission.

John Robert Brucato is an astronomer at the INAF-Astrophysical Observatory of Arcetri and Professor of Astrobiology at the Department of Physics and Astronomy of the University of Florence. His research activity is focused on laboratory studies of the formation and evolution of organic matter in space. He is involved in the study of ESA and NASA space missions to search for life on Mars and primitive asteroids.



Williford K. H., Farley K. A., Stack K. M., Allwood A. C., Beatty D., Beegle L. W., Bhartia R., Brown A. J., de la Torre Juarez M., Hamran S.-E., Hecht M. H., Hurowitz J. A., Rodriguez-Manfredi J. A., Maurice S., Milkovich S. and Wiens R. C. (2018) The NASA Mars 2020 Rover Mission and the Search for Extraterrestrial Life. In *From Habitability to Life on Mars*. Elsevier. pp. 275–308.

Teresa Fornaro è una ricercatrice dell'INAF-Osservatorio Astrofisico di Arcetri, e Professore di Astrobiologia presso il Dipartimento di Fisica e Astronomia dell'Università di Firenze. Si occupa principalmente di cercare tracce di vita su Marte, come scienziato partecipante alla missione della NASA Mars 2020 e co-investigatore dello strumento MOMA a bordo della missione spaziale ESA ExoMars.

John Robert Brucato è un astronomo dell'INAF-Osservatorio Astrofisico di Arcetri, e Professore di Astrobiologia presso il Dipartimento di Fisica e Astronomia dell'Università di Firenze. Si occupa dello studio in laboratorio della formazione ed evoluzione della materia organica nello spazio. È impegnato nello studio di missioni spaziali dell'ESA e della NASA per la ricerca di vita su Marte e su asteroidi primitivi.



Il Colle di  
Galileo

# PLATO e Ariel, le prossime missioni di classe media del programma dell'ESA sulla scoperta e caratterizzazione di esopianeti dallo spazio: il contributo di INAF-Arcetri

*PLATO and Ariel, the next medium-class Missions of the ESA's roadmap on the discovery and characterization of exoplanets from space: the contribution of INAF-OAA*

Mauro Focardi

INAF – Osservatorio Astrofisico di Arcetri

**Abstract.** Da alcuni anni l'INAF-Osservatorio Astrofisico di Arcetri svolge un ruolo cruciale nel contributo al percorso dell'Agenzia Spaziale Europea rivolto alla scoperta e caratterizzazione degli esopianeti dallo spazio (rif. Figura 1). Alcuni dei suoi Ricercatori, Tecnologi e Tecnici, grazie anche al supporto amministrativo locale, sono coinvolti nella progettazione e sviluppo della strumentazione scientifica a bordo dei satelliti PLATO ed Ariel, oltre che negli aspetti scientifici rivolti allo studio degli esopianeti.

**Keywords.** Esopianeti, metodo dei transiti, eclisse primaria e secondaria, fotometria, spettrofotometria, osservazioni dallo spazio.

**Abstract.** Since some years, the Arcetri Astrophysical Observatory plays a crucial role in the contribution to the European Space Agency (ESA) roadmap on exoplanets discovery and characterization from space (ref. Figure 1). Several of its Researchers, Technologists and Technician, thanks also to the local Administrative Department support, are involved in the PLATO and Ariel Payloads design and development, along with the scientific aspects aimed at the study of exoplanets.

**Keywords.** Exoplanets, transit method, primary and secondary eclipses, photometry, spectrophotometry, observation from space.

PLATO

The PLANetary Transits and Oscillations of stars mission (PLATO – Figure 2) is the third medium class mission (M3) of ESA's Cosmic Vision 2015-2025 Program. It was selected by the

## PLATO

La missione PLATO (*PLANetary Transits and Oscillations of stars*, Figura 2) è la terza missione di classe media (M3) del Programma *Cosmic Vision 2015-2025* dell'Agenzia Spaziale Europea ed è stata selezionata dal Comitato del Programma Scientifico di ESA nel 2014. La missione è rivolta alla ricerca e caratterizzazione di un elevato numero di sistemi planetari extrasolari, con particolare attenzione ai pianeti terrestri nella zona abitabile intorno a stelle brillanti simili al Sole. La missione si prefigge anche lo studio dell'attività sismica stellare, alla base della caratterizzazione precisa delle stelle progenitrici, inclusa la loro età, assunta uguale a quella del sistema planetario che ospita. PLATO determinerà con un'accuratezza senza precedenti il raggio dei pianeti, l'irraggiamento stellare e l'architettura dei sistemi planetari, ponendoli in un contesto evolutivo legato all'età del sistema.

L'esperimento scientifico a bordo (o carico utile) condurrà anche un programma estensivo di scienza complementare, rivolta ad un ampio set di argomenti astronomici ed astrofisici. Nell'intento di raggiungere i suoi obiettivi scientifici, l'esperimento si basa su riprese fotometriche ad alta precisione allo scopo di produrre un ampio campione di curve di luce stellare, ottenute su tempi dell'ordine dei mesi o di alcuni anni, con lunghi cicli osservativi. Il segnale relativo al transito planetario sul disco stellare e quello relativo alle oscillazioni luminose della stella progenitrice sono entrambi derivati dall'analisi delle curve di luce, che abilitano la rivelazione dei pianeti transitanti, la determinazione dei loro raggi e parametri orbitali, oltre alla caratterizzazione della stella madre.

Science Program Committee (ESA-SPC) in 2014. PLATO aims to find and characterize a large number of extra solar planetary systems, focusing on the properties of terrestrial planets in the habitable zone around bright stars similar to the sun. The mission also aims to investigate seismic activity in stars, enabling the precise characterization of the parent stars, including their age, assumed to be the same as that of the host planetary system. PLATO will determine, with unprecedented accuracy, the planet radii, stellar irradiation and the architecture of the planetary systems, placing them in an evolutionary context linked to the age of the system.

The scientific experiment (or payload) on board will also carry out an extensive complementary science program that will address a broad range of astronomical and astrophysical topics. In order to achieve its scientific goals, the experiment relies on high-precision photometry to produce a large sample of stellar light curves, obtained over a period of months or several years, with long observational cycles. The planet transit signal and the parent star oscillations are both obtained from the analysis of the light curve, enabling the detection of transiting planets, the determination of their radii and orbital parameters, and the characterization of the parent star.

PLATO is based on a single satellite platform architecture operated by the usual ESA infrastructure developed for space missions. The space segment, or spacecraft, comprises two main elements: the scientific experiment or payload and the satellite platform. The main industrial contractor (OHB Bremen, Germany) is in charge of developing the satellite platform supporting the scientific operations and performance of the payload, as well as the delivery of the fully tested and integrated satellite to ESA.

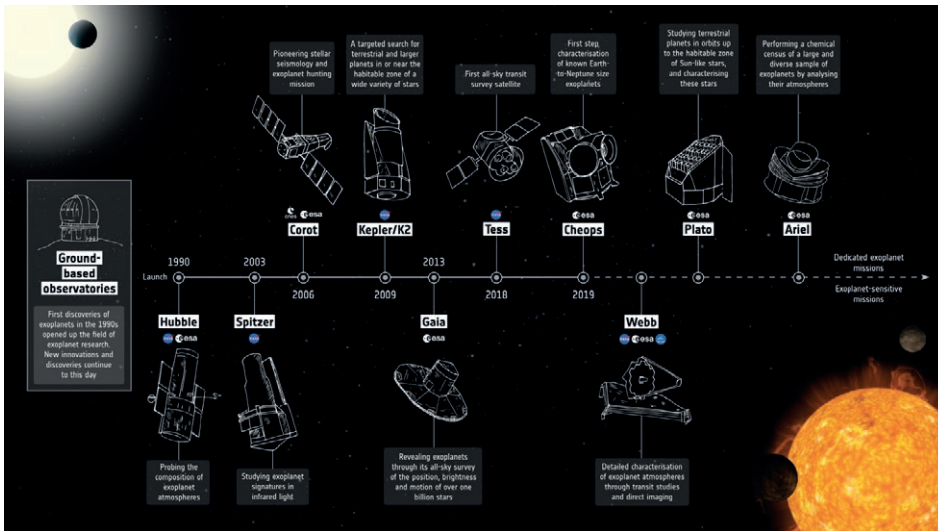


Figure 1. Sviluppo temporale delle missioni per lo studio degli esopianeti.  
 Figure 1. Exoplanet missions timeline.



Figure 2. La sonda PLATO (per gent. concess. OHB Bremen).  
 Figure 2. PLATO spacecraft (courtesy of OHB Bremen).

