

Volume 10

IL COLLE
di
GALILEO

1 · 2021

IL COLLE di GALILEO



ISSN
2281-7727



Il Colle di Galileo

Volume 10, 1, 2021



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*
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, *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



CNR-INO
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

© 2021 Firenze University Press
Università degli Studi di Firenze
Firenze University Press
via Cittadella, 7, 50144 Firenze, Italy
www.fupress.com/
Printed in Italy



Sommario

Table of contents

RAPPORTI DI ATTIVITÀ / ACTIVITY REPORTS

- 5 Cortona Young (online conference)
- 9 “New Frontiers in the Search for Dark Matter”
- 15 Breakdown of Ergodicity in Isolated Quantum Systems: From Glassiness to Localization

IN EVIDENZA / HIGHLIGHTS

- 19 La polarizzazione: uno strumento diagnostico per i dischi protoplanetari
Polarization: a diagnostic tool for protoplanetary disks
Francesca Bacciotti
- 25 L'età di una stella rivelata dalla sua composizione chimica
Stellar age revealed by chemical composition
Laura Magrini, Giada Casali
- 31 L'ultima frontiera dell'ottica adattiva a stella guida naturale
The last frontier of natural guide star adaptive optics
Enrico Pinna
- 37 Il microspettrometro in una goccia
A Fourier transform microspectrometer in a droplet
Pietro Malara
- 43 Un sistema di crittografia quantistica per cifrare la videochiamata del Premier a ESOF2020
A quantum cryptography system used to encrypt the Italian Prime Minister's video-call at ESOF2020
Ilaria Vagniluca, Nicola Biagi, Davide Bacco, Alessandro Zavatta



Il Colle di
Galileo

Cortona Young (online conference)

Galileo Galilei Institute – Florence – May 27-29, 2020
Organizing Committee: Anna Ceresole, Marialuisa Frau,
Ezio Maina, Domenico Orlando, Marco Taoso, Roberto
Tateo, Paolo Torrielli (UniTO, INFN-TO), Stefania De
Curtis (INFN-FI & GGI)

Abstract. The e-Conference “Cortona Young”, hosted by the GGI on May 27-29, 2020, was set up as a response to the postponement of the 2020 edition of the Italian National Meetings “New Frontiers in Theoretical Physics - Convegno di Fisica Teorica di Cortona”, due to the COVID-19 pandemic. The conference was primarily addressed to young researchers, graduate students and postdocs connected with the Italian community of theoretical high energy physics. The aim was to give visibility to their most recent results in spite of the difficult situation for scientific exchanges. The program consisted of 12 live web-seminars, selected among over 50 applications, and of 24 video posters, made available through the GGI YouTube channel. The selected topics covered many different aspects of theoretical high energy physics, ranging from field and string theory to statistical mechanics, phenomenology and astroparticle physics. There were over 140 online participants, who were able to enter different virtual rooms for more focused discussion sessions. A special committee selected the best seminar, whose speaker was awarded a plenary talk in the next live edition of the Cortona meeting.

Keywords. Theoretical High Energy Physics.

Summary of the conference:

The National bi-annual Conference “New Frontiers in Theoretical Physics”, which traditionally takes place in the late spring in Cortona, in the Palazzone of the Scuola Normale Superiore di Pisa, has for many years been the key occasion for the entire community of Italian high-energy theoretical physicists to join and discuss research results and perspectives in this area. The scientific focus covers a wide range of topics, from formal aspects of field theory and statistical mechanics to astroparticle physics as well as the more applied lines of phenomenology.

One of the most distinctive features of this conference is the emphasis given to the participation of early stage researchers: at least half of the participants are usually young Ph.D. students and postdocs, and almost all specialist talks are delivered by them.

The XXXVII edition of the conference, organized by the Physics Department of the University of Turin and the Turin division of the National Institute

of Nuclear Physics, was originally scheduled for May 2020. However, the spring outbreak of the COVID-19 pandemic obviously forced us to postpone the event.

The idea of organizing “Cortona Young”, an on-line version of the conference, originated from discussions between the director of the GGI and the organizing committee as a response to the need of maintaining contact among the members of the Italian community of theoretical physics during the lockdown period. It also allowed younger colleagues to preserve the opportunity to present the results of their work, to acquire visibility and to be part of a networking event in view of their next career steps. The proposal was very well received, and the online conference took place from 27 to 29 May, with strong participation from both young and senior scientists.

The scientific program included 12 seminars of 20 minutes by live video, all given by Ph.D. students and postdocs. The presentations were selected by the organizers among more than 50 proposals, covering different aspects of theoretical physics, including supersymmetric and conformal field theories, integrability, string theory, black holes, gravitational waves, heavy quark physics and standard model physics. Twenty-four more contributions were presented in the form of ten-minute video posters, recorded by the speakers and posted on the GGI YouTube channel, where they are still available. These contributions were also discussed in several special virtual breakout sessions, chaired by senior participants.

The new video-poster format for the presentation of the short contributions was greatly appreciated, both by speakers and conference participants. The speakers experimented with different technical solutions for recording their videos: from the simplest arrangement, with slides and background voice, to technically more complex presentations, in which the audio was synchronized with the animated videos. In all cases, the results were very interesting and showed us that this format could be useful in many other contexts.

A special committee, composed of E. Ercolessi (University of Bologna), A. Lerda (University of Eastern Piedmont), G. Martinelli (University of Rome - La Sapienza), G. Mussardo (SISSA), S. Pascoli (Durham University), M. Petrini (Sorbonne Université) and F. Piccinini (INFN Pavia), awarded the prize for the best seminar to Elisa Maggio (University of Rome “La Sapienza”) for her talk on “Gravitational wave signatures of exotic compact objects”. She will therefore have the opportunity to give a plenary seminar on this topic in the next live edition of the Cortona Conference. A special mention was given to Giovanni Pellizzoli (Universität Würzburg) for his talk on “Polarized Weak Bosons at the LHC”.

Taking into account an online vote by participants, the organizing committee awarded two ex-aequo prizes for the best video posters to Chiara Signorile-Signorile of Torino University, who gave an original and very effective presentation on “Dealing with Infrared singularities in perturbative QCD”, and to Carlo Heissenberg of Nordita & Uppsala U, who spoke on “Black-hole scattering from amplitudes in any Dimension”.

This event was hosted on the GGI website and broadcast under the Zoom-Cern license. Domenico Orlando doubled up as organizer and magician, dealing with all technical aspects of the presentations. The website of the meeting, including all presentation slides, is available at the address https://www.ggi.infn.it/cortona_young.

New Frontiers in Theoretical Physics
Convegno nazionale di fisica teorica

CORTONA YOUNG
e-Conference
for young researchers

Ivano Basile (SNS Pisa)
Lorenzo Bianchi (INFN Torino)
Simona Bianco (Università di Napoli)
Marzia Bordone (Universität Siegen)
Riccardo Borsato (IGFAE Santiago de Compostela)
Marco Cardinali (Università di Pisa)
Niccolò Cribiori (TU Wien)
Eleonora Di Valentino (University of Manchester)
Azeem Hasan (INFN Lecce)
Elisa Maggio (Sapienza Università di Roma)
Luca Mattiazzi (Università di Padova)
Giovanni Pelliccioli (Universität Würzburg)

27-29 May 2020

Organizers
Anna Ceresole, Marioluisa Frau, Ezio Maino, Domenico Orlando, Marco Taoso, Roberto Tateo, Paolo Torrielli (Università di Torino and INFN Torino), Stefania de Curtis (INFN Firenze and GGI)

https://www.ggi.infn.it/cortona_young

Figure 1. Poster of the e-Conference.