PLATO si basa su di un'architettura ad unica piattaforma satellitare (singolo strumento) operata dalle usuali infrastrutture messe a punto da ESA per le missioni spaziali. Il segmento spaziale, o navicella, è composto da due elementi principali: il carico scientifico o esperimento a bordo e la piattaforma satellitare. Il principale contrattore industriale (OHB Brema, Germania) ha in carico lo sviluppo della piattaforma satellitare a supporto delle prestazioni ed operazioni scientifiche dell'esperimento, oltre alla consegna ad ESA del satellite completamente integrato e testato.

L'esperimento scientifico a bordo è sviluppato e fornito grazie ad una collaborazione di Istituti scientifici europei (il consorzio PLATO-PMC) insieme ad ESA. Esso comprende 26 camere posizionate sui rispettivi piani focali di altrettanti telescopi, le elettroniche analogiche e digitali di lettura dei rivelatori, e da una Unità di Controllo dello stesso Strumento (ICU).

PLATO sarà lanciato nel 2026 dal Centro Spaziale di Kourou nella Guiana francese con un vettore Ariane 6.2 con trasferimento diretto verso un'ampia orbita attorno al secondo punto lagrangiano (L2) del sistema Terra-Sole. Al termine della fase di trasferimento e le attività di commissionamento, che dureranno tre mesi, inizieranno le operazioni scientifiche per una durata nominale complessiva di 4 anni, con la possibile estensione di altri due anni.

The scientific payload is developed and supplied thanks to collaboration between European scientific institutes (the PLATO Mission Consortium - PMC) and ESA. It consists of 26 cameras located on the focal planes of 26 telescopes, associated digital and analogue electronics and an Instrument Control Unit (ICU).

PLATO will be launched in 2026 from the French Guiana Space Centre, Kourou, with an Ariane 6.2, with direct transfer to a large orbit around the second Lagrangian Point (L2) of the Sun-Earth system. After the transfer phase and the commissioning activities, lasting three months, nominal scientific operations will commence, with an overall duration of four years, with a possible two-year extension.

## ARIEL

Ariel, the Atmospheric Remote-sensing Infrared Exoplanet Large-survey (Figure 3), is the fourth medium class mission (M4) of the ESA's Cosmic Vision science program and the natural technological and scientific evolution following PLATO. It will take advantage of the scientific targets previously observed and characterized by it. Ariel is dedicated to studying the atmospheres of a statistically large sample of transiting exoplanets ( $\geq 1000$ ) through a combination of low-resolution photometry and spectroscopy techniques. The experiment aims to measure the chemical composition and determine the thermal structure of exoplanets from gas giants (like Jupiter or Neptune) to super-Earths that orbit in the hot to warm zones of their parent stars,

## ARIEL

Ariel, acronimo di *Atmospheric Remote-sensing Infrared Exoplanet Large-survey* (Figura 3), rappresenta la quarta missione di classe media (M4) del programma *Cosmic Vision* di ESA, quale naturale evoluzione tecnologica e scientifica post PLATO, avvantaggiandosi dei target scientifici precedentemente osservati e caratterizzati da esso. Ariel si rivolge allo studio delle atmosfere di un ampio campione statistico ( $\geq 1000$ ) di esopianeti transitanti, attraverso una combinazione di tecniche fotometriche e spettroscopiche a bassa risoluzione. L'esperimento si prefigge la misura della composizione chimica e la determinazione della struttura termica di esopianeti quali giganti gassosi (ad esempio Giove o Nettuno) fino ad arrivare a super-terre che orbitano nella zona calda o temperata delle loro stelle madri, prevalentemente di classe spettrale da F ad M, con l'intento di aprire la strada ad una planetologia comparative su larga scala, abilitando la possibilità di rispondere alle seguenti domande fondamentali:

- Quali sono i processi fisici che plasmano le atmosfere planetarie?
- Di cosa sono composti gli esopianeti?
- Come si formano ed evolvono i pianeti e sistemi planetari?

Ariel è stata selezionata dall'ESA nel marzo 2018 per una opportunità di lancio attesa nel 2029 a bordo di un razzo Ariane 6.2, in una configurazione per lancio duale con la navicella *Comet Interceptor*. Come per PLATO, anch'essa opererà da un'orbita attorno a L2, per una durata nominale di 4 anni, ma con possibilità di

mainly of the F to M type, with the aim of opening up the way to large-scale, comparative planetology, making it possible to answer the following fundamental questions:

- Which physical processes shape planetary atmospheres?
- What are exoplanets made of?
- How do planets and planetary systems form and evolve?

Ariel was selected by ESA in March 2018 for a launch expected to take place in 2029 on board an Ariane 6.2 in a dual launch configuration with the Comet Interceptor spacecraft. Like PLATO, it will operate from an orbit around L2 for a nominal duration of four years, with a possible extension of up to six years. This is the first mission dedicated to measuring the chemical composition and thermal structure of the atmospheres of hundreds of transiting exoplanets, enabling planetary science far beyond the boundaries of our own Solar System.

Following a competitive tender, Airbus Defense & Space France (ADS-Toulouse) was chosen, in November 2021, as first industrial contractor for the development of the satellite platform for the subsequent phases. The satellite consists of the platform (supplied by ESA through the industrial contract with ADS) and the payload (provided by the Ariel Mission Consortium - AMC). The scientific payload has been designed to perform photometry and transit spectroscopy measurements from space during primary and secondary planetary eclipses in order to obtain a large unbiased survey of the nature of exoplanet atmospheres and their interiors, to determine the key factors affecting the formation and evolution of planetary systems.

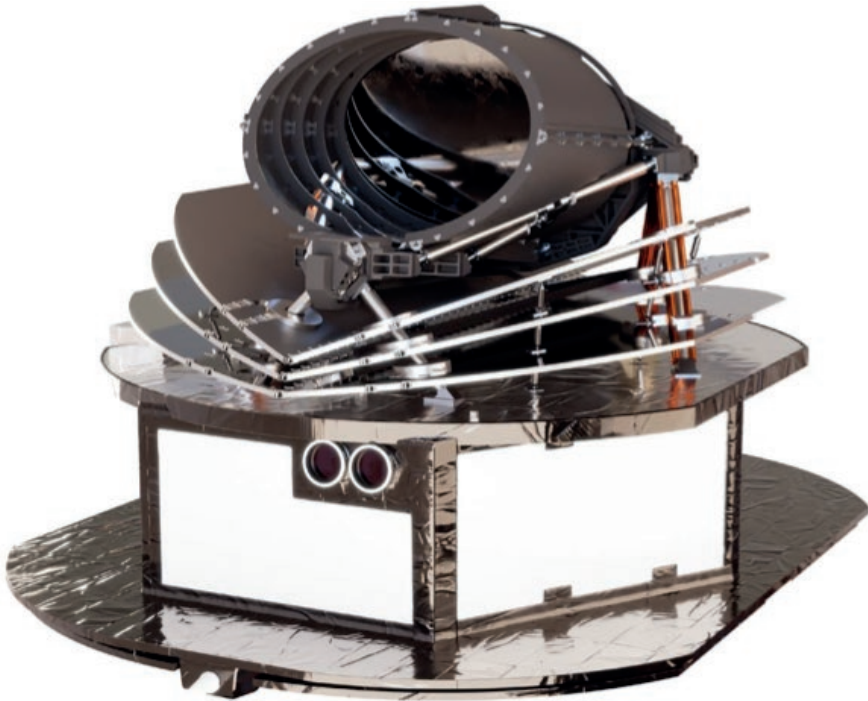


Figure 3. La sonda Ariel (per gent. concess. Airbus Defense & Space Toulouse).

Figure 3. Ariel spacecraft (courtesy of Airbus Defense & Space Toulouse).

Ariel will observe hundreds of temperate transiting exoplanets, like gas giants, planets similar to Neptune, and super-Earths around a wide range of star types belonging to different spectral classes, focusing mainly on planets with a surface temperature in excess of  $\sim 600$  K, exploiting the chemical and physical properties of their well-mixed atmospheres. It will exploit primary and secondary transit spectroscopy in the  $1.10$  to  $7.80 \mu\text{m}$  spectral range and broad-band photometry in the optical ( $0.50$ - $0.80 \mu\text{m}$ ) and near IR ( $0.80$ - $1.10 \mu\text{m}$ ). One of the two instruments of the Ariel payload is the Fine Guidance System (FGS), including three photometric channels between  $0.5$ - $1.1 \mu\text{m}$  (two of which are used for guiding as well as science) plus a low resolution NIR spectrometer in the  $1.1$ - $1.95 \mu\text{m}$  range. Lastly, an Active Cooler System (ACS) based on a Joule-Thomson cryocooler with neon is used to actively cool the main spectrometer (AIRS) detectors. AIRS is located on the intermediate focal plane of the telescope and common optical system, and hosts two HgCdTe-based hybrid IR detectors and two cold front-end electronics (CFEE) for the detectors. Each CFEE is driven by a Detector Control Unit (DCU) managed by the Instrument Control Unit.

The Arcetri Astrophysical Observatory, along with Kayser Italia Srl (Livorno) and Leonardo Spa (Florence) as industrial partners, is strongly involved in the design, development and testing of both the PLATO and Ariel payloads, with particular regard to the final delivery of the Instrument Control Units to PMC and AMC, as its researchers and technologists are in charge of system engineering and management tasks, not only on the payload electronics but also on the Ariel telescope assembly (TA).

estensione fino a 6 anni complessivi. Essa rappresenta la prima missione in assoluto rivolta alla misura della composizione chimica e struttura termica delle atmosfere di centinaia di esopianeti transitanti, abilitando le scienze planetarie ben al di là dei confini del nostro Sistema Solare.

A seguito di una gara competitiva delle maggiori industrie operanti nel settore aerospaziale europeo, nel novembre 2021 è stata selezionata Airbus Difesa e Spazio (Tolosa, Francia) come primo contraattore industriale per lo sviluppo della piattaforma satellitare per le successive fasi. Il satellite è composto dalla piattaforma (fornita da ESA attraverso il contratto industriale con ADS) e dal carico utile, fornito dal Consorzio Scientifico della Missione Ariel-AMC). L'esperimento scientifico è progettato per eseguire misure di spettroscopia e fotometria di transito dallo spazio durante le fasi di eclissi primaria e secondaria, nell'intento di ottenere un ampio set di misure sulla natura delle atmosfere degli esopianeti e sul loro interno, per determinare i fattori chiave che influenzano la formazione ed evoluzione dei sistemi planetari.

Ariel osserverà centinaia di esopianeti temperati transitanti, come giganti gassosi, pianeti simili a Nettuno e super-terre attorno ad un ampio intervallo di tipologie di stelle appartenenti a diverse classi spettrali, focalizzandosi principalmente su pianeti con temperature superficiali superiori a  $\sim 600$  K in modo da sfruttare le proprietà chimico-fisiche di atmosfere ben mescolate. Essa sfrutterà le tecniche di spettroscopia di transito primario e secondario nell'intervallo spettrale da 1.10 a  $7.80 \mu\text{m}$  e tecniche fotometriche a banda larga nell'ottico ( $0.50 - 0.80 \mu\text{m}$ ) e vicino IR ( $0.80-1.10 \mu\text{m}$ ). Uno dei due strumenti a bordo è il Sistema di Guida Fine, che

Mauro Focardi is an INAF-OAA Researcher working on new technologies and instrumentation for space and ground-based astrophysics, in particular on the development of detectors readout electronics and instrument control units for scientific payloads on-board sub-orbital rockets and satellite platforms.



include tre canali fotometrici fra 0.5 e 1.1  $\mu\text{m}$  (due dei quali usati sia per la guida fine che per misure scientifiche) e uno spettrometro a bassa risoluzione nel vicino IR, nell'intervallo spettrale 1.1-1.95  $\mu\text{m}$ . Infine, un Sistema di Raffreddamento Attivo (ACS) basato su un sistema criogenico Joule-Thomson al Neon viene impiegato nell'intento di fornire la capacità di raffreddamento attivo per i rivelatori dello spettrometro principale AIRS. Quest'ultimo è posizionato sul piano focale intermedio del telescopio e del sistema di ottiche comuni dell'esperimento ed ospita due rivelatori ibridi basati su composti ternari a base di mercurio, cadmio e tellurio (HgCdTe), insieme alle due elettroniche fredde di controllo dei rivelatori. Ciascuna di esse è sua volta pilotata da una Unità di Controllo dei Rivelatori gestita a sua volta da una Unità di Controllo dello Strumento (ICU).

L'Osservatorio Astrofisico di Arcetri, insieme a Kayser Italia Srl (Livorno) e Leonardo Spa (Firenze) quali partners industriali, è fortemente coinvolto nella progettazione, sviluppo e test di entrambi gli esperimenti PLATO ed Ariel, in particolare per quanto riguarda la consegna finale delle Unità di Controllo dello Strumento ai rispettivi Consorzi, dato che i suoi Ricercatori e Tecnologi hanno in carico attività di Ingegneria di Sistema e Gestione, non soltanto dell'elettronica degli esperimenti ma anche del telescopio di Ariel (TA - Telescope Assembly)

Mauro Focardi è un Ricercatore INAF (OAA - Osservatorio Astrofisico di Arcetri) coinvolto nello sviluppo di nuove tecnologie e strumentazione per astrofisica spaziale e basata a terra, in particolare nella progettazione di rivelatori VL/IR ed elettroniche di lettura, oltre ad Unità di Controllo di Strumenti (ICU) per esperimenti scientifici a bordo di razzi sub-orbitali e piattaforme satellitari.



Il Colle di  
Galileo

# Il contributo dell'INAF- Osservatorio Astrofisico di Arcetri alla tecnologia ed alle prime osservazioni di SKA-Low

*The INAF-Arcetri Astrophysical Observatory contribution  
to SKA-Low: technology and first observations*

Giulia Macario, Carlo Baffa, Carolina Belli, Pietro Bolli,  
Simone Chiarucci, Giovanni Comoretto, Paola Di Ninni,  
Elisabetta Giani, Georgios Kyriakou  
INAF - Osservatorio Astrofisico di Arcetri

**Riassunto.** SKA (*Square Kilometre Array*), la più estesa e potente rete interferometrica di radiotelescopi al mondo nella banda di frequenze da 50 MHz a 15 GHz, è attualmente in fase di costruzione. A partire dal prossimo decennio, le prestazioni senza precedenti di SKA rivoluzioneranno l'astrofisica moderna. Il gruppo tecnologico di radioastronomia dell'Osservatorio Astrofisico di Arcetri (INAF) contribuisce attivamente alle fasi di design, sviluppo e validazione di SKA-Low, la componente di SKA operante a bassa frequenza (50-350 MHz).

**Parole chiave.** SKA, radiotelescopi, array di aperture, calibrazione.

SKA (*Square Kilometre Array*) è un progetto globale finalizzato alla costruzione della più estesa infrastruttura radio-astronomica del mondo. Coordinato

**Abstract.** SKA (*Square Kilometre Array*), the largest and most powerful interferometric array of radio telescopes in the world in the 50 MHz to 15 GHz frequency range is currently under construction. Its unprecedented performance will revolutionize modern astrophysics starting from the next decade. The technological radioastronomical group at the INAF-Arcetri Astrophysical Observatory is actively involved in the design, development and validation of SKA-Low, the low-frequency (50-350 MHz) component of SKA.

**Keywords.** SKA, radio telescopes, aperture arrays, calibration.

SKA (*Square Kilometre Array*) is a global project aimed at building the largest radio-astronomical infrastructure in the world. Coordinated by the SKA Observatory (SKAO [1]) intergovernmental organization based in Jodrell Bank (United Kingdom), which currently involves 14

dall'Osservatorio SKA (SKAO [1]), organizzazione intergovernativa con sede a Jodrell Bank (Regno Unito) che attualmente conta 14 stati membro, rappresenta uno dei più ambiziosi e ingenti sforzi scientifico-ingegneristici della storia. Conterà migliaia di radiotelescopi, dislocati in due siti desertici tra i più remoti della Terra, selezionati sulla base delle condizioni atmosferiche e di "silenzio radio" (quasi totale assenza di radio-interferenze provenienti da terra). La regione di Karoo, in Sudafrica, ospiterà SKA-Mid, la componente operante a frequenze medio-alte (tra 350 MHz e 15.3 GHz), mentre nella contea di Murchison, in Australia Occidentale, sarà costruito SKA-Low, dedicato alle osservazioni nel regime di basse frequenze (da 50 a 350 MHz). Nella prima fase scientifica, circa 200 antenne paraboliche orientabili disposte su di un'area di ~150 km comporranno SKA-Mid, mentre SKA-Low conterrà oltre 130,000 antenne fisse che si estenderanno in un'area di ~65 km di diametro. Entrambe le componenti di SKA consentiranno di mappare e monitorare vastissime aree di cielo migliaia di volte più velocemente rispetto agli altri radiotelescopi esistenti, raggiungendo livelli estremamente alti di risoluzione angolare (fino al millesimo di secondo d'arco) e di sensibilità (rumore fino all'ordine del micro-Jy). Tali prestazioni forniranno alla comunità astrofisica l'opportunità di investigare con grande dettaglio temi fondamentali come la formazione e l'evoluzione delle prime stelle e galassie dopo il Big Bang, il ruolo del magnetismo cosmico, la natura della gravità, e la vita nell'Universo: una rivoluzione delle conoscenze astrofisiche e l'inizio di una nuova era della radioastronomia [2,3].