“New Frontiers in the Search for Dark Matter”

Florence, 26 Aug–11 Oct 2019

Organizers: Marco Battaglieri (INFN Genoa), Laura Baudis (University of Zurich), Francesco D’Eramo (University of Padua & INFN Padova), Claudia Frugiuele (Weizmann Institute of Science), Eric Kuflik (The Hebrew University of Jerusalem), Tongyan Lin (UC San Diego), Samuel D. McDermott (Fermilab), Hitoshi Murayama (UC Berkeley & LBNL & IPMU), Stefano Profumo (UC Santa Cruz & SCIPP)

Abstract. The workshop brought together world experts working on the origin of dark matter, one of the most urgent questions in fundamental physics. For seven weeks, scientists explored new theoretical avenues as well as novel detection strategies. The event benefited from the presence of Simons Fellows, who led discussions on well-motivated theories and the status of current fast-moving experimental searches.

Keywords. Dark Matter, Beyond the Standard Model, New Physics, High energy phenomenology, Cosmology.

Scientific context and motivations

What is in our universe? Such a simple question is at the heart of one of the most urgent open problems in fundamental physics, and it has always been central to the curiosity of human beings. In the last few decades, we have achieved an astonishing unified description: all the matter we observe, from the tiny sub-nuclear-length scales to the size of our observable universe, is made of the same building blocks. More importantly, we also understand the principles governing the interactions among them. These particles interact through the gravitational force described by the theory of general relativity, and they also interact through strong and electroweak forces. The two combined form the Standard Model of Particle Physics. The discovery of the long-sought Higgs boson on 4 July 2012 marked a milestone: the Standard Model is now a theoretically complete and self-consistent description of strong and electroweak interactions. The symmetry of its equations is stunning, while its capability of passing every collider test is even more impressive.

Despite its tremendous success, the Standard Model leaves many questions unanswered. One of the most urgent, based on firm observational evidence, is the microscopic nature of dark matter. We have collected evidence for dark matter from several independent observations, such as the rotation curves of galaxies, gravitational lensing, fluctuations in the cosmic microwave background, and formation of structure in the universe. However, all we know about dark matter is inferred from its gravitational effects. What we have learned from these observations and the non-observation of dark matter via other forces is as follows: it makes up 27% of the energy density of the universe, it is mostly cold and massive, it is non-baryonic with suppressed (or vanishing) couplings to the strong and electroweak gauge groups, and it does not interact too strongly with itself. All of these characteristics indicate that explaining the particle identity of dark matter requires new physics beyond the Standard Model.

The motivation for the workshop was to critically assess the status of the hunt for dark matter. This includes both theoretical and experimental approaches, with specific focus on the synergy between these two aspects of a single joint adventure. The workshop brought together world experts in these fields to address these important questions.

Regular workshop activities

With the sole exception of the fifth week, when GGI hosted a conference with a large number of daily talks, the workshop activities consisted of one morning talk each day with plenty of time for questions and discussion. After lunch, participants could interact in an informal setting using GGI's facilities.

Research on dark matter is a very broad field at the interface between high-energy physics and cosmology. To stimulate profitable discussions, each week featured a specific topic, such that participants who were experts on a specific subject could make sure to visit GGI at the right time. New theories for dark matter was the topic of the first week. The second to fourth weeks were dedicated to discussing the three conventional ways to search for dark matter. One can search for dark matter elastic scattering with targets in our deep underground laboratories, such as the case of "Laboratori Nazionali del Gran Sasso" (LNGS). One can also look for the debris of dark matter annihilations in the sky, and this is one of the signatures searched for by the Fermi gamma-ray telescope or the Alpha Magnetic Spectrometer (AMS) located on the international space station. Finally, one could try to directly produce dark matter particles in an accelerator environment, such as the Large Hadron Collider (LHC) at CERN in Geneva.

Week six was devoted to a particular dark matter candidate, the QCD axion, research on which is motivated by the fact that it also explains why strong interactions respect time-invariance to an exquisite accuracy (an issue known as "the

strong CP problem"). Finally, primordial black holes dark matter and gravitational waves were the subjects discussed in the last week of the workshop.

Workshops held at Villa il Gioiello

There were three special days on which the scientific activities of the workshop took place at Villa il Gioiello. Distinguished scientists gave presentations on the progress of their recent research, and the day was organized in such a way that after each presentation there was plenty of time for questions. Lunch was provided onsite and workshop participants could spend the afternoon at the Villa to continue scientific discussions.

Tim Tait (University of California, Irvine) gave a talk on a new dark matter candidate within the framework of an emergent solution to the strong CP problem. Yanou Cui (University of California, Riverside) explained how gravitational waves could probe the pre-BBN universe with important consequences on dark matter relic density. Paddy Fox (Fermilab) explained how neutrino experiments could also function as dark matter detectors. Nicholas Rodd (University of California, Berkeley) gave an overview of the future of indirect detection experiments. Stefano Profumo (University of California, Santa Cruz) highlighted the landscape of scenarios for dark matter from primordial black holes. Zurab Berezhiani (University of L'Aquila) brought dark matter candidates from mirror worlds. Roni Harnik proposed new probes for the dark sector based on precision physics experiments. Giovanni Villadoro reported recent progress in the calculation of axion relic density.

Patio discussions

A novel feature of this workshop was the GGI patio discussions. These activities took place during the regular weeks, and not during the conference, as spontaneous blackboard discussions on the outdoor patio. The topics were based on the interest of participants, and the discussions were very interactive with all participants taking part in the debates. Each was moderated by a discussion leader, an expert in the subject under examination. The topics dealt with included the 21 cm line cosmological signal, the galactic center excess, solutions to the cosmological constant problem, and new strategies in the search for axion-like particles.

Conference

During the fifth week, the program turned its attention to the specialist conference. There were morning and afternoon sessions from Monday through Thurs-

day, and one final morning session on Friday. More than 100 scientists from all over the world came to GGI to attend this conference, which featured 46 invited talks. The topics of the nine sessions spanned different aspects of dark matter physics: the landscape of theoretical models, dark matter impact on cosmological structures, dark matter experimental searches, the connection with gravitational wave physics, new atomic physics probes, and dark matter influence on stars.

Simons Fellows

Three eminent scientists in the field spent a significant amount of time at GGI and played a central role in the workshop activities. They helped in organizing the daily seminars, delivered seminars on their research activities, and led discussions. These Simons Fellows for this GGI workshop are:

- Paddy Fox (Fermilab)
- John March-Russell (Oxford University)
- Giovanni Villadoro (ICTP, Trieste)

Summary

It took over two thousand years to learn only 5% of what is in the universe. And it is certainly a blessing for us that we have been able to personally witness the crucial developments which unveiled this 5%, a process which culminated in the Higgs boson discovery. Even more exciting is the extraordinary effort, both theoretical and experimental, to clarify the microscopic identity of dark matter that accounts for 27% of energy density. Even though we have no way to guarantee its discovery in the coming years, such outstanding activity should make all of us very optimistic.