SKA-Low sarà un radiointerferometro a sintesi di apertura, situato intorno al sito del *Murchison Radio-astronomy Observatory* (MRO) e composto da un in-

member states, SKA represents one of the biggest and most ambitious efforts in the history of science and engineering. It will comprise thousands of radio telescopes located in two desertic sites among the most remote on Earth, selected on the basis of atmospheric conditions and "radio silence" (almost total absence of terrestrial radio frequency interference). The Karoo region in South Africa will host SKA-Mid, the component operating in the medium-high frequency range (350 MHz to 15.3 GHz), while SKA-Low (operating at low frequencies, from 50 to 350 MHz) will be built in the Murchison County of Western Australia. In the first scientific phase, SKA-Mid will consist of about 200 steerable dishes arranged across an area of ~150 km, while SKA-Low will number over 130,000 not mechanically steerable log-periodic antennas installed over an area of ~65 km in diameter. Both components of SKA will enable the mapping and monitoring of vast areas of the sky thousands of times faster than all other existing radio telescopes, reaching extremely high levels of angular resolution (up to ~1/1000 of arcseconds) and sensitivity (noise up to ~1  $\mu$ Jy). These performances will allow astrophysicists to investigate in great detail fundamental themes such as the formation and evolution of the first stars and galaxies after the Big Bang, the role of cosmic magnetism, the nature of gravity, and life in the Universe: a revolution of astrophysical knowledge and the beginning of a new era of radioastronomy [2,3].

SKA-Low will be an Aperture Synthesis telescope, located around the site of the Murchison Radio-astronomy Observatory (MRO) and consisting of 512 phased aperture arrays (stations) with no moving parts. Half of these stations will be located across a circular region of ~1 km diameter, forming the dense core of the telescope; the other half of the stations will be distrib-

sieme di 512 stazioni senza parti in movimento. Metà di queste saranno posizionate in una regione circolare di circa 1 km di diametro, che costituirà il nucleo denso del telescopio; l'altra metà delle stazioni sarà invece distribuita in modo molto più distanziato lungo tre bracci quasi a spirale. Ogni stazione sarà composta da 256 antenne distribuite in modo quasi-casuale su un'area circolare di circa 40 m di diametro (Figure 1 e 2A). Per consentire il puntamento e l'inseguimento di radio sorgenti, in assenza di parti in movimento, ogni stazione sarà dotata di un sistema di elettronica digitale per la formazione del diagramma di radiazione (*beam forming*) altamente flessibile e d'avanguardia.

Le frequenze alle quali opererà SKA-Low consentiranno di studiare l'idrogeno atomico ad altissimo redshift ( $z = 3-27$ ), permettendo di esplorare il periodo in cui le prime stelle hanno re-ionizzato il gas intergalattico e di investigare le prime fasi della formazione delle galassie. Il telescopio verrà inoltre impiegato per la ricerca di pulsar e per la rivelazione di fenomeni radio transienti (*Fast Radio Bursts*). Grazie all'estrema rapidità di puntamento elettronico, SKA-Low permetterà inoltre la ricerca delle controparti radio di fenomeni rilevati con altre tecniche, come le onde gravitazionali o i *Gamma Ray Bursts*.

Il coinvolgimento tecnologico dell'Istituto Nazionale di Astrofisica (INAF) in SKA è stato, fin dalle prime fasi del progetto, ampio ed articolato [4]. Questo contributo si soffermerà sull'attività svolta da ricercatrici e ricercatori del gruppo tecnologico di radioastronomia dell'Osservatorio Astrofisico di Arcetri (INAF-OAA) sul radiotelescopio SKA-Low [5].

uted in a more widespread configuration along three quasi-spiral arms. Each station will consist of 256 antennas, distributed quasi-randomly over a circular area of  $\sim 40$  m in diameter (Figures 1 and 2A). In the absence of moving parts, the pointing and tracking of regions of the sky will be possible thanks to a highly flexible digital beamforming system and state-of-the-art electronics.

SKA-low will allow us to observe the atomic hydrogen at very high redshift ( $z = 3-27$ ), enabling the exploration of the epochs in which the first stars re-ionized the intergalactic gas, and to investigate the early stages of galaxy formation. The telescope will also be used to search for pulsars and to detect radio transient phenomena (Fast Radio Bursts). The extremely fast electronic pointing of SKA-Low will make it suitable for following-up radio counterparts of phenomena detected with other techniques, such as gravitational waves and Gamma Ray Bursts.

The technological involvement of the National Institute of Astrophysics (INAF) in SKA has been inter-disciplinary and significant right from the initial phases of the project [4]. This contribution will focus on the activities carried out by the researchers of the INAF-Arcetri Astrophysical Observatory radioastronomy technological group for the SKA-Low radio telescope [5].

#### Design and electromagnetic analysis of SKA-Low antennas

Satisfying the technological requirements of SKA-Low, based on the ambitious scientific aims of SKA, requires, among the numerous disciplines involved, in-depth activity within the

## Progettazione ed analisi elettromagnetica delle antenne di SKA-Low

Soddisfare i requisiti tecnologici di SKA-Low, definiti sugli ambiziosi obiettivi scientifici di SKA, richiede, tra le tante discipline coinvolte, un'attività in ambito di elettromagnetismo applicato molto approfondita per progettare, ottimizzare e caratterizzare il sistema radiante. Il gruppo di elettromagnetismo di INAF-OAA contribuisce dal 2015, assieme a partner privati (Sirio Antenne<sup>1</sup> e IDS<sup>2</sup>) e ad istituti di ricerca nazionali (CNR-IEIT, INAF-IRA), a tre linee di ricerca principali:

i) Progettazione dell'antenna SKALA4.1: partendo da versioni precedenti di antenna SKALA (*Square Kilometre Array Log Periodic Antenna*), INAF ha proposto la versione 4.1, che è stata selezionata nel 2019 da SKAO come soluzione da implementare in SKA-Low. Si tratta di un'antenna in alluminio log-periodica a doppia polarizzazione ed a larga banda ( $\sim 300$  MHz), alta circa 2 metri, caratterizzata da 20 dipoli per polarizzazione, con impedenza di ingresso a 50 Ohm,

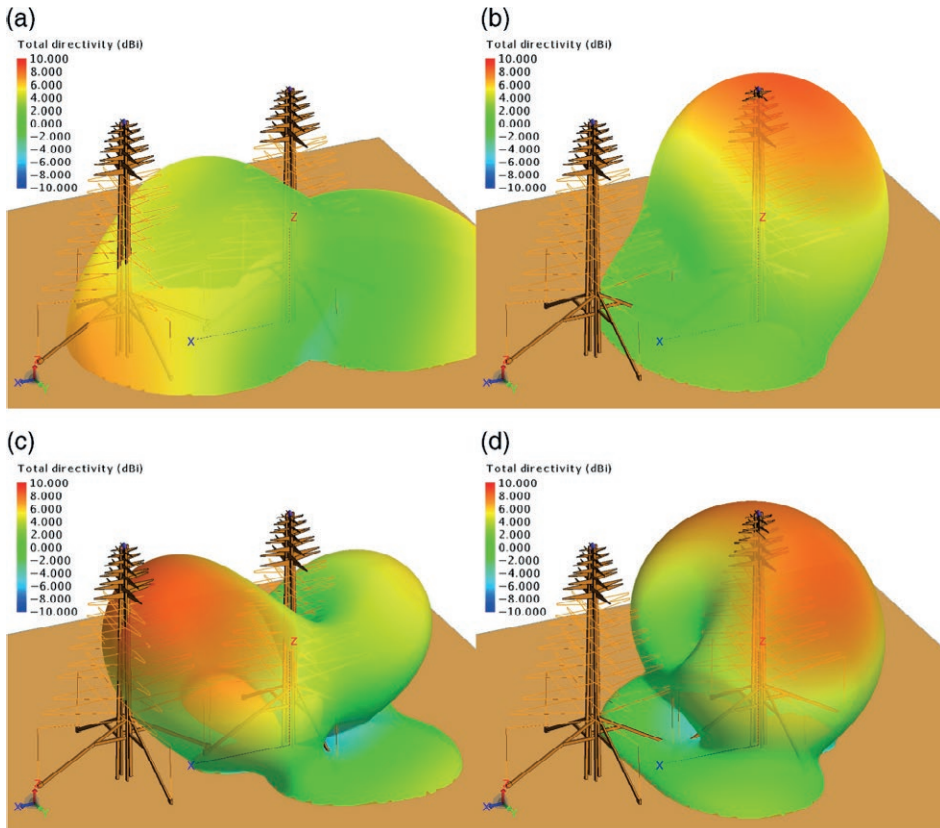


Figura 1. Diagrammi di radiazione in 3D simulati per un'antenna SKALA4.1 in presenza di una seconda antenna, a quattro differenti frequenze della banda di SKA-Low ((a) 54.5 MHz, (b) 57 MHz, (c) 77 MHz e (d) 78 MHz).  
Figure 1. Simulated 3D antenna pattern of a SKALA4.1 antenna in the presence of another one, at four different frequencies of the SKA-Low band ((a) 54.5 MHz, (b) 57 MHz, (c) 77 MHz and (d) 78 MHz).

ed agganciata elettricamente ad un piano di massa a griglia [6]. L'antenna è stata costruita dalla ditta Sirio Antenne dapprima come prototipo e, nel 2019, in 256 unità che sono state installate al sito di MRO dove è stata realizzata la stazione prototipo di SKA-Low denominata *Aperture Array Verification System 2* (AAVS2).

*ii) Analisi elettromagnetica della stazione:* numerose simulazioni elettromagnetiche sono state condotte sulla stazione di SKA-Low utilizzando software commerciali quali FEKO e Galileo (quest'ultimo implementato da IDS). Queste permettono di ottenere con elevata accuratezza le risposte singole delle antenne al variare della frequenza e della direzione di osservazione [7], in presenza di tutte le altre antenne considerate passive (Figura 1).

*iii) Caratterizzazione sperimentale dei diagrammi di radiazione di antenne a bassa frequenza:* il gruppo ha anche partecipato a campagne di misure dei diagrammi di radiazione di antenne attraverso un sistema di misura costituito da un'antenna trasmittente posta su un drone. Tale sistema, progettato dal CNR-IEIIT, è fondamentale per verificare i modelli elettromagnetici numerici [8].

#### Beamforming firmware di SKA-Low

Il gruppo di tecnologico di radioastronomia di INAF-OAA ha inoltre sviluppato gli algoritmi per il sistema di processamento digitale dei segnali raccolti dalle antenne di SKA-Low. Questo è composto da 8192 schede, progettate e realizzate da un consorzio di strutture INAF ed interamente costruite in Italia. In

framework of applied electromagnetics, in order to design, optimize and characterize the radiating system. Since 2015, the electromagnetics group of INAF-OAA, working together with private partners (Sirio Antenne<sup>1</sup> and Ingegneria dei Sistemi<sup>2</sup>) and national research institutes (CNT-IEIIT and INAF-IRA), has contributed to three principal areas of research:

*i) Design of the SKALA4.1 antenna:* starting from previous versions of SKALA (Square Kilometre Array Log Periodic Antenna), INAF proposed the 4.1 version, selected in 2019 by SKAO as the solution to implement in SKA-Low. This is an aluminum log-periodic, dual-polarized, wideband antenna (~300 MHz), almost 2 m tall, consisting of 20 dipoles for each polarization and with an input impedance of 50 Ohm, electrically attached to a wire lattice ground plane [6]. The antenna was built by Sirio Antenne, initially as a prototype; then, in 2019, 256 elements were installed at the MRO site where the *Aperture Array Verification System 2* (AAVS2) SKA-Low prototype station was built.

*ii) Electromagnetic analysis of the station:* numerous electromagnetic simulations were carried out on the SKA-Low station using commercial full-wave software such as FEKO and Galileo. These make it possible to obtain a very accurate individual response from the antennas, in presence of all the other antennas considered as passive (Figure 1) [7].

*iii) Experimental characterization of low frequency antenna radiation patterns:* the group has also participated in campaigns for the measurement of the antenna patterns by means of a measuring system comprising a transmitting antenna installed on a drone. This system, designed by CNR-IEIIT, is essential to verify the numerical electromagnetic models [8].

ogni stazione il sistema combina digitalmente i segnali di 256 antenne, correggendo ciascun segnale per gli effetti introdotti dalle antenne, riproducendo così l'equivalente di una singola parabola ricevente. Combinando in modo diverso il segnale ricevuto dalle singole antenne è possibile osservare contemporaneamente fino a 48 differenti direzioni in cielo. In questo modo si possono eseguire simultaneamente più osservazioni indipendenti, ed effettuare rapidamente *survey* di ampie zone di cielo. Il sistema deve processare una quantità enorme di dati: il traffico dati generato dal sistema di acquisizione è pari a quello che veniva prodotto dall'intera rete Internet mondiale nel 2016. Il sistema è stato ottimizzato per combinare le grandi capacità di calcolo richieste (circa 6 peta-flops), un costo contenuto, ed un consumo di energia compatibile con le limitate risorse presenti in mezzo ad un deserto: per soddisfare questi requisiti sono stati sviluppati algoritmi di processamento molto efficienti basati su logiche programmabili. Parte dell'energia elettrica necessaria sarà prodotta utilizzando pannelli fotovoltaici ed un sistema di accumulo a batterie al litio [9].

### Software di controllo di SKA

La scala e la flessibilità di SKA richiedono un grosso salto in avanti nel sistema di controllo. Questo deve essere in grado di gestire molte osservazioni indipendenti, di tipo differente, eseguite simultaneamente, ripartendo correttamente un numero enorme di risorse eterogenee che possono generare tipi di dati differenti.

### SKA-Low beamforming firmware

The INAF-OAA technological radioastronomical group also developed the algorithms for the system used for the digital processing of the signals collected by the SKA-Low antennas. This is made up of 8192 boards, designed and developed by a consortium of INAF facilities and built entirely in Italy. In each station, the system digitally combines the signals of 256 antennas, correcting each signal for the effects introduced by the antennas, reproducing the equivalent of a single receiving parabolic dish. By combining the signal received by the single antennas in different ways, it is possible to observe up to 48 different directions in the sky at the same time. In this way, several independent observations can be performed simultaneously, making it possible to quickly survey large areas of the sky. The system has to process an enormous amount of data: the data generated by the acquisition system is equivalent to that produced by the entire global Internet network in 2016. The system has been optimized to combine the large computational capacities required (about 6 peta-flops), low costs and an energy consumption compatible with the limited resources available in the middle of a desert. To meet these requirements, highly efficient processing algorithms based on programmable logics have been developed. Part of the electricity needed will be produced using photovoltaic panels and a lithium battery storage system [9].

Deve operare in modo quasi automatico, scegliendo in ogni istante le osservazioni che meglio si adattano alle disponibilità del telescopio ed alla situazione ambientale (ad esempio la presenza di interferenze). Deve controllare in continuazione lo stato delle centinaia di migliaia di elementi che lo compongono, isolare gli elementi guasti e continuare a funzionare correttamente nonostante la presenza di singoli elementi malfunzionanti. Il sistema di controllo di SKA è stato disegnato tenendo conto di questa sfida, in una struttura *top-down*: tutte le interazioni con l'osservatore ed il controllo della struttura del telescopio sono centralizzate, ed ogni (sub-)elemento ha un proprio sistema di controllo (LMC) che comunica col sistema centrale attraverso un unico punto di contatto. In questo modo ogni nodo permette di controllare tutto l'albero dei componenti che ne dipendono. Inoltre ne presenta un sommario dello stato dei componenti sottostanti (*wrap-up*). Il gruppo di tecnologico di radioastronomia di INAF-OAA ha sviluppato il sistema di controllo del correlatore/*beamformer* di SKA-Low e SKA-Mid, cioè dell'elemento che raccoglie i segnali di tutte le stazioni e li combina in un insieme di dati analizzabili dal software scientifico [10,11].

#### Strumento di modellizzazione del sistema

Il gruppo di radioastronomia di INAF-OAA ha contribuito anche nell'ambito dell'ingegneria di sistemi. Durante le fasi di preparazione della documentazione di SKA-Low è stato utilizzato uno strumento di modellizzazione del sistema allo

#### SKA control software

The scale and flexibility of the SKA require a huge leap forward in the control system. This has to be able to manage numerous different types of observation at the same time, successfully sharing an enormous quantity of heterogenous resources that can generate different types of data. It has to operate almost automatically, choosing the observations that best adapt to the availability of the telescope and the environmental situations (the presence of interference, for instance) at any time. It has to constantly monitor the status of its hundreds of thousands of components, isolate any faulty elements and keep working properly even in the presence of single malfunctioning elements. Taking this challenge into consideration, the SKA control system has been designed as a top-down structure: all the interactions with the observer and the control of the telescope structure are centralized through a single point of contact. Each node will enable the control of the entire tree of components that depend on it. A summary of the status of the underlying components (*wrap-up*) is also provided. The INAF-OAA technological radioastronomical group has developed the system for the control of the SKA-Low and SKA-Mid correlator/*beamformer*, i.e.: the element that collects the signals from all the stations and combines them into a set of data that can be analyzed by the scientific software [10,11].