This workshop gathered together the scientific community for seven weeks at GGI, generating several new ideas. Novel theoretical models were conceived within the walls of GGI, which will be tested in the near future. At the same time, new experimental techniques will improve our reach in the next few years and may ultimately lead to new discoveries. It is definitely very exciting for all scientists to be part of this adventure and to have the opportunity to write such an important chapter in the book of Nature.

Acknowledgements

The organizers are grateful to the administrative staff of GGI for their invaluable help and assistance both before the event and during the workshop. It is a real and sincere pleasure to thank Annalisa Anichini, Alessio Attardi, Roberto Baglioni, Mauro Morandini and Mirella Ridi.



Figure 1. A patio discussion at GGI.



Il Colle di
Galileo

Breakdown of Ergodicity in Isolated Quantum Systems: From Glassiness to Localization

May 20 - July 12, 2019

Organizers: B. Altshuler (Columbia University), V. Kravtsov (Landau Institute, Moscow and ICTP), C. Laumann (Boston University), G. Parisi (La Sapienza Università di Roma and INFN), A. Scardicchio (ICTP and INFN)

Abstract. We report on a workshop, held at GGI, in which researchers from several universities and research centers around the world met to discuss recent breakthroughs in our understanding of the approach to thermal equilibrium of quantum systems. The discussion spanned from the fundamental problems concerning the interplay of the foundations of thermodynamics and quantum mechanics, to the implications for quantum technologies, in particular for quantum computing.

Keywords. Complex Systems, Quantum Computation and Quantum Simulation, Entanglement, Equilibration, Foundations of Statistical Physics.

Quantum mechanics is now a century old, but its implications are still surprising us, in particular when the behavior of systems composed of many elementary objects (like fundamental particles or atoms) is considered. Thermodynamics is even older (the works of Carnot date to more than two centuries ago) but it is still a perfectly valid, unchallenged description of a *macroscopic system*, namely one in which the number of elementary components is very large. How does the system behavior change from a complex dynamic dominated by quantum mechanics to a coarse-grained, simpler one described by statistical mechanics and eventually thermodynamic equilibrium? Is it necessarily the fate of a sufficiently large, isolated system to reach thermodynamic equilibrium? Notice that this is a non-trivial question, since large classical mechanical systems (as exemplified by the theory surrounding the KAM theorem of Kolmogorov, Arnold, and Moser) equilibrate through a mechanism called *ergodicity*, which is taken as the basis of statistical mechanics.

Several experimental and theoretical physicists from all over the world met at GGI from May to July 2019 to discuss recent breakthroughs on this topic. They reviewed and discussed our novel understanding of the behavior of complex

quantum systems and, in particular, which features of quantum mechanics stop the generic mechanisms of equilibration. Far from being of mere academic interest, this problem is at the core of a possible *quantum supremacy* of quantum technologies, especially of quantum computing on present-day computers. The importance of this question was testified by the participants at the workshop, whose range of expertise was unusual for a meeting on technical, theoretical and experimental Physics.

About 140 physicists took part in the workshops held over the course of eight weeks, while about 60 persons attended the main conference, which lasted a week. Participants came from the most diverse backgrounds: they included, for example, mathematical physicists *Michael Aizenman* (Princeton), *John Imbrie* (Virginia Tech), and *Simone Warzel* (TU Munich); professors of experimental Physics *Paola Cappellaro* (MIT) and *Edward Grant* (UBC Vancouver); and Dr. *Hartmut Neven*, Director of Engineering at Google and leader of the Google Quantum Artificial Intelligence Lab (there were indeed several participants from the Google QAI Lab). These different figures took interest and actively participated in the meeting, which consisted of several seminars per week as well as spontaneously organized lectures; the latter were usually the result of requests from younger participants, as the meeting also hosted about 30 registered students PhD and 25 postdoctoral researchers. The variety of the background of the scientists attending the meeting was recognized by the participants as one of a kind, with some of them (by their own admission) being exposed for the first time to all the various aspects of a topic so multi-faceted as the one discussed.

The meeting also hosted two longer-term visitors, supported by a grant of the Simons Foundation, namely Prof. S. Sondhi (Princeton) and Prof. M. Kardar (MIT), two widely recognized theoretical physicists who helped cement the interaction and mentor the students with their experience and hindsight.

Regarding the scientific results of the meeting, both theorists and experimentalists agreed on the possibility that quantum mechanics can indeed hinder thermalization in the presence of quenched disorder in the system. In this case, therefore, thermodynamics *does not provide* a valid description of the long-time behavior of the system. Ergodicity is *broken*. These ideas are the continuation of the lines of the work of Phil Anderson, one of the most prolific and widely recognized theoretical physicists of the second half of 20th century (his work on this topic earned him the Nobel Prize in Physics in 1973). Two of the organizers, Giorgio Parisi (Università La Sapienza) and Boris Altshuler (Columbia) were arguably among the people who contributed the most to the topic of ergodicity breaking in quantum mechanics with their works on spin glasses and Anderson localization, respectively.

The statement that quantum mechanics can hinder thermalization in several *typical* (i.e. non fine-tuned) systems has profound consequences on both fundamental and applied Physics. Examples discussed in the workshop included the

dynamics of lattice gauge theories (discrete space versions of theories of interacting particles), quantum spin glasses (disordered coherent quantum systems), electrons in semiconductors, arrays of Josephson junctions, and, last but not least, quantum circuits. Implications ranged from a possible explanation of deviations from the theory of the results of heavy ion collision experiments, to the analysis of the performance of a quantum algorithm.

We were happy to see that GGI and INFN took the opportunity to be at the forefront of these research lines, even if the topic is not easily classifiable among those usually discussed at GGI meetings, given the multidisciplinary nature of the subjects of this workshop .

Francesca Bacciotti

La polarizzazione: uno strumento diagnostico per i dischi protoplanetari

Polarization: a diagnostic tool for protoplanetary disks

INAF - Osservatorio Astrofisico di Arcetri

Riassunto. Il disco rotante di gas e polvere osservato attorno alle stelle giovani è il luogo di nascita dei pianeti. Lo studio delle sue proprietà è fondamentale per comprendere la formazione e l'evoluzione di questi mondi nascenti. I dati polarimetrici ottenuti con l'Atacama Large Millimeter / Submillimeter Array (ALMA) sono un nuovo potente strumento per indagare le proprietà della polvere e della struttura magnetica in questi sistemi.

Parole chiave. Dischi protoplanetari, polarizzazione, ALMA, polvere, campi magnetici.