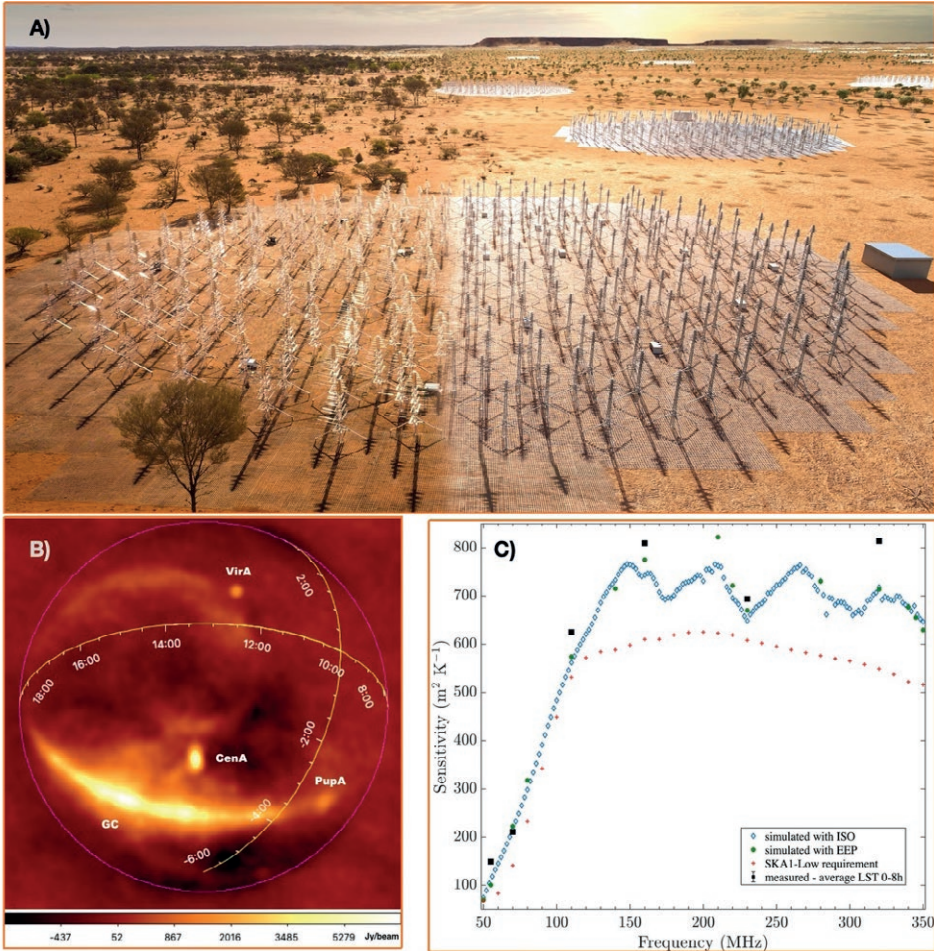


Figura 2. A) Vista aerea del futuro telescopio SKA-Low a MRO. Fotografia reale del prototipo AAVS2 (sinistra) con sovrapposta una riproduzione delle altre stazioni SKA-Low (crediti: ICRAR). B) Esempio di immagine di tutto il cielo ottenuta da osservazioni AAVS2 a 160 MHz. C) Sensibilità di SKA1-Low simulata (blu/verde), attesa (rosso) e misurata (nero) nella banda si SKA-Low.

Figure 2. A) Composite image of SKA-Low antennas at MRO, blending a real picture of AAVS2 (on the left) with an artist's impression of the telescope (credits: ICRAR). B) Example of all-sky image from AAVS2 observations at 160 MHz. C) SKA-Low sensitivity across the bandwidth from observations (black), simulations (blue/green), and requirements (red).

scopo di aiutare la progettazione del telescopio. Questo strumento, che adotta il linguaggio grafico System Modelling Language (SysML), rappresenta la struttura di scomposizione del prodotto al fine di identificare le connessioni tra i suoi elementi e le interfacce che lo caratterizzano, e di descrivere le funzioni ed i flussi di dati associati ad ogni elemento. I diagrammi di flusso così ottenuti sono stati utilizzati nella fase di Critical Design Review di SKA-Low. Tale approccio ha portato una grande semplificazione nelle modifiche e nel mantenimento della documentazione [12]. Un altro importante contributo, in collaborazione con lo SKAO, è stato nell'ambito della valutazione dell'aderenza del progetto ai requisiti stabiliti, necessario per gli studi di Design for Manufacturing in vista della produzione industriale.

### Osservazioni astronomiche di validazione della stazione AAVS2

Dal 2019, il gruppo di radioastronomia di INAF-OAA, in collaborazione con INAF-IRA (Bologna e Medicina) e ICRAR (Curtin, Australia), contribuisce attivamente alla caratterizzazione delle prestazioni di SKA-Low tramite l'utilizzo delle prime osservazioni astronomiche ottenute con la stazione prototipo AAVS2, l'ultimo dimostratore ingegneristico di una stazione completa costruito al sito di MRO (Fig. 2, A). Il gruppo ha sviluppato procedure software per processare la grande mole di dati ottenuti dalle osservazioni interferometriche durante i primi due anni di attività della stazione. Ha utilizzato osservazioni a sei diverse fre-

#### System modeling tool

The INAF-OAA technological radioastronomical group contributed also to the system engineering. During the preparation of the documentation for SKA-Low, a system modeling tool was used to aid the design of the telescope. This tool, which uses the System Modeling Language (SysML), represents the product breakdown structure, identifying the connections between its elements and characterizing interfaces, and describing the functions and the data flows associated with each element. The flow charts obtained in this way were used during the SKA-Low Critical Design Review. This approach allowed considerable simplification of the amendments and maintenance of the documentation [12]. Another important contribution, in collaboration with SKAO, was related to the assessment of compliance with project requirements, crucial for the Design for Manufacturing studies in view of industrial production.

#### Astronomical validation of the SKA-Low station AAVS2

Since 2019, the technological radioastronomical group of INAF-OAA, in collaboration with the INAF-IRA (Bologna and Medicina) and ICRAR (Curtin, Australia), has actively contributed to the characterization of SKA-Low performances, through the first astronomical observations obtained with AAVS2, the last prototype of a complete SKA-Low station built at the MRO site (Fig. 2, A). The group has developed software procedures to process the large amount of data

quenze (55, 70, 110, 160, 230, e 320 MHz) che campionano la banda operativa del telescopio. Grazie a questo sforzo, è stato possibile calibrare i dati, e produrre ed analizzare le immagini di tutto il cielo visibile dalla stazione. Ciò ha permesso di ottenere una validazione iniziale di alcuni requisiti e prestazioni cruciali di SKA-Low: la sua sensibilità, la “calibrabilità” e la stabilità del sistema (Figura 2, B e C). Un’ulteriore attività attualmente in corso è relativa a caratterizzare le prestazioni in polarizzazione della stazione, altrettanto fondamentali per gli obiettivi scientifici di SKA. Nei prossimi tre anni, sei stazioni come AAVS2 saranno costruite e collegate insieme per formare il primo prototipo di produzione di SKA-Low [13].

I risultati finora ottenuti in ambito sia tecnologico che osservativo dal gruppo INAF-OAA, in collaborazione con i vari partner sia Italiani che Australiani, e le attività in corso e future, rappresentano un importante contributo al progetto. Un passo avanti verso la prossima costruzione di SKA e la futura scienza che ne deriverà.

## Note

<sup>1</sup> <https://www.sirioantenne.it/it/>

<sup>2</sup> <https://www.idscorporation.com/>

obtained from interferometric observations during the first two years of activity of the station. Observations at six different frequencies (55, 70, 110, 160, 230, and 320 MHz) sampling the SKA-Low bandwidth have been used. Thanks to this effort, it has been possible to calibrate the data and to produce and analyze images of all the sky visible from the station. This allowed an initial validation of some crucial requirements and performances of SKA-Low: its sensitivity, the stability of the system and its calibration capabilities (Figure 2, B and C). Another activity currently ongoing aims to characterize the polarization performance of the station, which is equally important for the scientific goals of SKA. Over the next three years, six stations like AAVS2 will be built and connected together to form the first SKA-Low production prototype [13].

The technological and observational results obtained so far by the INAF-OAA group, in collaboration with the various Italian and Australian partners, and the ongoing and future activities, represent an important contribution to the project. A step forward towards the upcoming construction of SKA and the future science that will follow.

## Notes

<sup>1</sup> <https://www.sirioantenne.it/it/>

<sup>2</sup> <https://www.idscorporation.com/>

## Bibliografia

- [1] <https://www.skaobservatory.org>
- [2] <https://www.skatelescope.org/the-ska-project>
- [3] SKA Organisation, *Advancing Astrophysics with the Square Kilometre Array*, ed. SKA Organisation, (2015); <https://www.skatelescope.org/books/>
- [4] <https://italy.skatelescope.org/ska-italia/tecnologia/>
- [5] <https://sites.google.com/inaf.it/arcetriradiogroup/research-activities>
- [6] P. Bolli, L. Mezzadrelli, J. Monari et al., “*Test-Driven Design of an Active Dual-Polarized Log-Periodic Antenna for the Square Kilometre Array*”, IEEE Open Journal of Antennas and Propagation, vol. 1, pp. 253-263, (2020).
- [7] P. Bolli, D. B. Davidson, M. Bercigli, et al., “*Computational electromagnetics for the SKA-Low prototype station AAVS2*”, JATIS, vol. 8, 1, 011017, (2022).
- [8] F. Paonessa, L. Ciorba, G. Virone, et al., “*SKA-Low Prototypes Deployed in Australia: Synoptic of the UAV-based Experimental Results*”, URSI Radio Science Letters, vol. 2, (2020).
- [9] G. Comoretto, R. Chiello, M. Roberts et al., “*The Signal Processing Firmware for the Low Frequency Aperture Array*”, JAI vol.6, 1, 1641015 (2017).
- [10] Baffa, C., Giani, E., Vela Nuñez, M., “*SKA Monitor and Control: Harmonization Challenges*”, ADS XXVI ASP Conference Series, Vol. 521, p.185, (2019).
- [11] Baffa, C., et al. “*SKA CSP controls: technological challenges*”, Proceedings of the SPIE, Volume 9913, id. 99132Z 7 pp. (2016).
- [12] C. Belli, G. Comoretto, “*Describing LFAA using SysML*”, SKA Project Series

## Bibliography

- [1] <https://www.skaobservatory.org>
- [2] <https://www.skatelescope.org/the-ska-project>
- [3] SKA Organisation, *Advancing Astrophysics with the Square Kilometre Array*, ed. SKA Organisation, (2015); <https://www.skatelescope.org/books/>
- [4] <https://italy.skatelescope.org/ska-italia/tecnologia/>
- [5] <https://sites.google.com/inaf.it/arcetriradiogroup/research-activities>
- [6] P. Bolli, L. Mezzadrelli, J. Monari et al., “*Test-Driven Design of an Active Dual-Polarized Log-Periodic Antenna for the Square Kilometre Array*”, IEEE Open Journal of Antennas and Propagation, vol. 1, pp. 253-263, (2020).
- [7] P. Bolli, D. B. Davidson, M. Bercigli, et al., “*Computational electromagnetics for the SKA-Low prototype station AAVS2*”, JATIS, vol. 8, 1, 011017, (2022).
- [8] F. Paonessa, L. Ciorba, G. Virone, et al., “*SKA-Low Prototypes Deployed in Australia: Synoptic of the UAV-based Experimental Results*”, URSI Radio Science Letters, vol. 2, (2020).
- [9] G. Comoretto, R. Chiello, M. Roberts et al., “*The Signal Processing Firmware for the Low Frequency Aperture Array*”, JAI vol.6, 1, 1641015 (2017).
- [10] Baffa, C., Giani, E., Vela Nuñez, M., “*SKA Monitor and Control: Harmonization Challenges*”, ADS XXVI ASP Conference Series, Vol. 521, p.185, (2019).

- [13] G. Macario, G. Pupillo, G. Bernardi, et al. “*Characterization of the SKA1-Low prototype station Aperture Array Verification System 2*”, JATIS, vol. 8, 1, 011014, (2022).

Giulia Macario: ricercatrice post-doc; radioastronomia a bassa frequenza.

Carlo Baffa: astronomo; strumentazione astronomica e software associato.

Carolina Belli: ricercatrice; ingegneria di sistema.

Pietro Bolli: primo tecnologo; analisi elettromagnetiche.

Simone Chiarucci: tecnologo; strumentazione digitale per radioastronomia.

Giovanni Comoretto: astronomo associato; strumentazione digitale per radioastronomia.

Paola Di Ninni: tecnologa; analisi elettromagnetiche.

Elisabetta Giani: tecnologa; strumentazione astronomica e software associato.

Georgios Kyriakou: ricercatore dottorando, analisi elettromagnetiche.

- [11] Baffa, C., et al. “*SKA CSP controls: technological challenges*”, Proceedings of the SPIE, Volume 9913, id. 99132Z 7 pp. (2016).

- [12] C. Belli, G. Comoretto, “*Describing LFAA using SysML*”, SKA Project Series.

- [13] G. Macario, G. Pupillo, G. Bernardi, et al. “*Characterization of the SKA1-Low prototype station Aperture Array Verification System 2*”, JATIS, vol. 8, 1, 011014, (2022).

Giulia Macario: post-doc researcher; low-frequency radio astronomy.

Carlo Baffa: astronomer; astronomical instruments and associated software.

Carolina Belli: researcher; system engineering.

Pietro Bolli: first technologist; electromagnetic analysis.

Simone Chiarucci: technologist; digital instrumentation for radioastronomy.

Giovanni Comoretto: associate astronomer; digital instrumentation for radioastronomy.

Paola Di Ninni: technologist; electromagnetic analysis.

Elisabetta Giani: technologist; astronomical instruments and associated software.

Georgios Kyriakou: PhD fellow, electromagnetic analysis.



Il Colle di  
Galileo

# La cristallizzazione di un superfluido: il supersolido

*The crystallization of a superfluid: the supersolid*

Nicolò Antolini, Giulio Biagioni

**Sommario.** I superfluidi possono cristallizzare, acquistando rigidità e plasticità analogamente ai solidi classici, ma mantenendo le loro tipiche proprietà di coerenza quantistica. Il risultato è un supersolido, recentemente osservato in un esperimento di gas quantistici dipolari. Abbiamo studiato la transizione di fase dal superfluido al supersolido, mettendo in luce le analogie e le differenze con la corrispondente transizione classica da liquido a solido.

**Keywords.** Fasi quantistiche della materia, cristalli, superfluidi, condensati di Bose-Einstein, transizioni di fase.

La trasformazione di un liquido in un solido è uno dei fenomeni fisici più elementari, e al tempo stesso affascinanti, che abbiamo quotidianamente sotto gli occhi. Nella sua apparente semplicità, la cristallizzazione dei liquidi è una transizione di fase ampiamente studiata nell'ambito della meccanica statistica. In un recente esperimento, condotto al CNR-INO di Pisa e LENS di Firenze, abbiamo studiato un nuovo tipo di transizione [1], che riguarda la cristallizzazione di un superfluido in un supersolido, gli analoghi quantistici dei liquidi e solidi.

I superfluidi, noti ormai da decenni, sono costituiti da atomi le cui funzioni d'onda sono completamente delocalizzate e si sovrappongono le une alle altre.

**Summary.** Superfluids can become crystals, obtaining rigidity and plasticity in analogy with classical solids, but keeping their typical properties of quantum coherence. The resulting phase is a supersolid, recently observed experimentally in a dipolar quantum gas. We have studied the phase transition from the superfluid to the supersolid, highlighting the analogies and differences with the corresponding classical transition from liquid to solid.

**Keywords.** quantum phases of matter, superfluids, Bose-Einstein condensates, phase transitions.

The transformation of a liquid into a solid is one of the most elementary, as well as fascinating, physical phenomena that we witness every day. Despite its apparent simplicity, the crystallization of liquids is a phase transition widely studied in the field of statistical mechanics. In a recent experiment, performed at the CNR-INO in Pisa and LENS in Florence, we studied a

Questo dà luogo ad alcuni spettacolari effetti macroscopici, come la possibilità di scorrere senza attrito, muoversi senza inerzia e trasportare corrente elettrica senza dissipazione. Il primo superfluido realizzato è stato l'elio liquido, ma oggi le proprietà superfluide vengono studiate approfonditamente anche negli esperimenti di gas quantistici, di cui l'Università di Firenze, il CNR-INO e il LENS sono pionieri.

La fase supersolida, d'altro canto, è stata realizzata per la prima volta in un esperimento di gas quantistici dipolari guidato dal Prof. Giovanni Modugno [2]. Partendo da un condensato di Bose-Einstein (superfluido) e sfruttando le interazioni magnetiche tra gli atomi, è possibile indurre il superfluido a formare dei *clusters* contenenti migliaia di atomi ciascuno, distribuiti in strutture regolari. Ogni cluster rappresenta l'equivalente di un sito reticolare di un solido classico, conferendo rigidità al sistema. Il punto cruciale è che, almeno in un piccolo regime di parametri, le funzioni d'onda dei costituenti rimangono sovrapposte anche tra *clusters* diversi, mantenendo quindi le proprietà superfluide.