Lo studio dei dischi attorno alle stelle in formazione è uno degli argomenti più affascinanti dell'astrofisica moderna. Uno degli obiettivi principali di tali studi è ricostruire correttamente le condizioni iniziali per la nascita dei pianeti. Negli ultimi anni, osservazioni ad alta risoluzione angolare come quelle condotte con l'Atacama Large Millimeter / submillimeter Array (ALMA) hanno portato a passi avanti significativi nella conoscenza di questi sistemi. Grazie ad ALMA ora sappiamo, per esempio, che i dischi hanno sotto-strutture come anelli, cavità

Summary. The rotating disk of gas and dust observed around young stars is the birthplace of planets. The study of its properties is fundamental to understand the formation and evolution of nascent worlds. Polarimetric data obtained with the Atacama Large Millimeter/Submillimeter Array (ALMA) are a new powerful tool to investigate the properties of the dust and magnetic structure in these systems.

Keywords. Protoplanetary disks, Polarization, ALMA, Dust, Magnetic fields.

The study of disks around forming stars is one of the most intriguing topics in current astrophysics. One of the main goals of such studies is to correctly establish the initial conditions for the birth of planets. In recent years, high angular resolution studies, such as those conducted with the Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA), have allowed for significant advances in our knowledge of these systems. Thanks to ALMA, we now know that disks have



e spirali, che possono essere associate alle fasi iniziali di aggregazione dei grani di polvere. Inoltre, le osservazioni di ALMA hanno finalmente confermato che i getti di materiale espulsi in direzione perpendicolare al disco ruotano attorno al loro asse, il che significa che in linea di principio possono estrarre il momento angolare in eccesso dal sistema stella/disco, regolandone così l'evoluzione. Vi sono però ancora numerose incognite in questo campo. Ad esempio, i modelli di aggregazione della polvere richiedono come input la conoscenza della popolazione relativa di grani di diversa dimensione e la loro distribuzione nel disco. Inoltre, la teoria di lancio magneto-centrifugo del getto, che prevede un trasferimento efficiente del momento angolare, può essere confermata solo dalla determinazione della configurazione magnetica nel sistema.

L'aumento della sensibilità nella polarimetria millimetrica con ALMA ha aperto una nuova finestra su entrambi questi argomenti. L'intensità dell'emissione polarizzata, la frazione di polarizzazione e l'angolo di polarizzazione (cioè l'orientazione del piano di oscillazione dell'onda luminosa) possono essere determinati in ogni pixel delle immagini dai parametri di Stokes I, U, Q, V della radiazione rilevata. Queste quantità sono convenzionalmente rappresentate con scale di colore e "vettori di polarizzazione" sovrapposti alle mappe. I vettori di polarizzazione possono in linea di principio fornire l'orientamento delle linee del campo magnetico, poiché i grani di polvere non sferici tendono ad allineare i loro assi più corti parallelamente alla direzione del campo magnetico, e produrre quindi radiazione con angolo di polarizzazione perpendicolare al campo. Ad esempio, per un campo prevalentemente toroidale nel disco, i vettori di polarizzazione sa-

sub-structures like rings, gaps and spirals, which may be related to the aggregation mechanisms of dust grains. In addition, ALMA observations have finally confirmed that the beautiful jets of material perpendicular to the disk rotate around their axis, which means that in principle the outflows can carry away the excess angular momentum from the star/disk system, thus regulating its evolution. There are still many unknowns in this field, however. Dust aggregation models, for example, require as input the fractional population of grains of different sizes and their distribution in the disk. On the other hand, the theory of magneto-centrifugal jet launch, which predicts an efficient angular momentum transfer between the disk and the jet, can only be confirmed by the determination of the magnetic configuration in the system.

The increase in sensitivity in mm-wave polarimetry with ALMA has opened new opportunities for investigating both these topics. The intensity of the polarized emission, the polarization fraction and the polarization angle (i.e. the orientation of the plane of the light wave) can be found in each pixel of images from the Stokes parameters I, U, Q, V of the detected wave. These quantities are conventionally shown with the help of color scales and superimposed "polarization vectors" on maps. Polarization vectors can in principle provide the orientation of magnetic field lines, as non-spherical dust grains tend to align with their short axes along the the direction of the magnetic field, thus producing radiation with polarization angle perpendicular to the field ("grain alignment"). For example, for a predominantly toroidal field in the disk, the polarization vectors would be directed radially away from the star. Polarization, however, can also arise from the self-scattering of the thermal emission of dust grains. In this

rebbero diretti radialmente dalla stella. La polarizzazione, tuttavia, può anche derivare dal *self-scattering* (autodiffusione) dell'emissione termica dei grani di polvere. In questo caso i modelli mostrano che la polarizzazione è massima per uno *scattering* ad angolo retto rispetto alla direzione della radiazione incidente sul grano (vedi Fig.1, riquadro a sinistra). Le simulazioni mostrano che data la distribuzione della polvere e la sua temperatura nel disco, il *self-scattering* produce profili di polarizzazione dipendenti dall'orientazione del disco: in particolare, se il disco è inclinato rispetto alla linea di vista, i vettori di polarizzazione risultano essere paralleli all'asse minore apparente del disco. Un terzo effetto che produce un'emissione polarizzata è l'allineamento di grani non sferici con un campo di radiazione anisotropo. Per un disco illuminato centralmente dalla stella, la polarizzazione lineare presenterebbe per questo meccanismo un profilo circolare centrato sulla sorgente.

In questo quadro, un team di astronomi guidati dall'autrice di questo articolo, che include anche ricercatori dell'INAF-Osservatorio Astrofisico di Arcetri, ha avviato un progetto per investigare le proprietà di polarizzazione dei dischi protoplanetari con getti bipolari associati, in sistemi per i quali erano note le proprietà di rotazione sia del disco che dei getti (Bacciotti et al. 2018). Un primo obiettivo era la determinazione della configurazione magnetica di queste sorgenti, per convalidare i modelli di lancio dei jet. Un secondo obiettivo era lo studio delle proprietà della polvere in questi dischi parzialmente evoluti. Sono state osservate con ALMA le stelle di pre-sequenza principale DG Tau e CW Tau, nella regione di formazione stellare del Toro (a distanza di ~140 pc). Sono stati analizzati i dati

case, the models show that maximum polarization is at right angles with respect to the direction of the incident radiation on the grain (see Fig. 1, left panel), while simulations show that given the distribution and temperature of the dust in the disk, self-scattering produces very specific patterns with respect to disk orientation. In particular, if the disk is inclined with respect to the line of sight, the polarization vectors turn out to be parallel to the apparent minor axis of the disk. A third effect producing polarized emission is the alignment of non-spherical grains with an anisotropic radiation field. For a centrally illuminated disk, the linear polarization would present for this mechanism a circular pattern centered on the source.