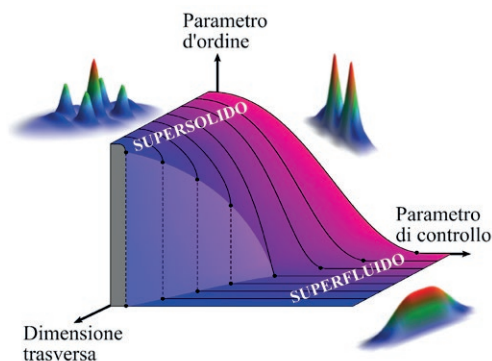
Al contrario dei solidi classici, dove la transizione di fase avviene abbassando la temperatura, ovvero rallentando le molecole e permettendogli di localizzarsi in un reticolo, nel caso del supersolido la transizione avviene a temperatura zero. Parliamo quindi di transizione di fase quantistica: il parametro di controllo, invece della temperatura, è l'intensità delle interazioni dipolari, che possiamo variare nell'esperimento. Il parametro d'ordine consiste invece nel contrasto di densità tra i picchi e le valli del supersolido: è uguale a zero nel superfluido e cresce entrando nel supersolido (vedi figura).

new type of transition [1] concerning the crystallization of a superfluid into a supersolid, the quantum analogs of liquids and solids.

Known for decades, superfluids are made of atoms whose wave functions are completely delocalized and overlap each other. This gives rise to some extraordinary macroscopic effects, such as the ability to flow without friction, move without inertia, and carry electric current without dissipation. The first superfluid created was liquid helium, but today the properties of superfluids are also studied in depth in quantum gases experiments, a field in which the University of Florence, LENS and CNR-INO are pioneers.

The supersolid phase, on the other hand, was recently realized for the first time in a dipolar quantum gas experiment led by Prof. Giovanni Modugno [2]. Starting from a Bose-Einstein condensate (superfluid) and exploiting the magnetic interactions between the atoms, it is possible to induce the superfluid to spontaneously form clusters containing thousands of atoms each, arranged in regular structures. Each cluster represents the equivalent of a lattice site of a classic solid, giving rigidity to the system. The crucial point is that, at least in a small window of parameters, the wave functions of the constituents are still overlapping even between different clusters, thus maintaining the superfluid properties.

Unlike classical solids, where the phase transition occurs by lowering the temperature, hence slowing down the molecules and allowing them to localize in a lattice, in the case of the supersolid the transition occurs at zero temperature. We, therefore, call it a quantum phase transition: the control parameter, instead of temperature, is the intensity of the dipolar interactions,



Nei solidi con un numero macroscopico di siti reticolari la transizione classica è discontinua, con un salto del parametro d'ordine. Il supersolido realizzato negli esperimenti, invece, ha pochi siti reticolari ed è confinato in una trappola armonica che ne influenza la dimensionalità. Nel nostro recente articolo abbiamo scoperto che questa configurazione offre uno spettro più ricco di transizioni possibili.

Quando il sistema è debolmente confinato troviamo supersolidi di grandi dimensioni con struttura cristallina triangolare. In questi casi la transizione da superfluido a supersolido avviene in maniera discontinua. Nel limite opposto, quando il supersolido viene compresso da un forte confinamento trasverso, la struttura cristallina si crea lungo una sola direzione ottenendo una singola fila di

which we can vary in the experiment. The order parameter, on the other hand, is the density contrast between the peaks and valleys of the supersolid: it is equal to zero in the superfluid and grows as the supersolid forms (see figure).

In solids with a macroscopic number of lattice sites, the classical transition is discontinuous, with a jump in the order parameter. The supersolid produced in the experiments, on the other hand, has only a few lattice sites and is confined in a harmonic trap which affects its dimensionality. In our recent article, we found that this setup offers a richer spectrum of possible phase transitions.

When the system is weakly confined we have large supersolids with a triangular crystal structure. In these cases, the transition from superfluid to supersolid occurs discontinuously. In the opposite limit, when the supersolid is compressed by strong transverse confinement, the crystalline structure is created along one direction obtaining a single row of density peaks (see figure). In this regime the transition is continuous, without jumps in the order parameter.

By studying the crossover between these two regimes, we found that the discontinuous transition persists even in strongly confined supersolids, thanks to the presence of the superfluid background which maintains a triangular structure. The discovery of a region of continuous transitions offers new possibilities for experimental investigations, allowing the creation of less excited supersolids, a necessary requirement for studying delicate phenomena such as the production of entanglement.



picchi di densità (vedi figura). In questo regime la transizione è continua, senza salti nel parametro d'ordine.

Studiando il *crossover* tra questi due regimi, abbiamo scoperto che la transizione discontinua persiste anche in supersolidi fortemente confinati, grazie alla presenza del background superfluido che mantiene una struttura triangolare. La scoperta di una regione di transizioni continue offre nuove possibilità di indagine, permettendo di formare supersolidi meno eccitati, un requisito necessario per studiare fenomeni delicati come la produzione di entanglement.

## Bibliografia

- [1] G. Biagioni, N. Antolini, A. Alaña, M. Modugno, A. Fioretti, C. Gabbanini, L. Tanzi, and G. Modugno, *Dimensional Crossover in the Superfluid-Supersolid Quantum Phase Transition*. Phys. Rev. X 12, 021019 (2022).
- [2] L. Tanzi, E. Lucioni, F. Famà, J. Catani, A. Fioretti, C. Gabbanini, R.N.Bisset, L. Santos, G. Modugno, *Observation of a dipolar quantum gas with metastable supersolid properties*. Phys. Rev. Lett. 122, 130405 (2019).

Giulio Biagioni è dottorando in fisica presso l'Università di Firenze. Nicolò Antolini è dottorando in fisica presso il LENS. Entrambi sono ricercatori associati presso l'Istituto Nazionale di Ottica. Svolgono la loro attività sperimentale presso il CNR-INO sezione di Pisa e si occupano dello studio della fase supersolida della materia in un gas quantistico dipolare.

## Bibliography

- [1] G. Biagioni, N. Antolini, A. Alaña, M. Modugno, A. Fioretti, C. Gabbanini, L. Tanzi, and G. Modugno, *Dimensional Crossover in the Superfluid-Supersolid Quantum Phase Transition*. Phys. Rev. X 12, 021019 (2022).
- [2] L. Tanzi, E. Lucioni, F. Famà, J. Catani, A. Fioretti, C. Gabbanini, R.N.Bisset, L. Santos, G. Modugno, *Observation of a dipolar quantum gas with metastable supersolid properties*. Phys. Rev. Lett. 122, 130405 (2019).

Giulio Biagioni is a PhD student at the University of Florence. Nicolò Antolini is a PhD student at LENS. Both are researchers at the Istituto Nazionale di Ottica. They carry out experimental activities at the CNR-INO in Pisa, where they study the supersolid phase of matter in a dipolar quantum gas.





PILLOLE DI STORIA / HISTORICAL PILLS

Beatrice, laureata in Fisica a 19 anni al tempo di Garbasso | *Beatrice, a degree in Physics at the age of 19 at the time of Garbasso* ..... 5  
 MASSIMO MAZZONI, ALBERTO RIGHINI, PIERO MAZZINGHI

RAPPORTI DI ATTIVITÀ / ACTIVITY REPORTS

Topological properties of gauge theories and their applications to high-energy and condensed-matter physics ..... 23  
 Gravitational scattering, inspiral, and radiation ..... 27

IN EVIDENZA / HIGHLIGHTS

La ricerca della vita nel Sistema Solare passa attraverso il Laboratorio di Astrobiologia dell'INAF-Osservatorio Astrofisico di Arcetri | *The search for life in the Solar System passes through the Astrobiology Laboratory of the INAF-Arcetri Astrophysical Observatory* ..... 31  
 TERESA FORNARO, JOHN ROBERT BRUCATO

PLATO e Ariel, le prossime missioni di classe media del programma dell'ESA sulla scoperta e caratterizzazione di esopianeti dallo spazio: il contributo di INAF-Arcetri | *PLATO and Ariel, the next medium-class Missions of the ESA's roadmap on the discovery and characterization of exoplanets from space: the contribution of INAF-OAA* ..... 41  
 MAURO FOCARDI

Il contributo dell'INAF-Osservatorio Astrofisico di Arcetri alla tecnologia ed alle prime osservazioni di SKA-Low | *The INAF-Arcetri Astrophysical Observatory contribution to SKA-Low: technology and first observations* ..... 49  
 GIULIA MACARIO, CARLO BAFFA, CAROLINA BELLI, PIETRO BOLLI, SIMONE CHIARUCCI, GIOVANNI COMORETTO, PAOLA DI NINNI, ELISABETTA GIANI, GEORGIOS KYRIAKOU

La cristallizzazione di un superfluido: il supersolido | *The crystallization of a superfluid: the supersolid* ..... 61  
 NICOLÒ ANTOLINI, GIULIO BIAGIONI



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
FIRENZE



INO-CNR  
ISTITUTO  
NAZIONALE DI  
OTTICA

Versione elettronica | Online version:

ISSN 2281-9711 (online) <http://www.fupress.com/cdg>