In this framework, a team of astronomers led by the author and including other researchers at the INAF-Arcetri Astrophysical Observatory started a project to map the polarization properties of protoplanetary disks with associated jets, in systems for which the rotation properties of both the disk and the jets were known (Bacciotti et al. 2018). A first aim was the determination of the magnetic configuration for these targets, in order to test the jet launch models. A second aim was the investigation of the dust properties in these partially evolved disks. Using ALMA, we observed the pre-main-sequence stars DG Tau and CW Tau in the Taurus star formation region (distance of ~140 pc). We analyzed ALMA Band 7 (centered at 870 μm) polarimetric data at 0."2 resolution, corresponding to a linear scale of about 30 au on the targets. The observed polarization (Fig. 1 central and right panels) does not correspond to an ordered magnetic structure. Rather, the alignment of the polarization vectors with the minor axis of the disks shows that self-scattering of dust thermal emission is the dominant polarization mecha-

polarimetrici nella banda 7 di ALMA (centrata a $870 \mu\text{m}$) con una risoluzione di $0.''2$, corrispondente a circa 30 au sulle sorgenti. La polarizzazione osservata (Fig. 1, pannelli centrale e destro), non è correlata ad una struttura magnetica ordinata. Invece, l'allineamento dei vettori di polarizzazione con l'asse minore dei dischi mostra che il *self-scattering* dell'emissione termica della polvere è il meccanismo di polarizzazione dominante. Questo è un risultato comune per i dischi protoplanetari alla lunghezza d'onda esaminata. Per fortuna però, anche se in questo caso non si possono ricavare informazioni sul campo magnetico, i dati di polarizzazione si rivelano un potente strumento per la diagnostica delle proprietà e dell'evoluzione delle polveri.

Confrontando i dati di polarizzazione con i modelli di *self-scattering* (ad esempio Kataoka et al. 2017, Yang et al. 2017) si può arrivare ad una stima della dimensione massima dei grani di polvere. Questa risulta essere nell'intervallo $50\text{-}70 \mu\text{m}$ per DG Tau e $100\text{-}150 \mu\text{m}$ per CW Tau. Inoltre, l'asimmetria dell'intensità della luce polarizzata in DG Tau indica che questo disco ha un grande spessore e forma svasata. Al contrario, la mappa di CW Tau, che presenta un picco centrale nell'intensità della luce polarizzata, indica che qui i grani si sono depositati sul piano mediano del disco. Infine, nel disco di DG Tau (Fig. 1, centro), oltre $0.''3$ dalla sorgente, si vede una struttura ad anello, dove cambia l'orientazione della polarizzazione. Nessuna struttura nell'emissione totale della polvere si trova investigando alla stessa risoluzione spaziale, ma un recente studio ha rivelato la presenza di un anello nell'emissione della molecola di formaldeide (H_2CO) il cui bordo interno è coincidente con la variazione delle proprietà di polarizzazione

nism. This represents a common result for protoplanetary disks at the examined wavelength.

Fortunately, however, even if no information on the magnetic field can be derived in this case, polarization data prove to be a powerful tool for the diagnostics of the properties and evolution of dust. Comparing the polarization data with the self-scattering models (e.g. Kataoka et al. 2017, Yang et al. 2017), we can estimate the maximum grain size, which we find to be in the $50\text{-}70 \mu\text{m}$ range for DG Tau and $100\text{-}150 \mu\text{m}$ for CW Tau. Furthermore, the asymmetry of the polarized intensity in DG Tau shows that this disk is flared. By contrast, the centrally peaked polarized intensity map of CW Tau indicates that here the grains have settled onto the disk midplane. Finally, in the DG Tau disk (Fig.1, center), beyond $0.''3$ from the source, one finds a ring structure in the polarized emission where the orientation of the polarization pattern changes. No substructure in the total emission of the dust is found at the same spatial resolution, but a recent study has revealed the presence of a ring in the emission of formaldehyde (H_2CO) with the inner border coincident with the change in the polarization properties (Podio et al. 2020). This demonstrates that polarization maps can point to hidden structural peculiarities. In summary, our research confirms that polarimetry at high angular resolution proves to be a new powerful tool in studies of the evolution of protoplanetary disks.

Bibliography

Bacciotti, F., Girart, J. M., Padovani, M., et al. 2018, ApJL 865, L12

(Podio et al. 2020). Ciò dimostra che le mappe di polarizzazione possono indicare peculiarità strutturali nascoste. In sintesi, il nostro studio conferma che la polarimetria ad alta risoluzione angolare si sta rivelando come un nuovo potente strumento per gli studi sull'evoluzione dei dischi protoplanetari.

Bibliografia

- Bacciotti, F., Girart, J. M., Padovani, M., et al. 2018, ApJL 865, L12
 Kataoka, A., Tsukagoshi, T., Pohl, A., et al., 2017, ApJL 844, L5
 Podio, L., Garufi, A, Codella, C. et al. 2020, A&A 644, 119
 Yang, H., Li, Z.-Y., Looney, L. W., Girart, J. M., Stephens, I. W., 2017, M.N.R.A.S. 472, 373

Francesca Bacciotti. Astronoma all'Osservatorio Astrofisico di Arcetri, si occupa dei fenomeni di outflow in formazione stellare e di struttura dei dischi protoplanetari, lavorando con osservazioni ad alta risoluzione angolare e modelli magneto-idrodinamici.

Kataoka, A., Tsukagoshi, T., Pohl, A., et al., 2017, ApJL 844, L5
 Podio, L., Garufi, A, Codella, C. et al. 2020, A&A 644, 119
 Yang, H., Li, Z.-Y., Looney, L. W., Girart, J. M., Stephens, I. W., 2017, M.N.R.A.S. 472, 373

Francesca Bacciotti is an astronomer at the Arcetri Astrophysical Observatory. She investigates outflow phenomena and protoplanetary disks in star formation regions, with observations at high angular resolution and magneto-hydrodynamic models.

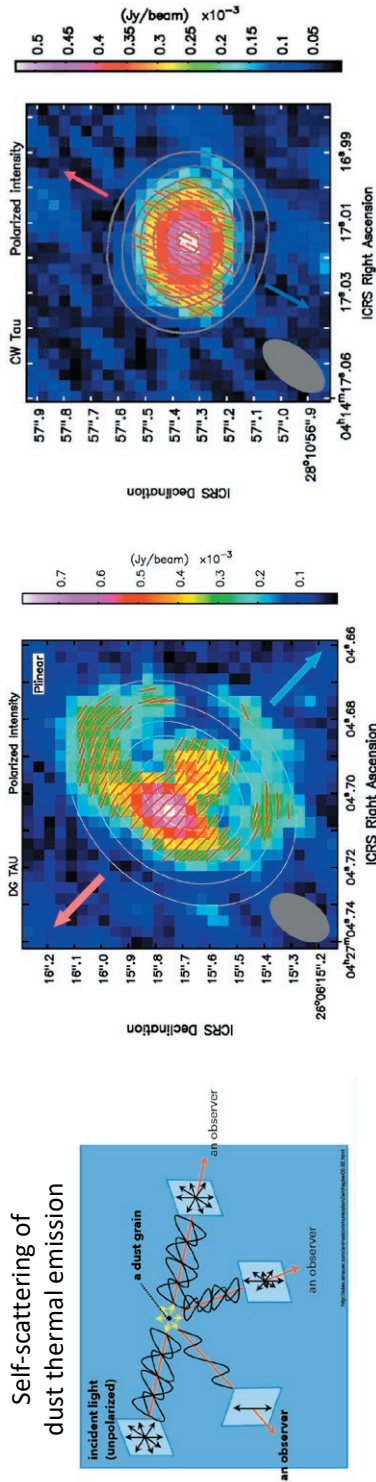


Figure 1. A sinistra: meccanismo di *self-scattering* della radiazione termica della polvere: la polarizzazione è massima per un angolo di *scattering* di 90°. Centro: intensità della radiazione polarizzata linearmente nel disco attorno a DG Tau (mappa di colori), con sovrapposti vettori di polarizzazione (segmenti di lunghezza fissa) e curve di livello dell'intensità totale. A destra: analogo al pannello centrale, per il disco attorno a CW Tau (Bacciotti et al. 2018). L'allineamento del pattern di polarizzazione lungo l'asse minore dei dischi indica che la polarizzazione si deve al *self-scattering* della polvere. In DG Tau, la maggiore intensità della luce polarizzata sul lato del disco vicino all'osservatore, indicato dal lobo in allontanamento del getto (freccia rossa), suggerisce una geometria del disco a forma svasata.

Figure 1. Left: Mechanism of dust self-scattering of thermal radiation: polarization is at a maximum for a scattering angle of 90°. Center: linearly polarized intensity in the DG Tau disk (color map), with superposed polarization vectors (fixed length segments) and contours of the total intensity. Right: Same as central panel for the CW Tau disk (Bacciotti et al. 2018). The alignment of the polarization pattern along the minor axis of the disks supports polarization from dust self-scattering. In DG Tau, the higher polarized intensity measured toward the disk near-side, indicated by the receding jet lobe (red arrow), suggests a flared disk geometry.

Laura Magrini¹, Giada Casali²

L'età di una stella rivelata dalla sua composizione chimica

Stellar age revealed by chemical composition

¹ INAF-Osservatorio Astrofisico di Arcetri

² Dipartimento di Fisica e Astronomia, Università degli Studi di Firenze

Riassunto. Le grandi *surveys* spettroscopiche forniscono uno straordinario insieme di dati utile per svelare i meccanismi di formazione ed evoluzione della Via Lattea, in cui la determinazione dell'età delle stelle gioca un ruolo fondamentale. In questo articolo presentiamo un metodo innovativo per ricavare le età stellari dalla misura del rapporto Carbonio/Azoto nelle atmosfere stellari. I risultati di questo studio, applicato al disco della Via Lattea, hanno messo in evidenza la differenza di età tra il disco sottile e il disco spesso della nostra Galassia.

Parole chiave. Età stellari, abbondanze chimiche, Via Lattea, ammassi di stelle.

Un importante passo avanti per studiare come la nostra Galassia, la Via Lattea, si è formata e si è evoluta fino alla sua struttura attuale è la determinazione delle età delle singole stelle che la compongono. La misura delle età stellari è, tuttavia, uno dei problemi più difficili dell'astrofisica. Le tecniche più comunemente utilizzate si basano sul confronto tra varie quantità osservabili e i risultati dei modelli di evoluzione stellare, sia utilizzando quantità osservabili direttamente, come magnitudini e colori, sia quantità derivate, come gravità superficiali e temperature efficaci. Questi metodi forniscono risultati migliori nelle regioni in cui

Abstract: High-resolution spectroscopic surveys provide an extraordinary dataset on the processes of the formation and evolution of our galaxy, in which the determination of the ages of individual stars plays a major role. We present here a method for measuring stellar ages based on the carbon/nitrogen abundance ratio in stellar atmospheres. We apply this relationship to the disc of the Milky Way, finding a clear age difference between the thin and thick discs of our galaxy.

Keywords. Stellar ages, chemical abundances, galaxy, star clusters.

An important step forward to study how our galaxy formed and evolved to its present-day structure is the determination of the ages of individual stars. Indeed, measuring stellar ages is one of the most difficult tasks of astrophysics. The most commonly used techniques are based on the comparison of observable quantities with the results of stellar evolution models, using



le isocrone (luoghi di uguale età stellare nel diagramma evolutivo) hanno una buona separazione, principalmente vicino al *turn-off* della sequenza principale. Purtroppo le isocrone si sovrappongono in corrispondenza del ramo delle giganti rosse, e quindi si hanno grandi incertezze sulle età derivate per queste stelle.

Fortunatamente, oltre alla procedura classica sopra descritta, esistono diversi metodi alternativi basati sulla relazione tra velocità di rotazione, attività, periodo di pulsazione, ecc. con l'età della stella. Negli ultimi anni, anche le proprietà chimiche sono state utilizzate per determinare le età stellari, tra cui i rapporti di abbondanze dipendenti dall'evoluzione chimica galattica, ad esempio i rapporti tra gli elementi Y, Mg, Al, Ba e Fe, e quelli relativi all'evoluzione stellare, come C e N (per brevità [C/N]).

Il valore di [C/N] nelle fotosfere delle stelle evolute è correlato alla loro massa iniziale. Entrambi gli elementi vengono processati attraverso il ciclo CNO nelle fasi evolutive precedenti e portati in superficie dalla penetrazione dell'inviluppo convettivo verso l'interno. Come conseguenza di tale mescolamento, l'atmosfera mostra una variazione nella composizione chimica, cambiando in particolare il rapporto [C/N]. Poiché la penetrazione della convezione nelle regioni interne, e quindi la quantità di C e N portata verso la fotosfera stellare, dipendono dalla massa stellare, il rapporto [C/N] può essere usato per stimare l'età stellare, in quanto età e massa sono direttamente correlate per stelle nella stessa fase evolutiva.

Nel nostro lavoro abbiamo ottenuto una relazione empirica tra il rapporto [C/N] e l'età stellare utilizzando gli ammassi aperti come calibratori. L'età degli ammassi aperti, gruppi chimicamente omogenei di stelle coeve, può essere mi-

quantities that are both directly observable, such as stellar magnitudes and colors, and derived, such as surface gravities and effective temperatures. These methods provide better results in regions where isochrones (loci of equal stellar age in the evolutionary diagram) have good separation, usually close to the main sequence turn-off. Unfortunately, isochrones of different ages almost overlap on the red giant branch, resulting in large uncertainties in age determination.

In addition to the classical procedure described above, there are several alternative methods based on the relationship of stellar properties – such as rotational velocity, activity, and pulsation period – to stellar age. Over the last few years, chemical properties have also been used to infer stellar ages, among them ratios of elements dependent on galactic chemical evolution, such as Y, Mg, Al, Ba and Fe, and those related to stellar evolution, such as the C/N ratio ([C/N]).

The value of [C/N] in the photospheres of evolved stars is related to their initial mass. Carbon and nitrogen are processed through the CNO-cycle in previous evolutionary phases and carried towards the surface by the penetration of the convective stellar interior. As a result of this convective mixing, the stellar atmosphere shows variation in its chemical composition, changing in particular the abundance ratio [C/N]. Since the penetration of the convection in the inner regions, and therefore the abundances of C and N brought up to the stellar surface, depends on stellar mass, the [C/N] ratio can be used to estimate stellar ages.

In the present work, we calibrated an empirical relation between the [C/N] ratio and stellar age using open stellar clusters, a group of coeval and chemical homogeneous stars. In fact,

surata con una precisione molto più elevata di quella delle stelle di campo. Infatti le osservazioni di molte stelle appartenenti allo stesso ammasso ci permettono di campionare la sua sequenza in un diagramma evolutivo e quindi di determinarne, confrontando con modelli teorici, l'età. Pertanto, possono essere utilizzati come calibratori per identificare le relazioni tra età ed altre proprietà stellari.

In particolare abbiamo misurato l'abbondanza media di $[C/N]$ nelle stelle evolute in ammassi aperti sia nella *survey* Gaia-ESO che in APOGEE. Usando l'età degli ammassi determinate dal confronto con le isocrone, abbiamo quindi definito una relazione tra le età e $[C/N]$ (Fig. 1). Abbiamo poi applicato tale relazione ad un campione di circa 67.000 giganti di campo osservate in Gaia-ESO e APOGEE. Con la nostra relazione, possiamo studiare statisticamente le differenze di età per le popolazioni del disco sottile e del disco spesso, le due componenti stellari del disco della nostra Galassia.

In Fig. 2 mostriamo il rapporto tra i cosiddetti elementi alfa (O, Mg, Si, S, Ca e Ti) rispetto al Fe (per brevità $[\alpha/Fe]$) in funzione della metallicità (indicata con $[Fe/H]$) per stelle di cui possiamo stimare l'età (mostrata come scala di colore). Questo diagramma è utile per separare le due componenti del disco stellare Galattico: il disco sottile - caratterizzato da $[\alpha/Fe]$ inferiore e metallicità $-0.8 < [Fe/H] < +0.4$, e il disco spesso, con valori più alti di $[\alpha/Fe]$ e in genere metallicità inferiore. Con la nostra determinazione di età, possiamo notare che le due componenti sono ben separate anche in età: il disco sottile contiene stelle con età da 0 a circa 8 Gyr, mentre il disco spesso è formato solo da stelle vecchie. Questo risultato fornisce supporto all'ipotesi che il disco spesso si sia formato circa

the ages of open clusters can be measured with much higher accuracy than those of field stars, since in each cluster we can observe many member stars with different masses and which thus cover the whole cluster sequence in an evolutionary diagram. As a result, open clusters can be used as calibrators to identify the relationship between age and other stellar properties.

In particular, we measured the average $[C/N]$ in evolved stars in open clusters in both Gaia-ESO and APOGEE surveys. Using the ages of clusters which were determined by comparison with the isochrones, we defined the relationship between cluster ages and their $[C/N]$ (Fig. 1). We then applied this relationship to a sample of about 67,000 giants observed in the Gaia-ESO and APOGEE surveys. With our determination of stellar ages, we can investigate the age trends in the thin- and thick-disc stellar populations.

In Fig. 2 we show the ratio of the so-called alpha-elements (O, Mg, Si, S, Ca and Ti) vs. Fe (or $[\alpha/Fe]$) as a function of the stellar metallicity (indicated by $[Fe/H]$) of stars whose age we can estimate (shown by the color-scale). This diagram is useful for separating the two components of the stellar disc of the Milky Way: the thin disc, characterized by a lower $[\alpha/Fe]$ and by metallicities ranging from $-0.8 < [Fe/H] < +0.4$, and the thick disc, with higher $[\alpha/Fe]$ values. With our age determination, the two components are also well separated in age: the thin disc contains stars with ages from 0 to about 8 Gyr, while the thick disc is formed only by old stars. This result provides support for the hypothesis that the thick disc was created about 10 billion years ago by the merger of a galaxy called Gaia-Encelado with our galaxy.

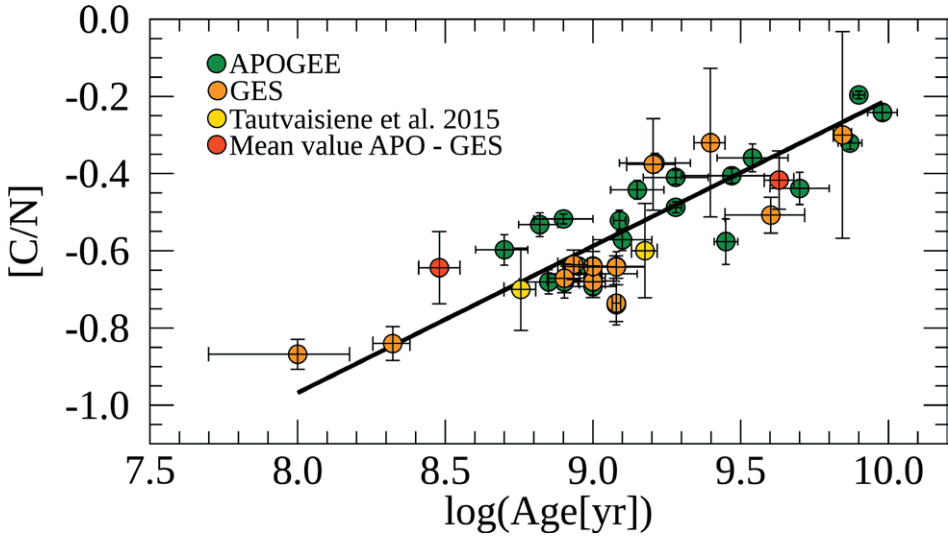


Figura 1. Rapporti medi di [C/N] negli ammassi stellari in funzione del logaritmo dell'età in anni per Gaia-ESO (cerchietti arancioni) e APOGEE (cerchietti verdi). Il cerchietto rosso rappresenta il valore medio [C/N] per gli ammassi NGC 6705 e M67, osservati in entrambe le *surveys*. La retta è il *fit* lineare dei dati.

Figure 1. Average [C/N] ratios of cluster member stars as a function of log(Age[yr]) for the Gaia-ESO (orange circles) and the APOGEE (green circles) surveys. The red circle represents the mean [C/N] value for NGC 6705 and M67. The straight line is the linear weighted least-square fit of the data.

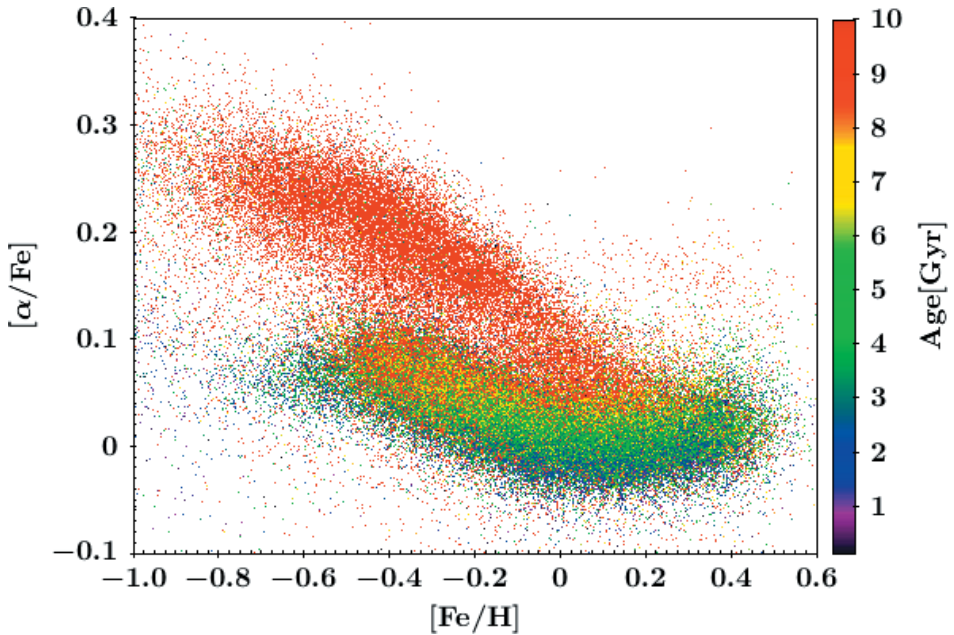


Figura 2. Rapporti di [alfa/Fe] in funzione di [Fe/H] per le stelle di campo nei campioni di Gaia-ESO e di APOGEE. Le età delle stelle sono identificate con la scala di colore.

Figure 2. [alpha/Fe] as a function of [Fe/H] for field stars in the APOGEE and Gaia-ESO samples. The stars are colored by age.

10 miliardi di anni fa da un *merger* tra una galassia denominata Gaia-Encelado e la nostra Galassia.

Laura Magrini è ricercatrice dal 2012 presso l'INAF-Osservatorio Astrofisico di Arcetri. È un'esperta di spettroscopia ad alta risoluzione (stellare e nebulare) nella Via Lattea e nelle galassie vicine e autrice di circa 130 articoli.

Giada Casali è dottoranda presso l'Università degli Studi di Firenze. Laureata in Fisica presso l'Università degli Studi di Pisa, si occupa attualmente di traccianti chimici delle età stellari.

Laura Magrini has been a staff researcher at the INAF-Osservatorio Astrofisico di Arcetri since 2012. She is an expert in high-resolution spectroscopy of resolved populations (stellar and nebular) in the Milky Way and beyond. She is author of about 130 refereed papers.

Giada Casali is a PhD student at the Università degli Studi di Firenze. Since taking her degree in Physics at the Università degli Studi di Pisa, she has been working on chemical clocks for stellar populations.

Enrico Pinna

L'ultima frontiera dell'ottica adattiva a stella guida naturale

The last frontier of natural guide star adaptive optics

INAF - Osservatorio Astrofisico di Arcetri

Riassunto. L'ottica adattiva sta trovando un'applicazione sempre più rilevante nell'astronomica ottica ed infrarossa da terra e sarà la tecnologia chiave per la prossima generazione di telescopi. Il gruppo tecnologico dell'INAF-Osservatorio Astrofisico di Arcetri ha recentemente installato uno strumento di frontiera presso il Large Binocular Telescope ottenendo i primi dati astrofisici che ne confermano le prestazioni innovative.

Parole chiave. Ottica adattiva, astronomia ad alta risoluzione spaziale, grandi telescopi da terra.

A partire dalla nascita del telescopio astronomico, la costante nei secoli è stata la corsa alla realizzazione di strumenti con aperture ottiche di dimensioni sempre maggiori. Dai pochi centimetri del cannocchiale galileiano, siamo arrivati oggi a telescopi ottico-infrarossi con diametri di 8-10 m. L'aumento di apertura consente di raccogliere una maggior quantità di radiazione, rivelando oggetti con magnitudine apparente sempre più debole. Tuttavia le aberrazioni ottiche introdotte dall'atmosfera limitano il potere di risoluzione spaziale, che rimane equivalente a quello di un'apertura di poche decine di centimetri anche per i telescopi più grandi ubicati nei migliori siti astronomici. Qualora, invece, si fosse in grado di ripristinare una qualità ottica sufficiente, la risoluzione spaziale sarebbe limitata

Abstract. Adaptive optics is finding increasingly relevant applications in ground-based optical and infrared astronomy and will be the key technique for the next generation of telescopes. The technology group at INAF-Osservatorio Astrofisico di Arcetri has recently installed a frontier instrument on the Large Binocular Telescope and has obtained the first astrophysical data confirming its innovative performance.

Keywords. Adaptive optics, astronomy at high spatial resolution, big ground based telescopes .

Since the emergence of the astronomical telescopes, there has been a constant race to build telescopes with increasingly large optical apertures. From the few centimeters of the Galilean telescope, we have come a long way to the current 8-10 m optical-infrared telescopes. Expanding the aperture helps in collecting larger amounts of light, revealing objects with increasingly weak apparent magnitude. However, the optical aberrations introduced by the atmosphere se-



solo dalla diffrazione, aumentando dunque linearmente col diametro della pupilla dello strumento. Per i telescopi dell'ultima generazione ciò significa un guadagno da 10 a 40 volte a seconda della lunghezza d'onda osservata. La correzione delle aberrazioni ottiche, concentrando la luce nel picco di diffrazione, va a beneficio anche della sensibilità a sorgenti irrisolte, che crescerebbe col quadrato del diametro dello strumento e non più linearmente.

L'ottica adattiva è la tecnica che ci permette di correggere in tempo reale le aberrazioni introdotte dalla turbolenza atmosferica, ripristinando il potenziale del telescopio sia in termini di risoluzione che di sensibilità. Il fattore limitante è la necessità di avere un riferimento per misurare le aberrazioni per poi essere in grado di correggerle con un elemento ottico deformabile. Questo riferimento è tipicamente una stella di guida che deve essere sufficientemente brillante da permettere la misura del fronte d'onda ad una cadenza superiore a quella dell'evoluzione temporale della turbolenza (tipicamente nell'ordine delle 1000 correzioni al secondo). Inoltre, la stella guida deve essere angolarmente prossima all'oggetto che si vuole osservare, di modo che l'aberrazione misurata sia rappresentativa di quella che degrada il campo scientifico. Questo significa che l'ottica adattiva a Stella Guida Naturale (SGN) si può utilizzare solamente in prossimità di stelle sufficientemente brillanti.

Per superare questo limite, negli anni '00, sono state impiegate stelle artificiali generate da fasci laser proiettati in atmosfera dal sito osservativo. Il fascio laser, per effetto Rayleigh o, nella maggior parte dei casi, per eccitazione del sodio atmosferico a 90 km, crea una sorgente luminosa (Stella Guida Laser - SGL) nella

verely limit the spatial resolution power of the telescope, which turns out to be the same as that of an aperture of just a few centimeters, even for the biggest telescopes situated in the best astronomical sites. On the other hand, if we succeed in recovering good optical quality, the only limitation in spatial resolution would be the diffraction of the telescope aperture. The resolving power would then improve linearly with the diameter of the pupil of the instrument. Thus, the current generation of telescopes would gain from 10 to 40 times in resolution, depending on the observed wavelength. Moreover, the correction of aberrations by collecting light in the diffraction peak improves sensitivity to unresolved objects as well. In the diffraction-limited regime, this sensitivity no longer grows linearly, but by the square of the instrument diameter.

The technique that allows for the correction of atmospheric turbulence is called adaptive optics (AO). During observation with large ground-based telescopes, AO is used to correct turbulence in real time, thereby restoring the telescope's potential in terms of both resolution and sensitivity. This technique needs an optical reference in order to measure optical aberrations and correct them with a deformable optical element. This reference is usually a "guide star". This requirement constitutes the main limitation of the adaptive optics system, for two reasons. Firstly, the guide star must be bright enough to provide a sufficient photon flux so that the wavefront can be measured at a higher rate than the temporal evolution of the turbulence, which is of the order of 1000 corrections per second. Secondly, it should be angularly close to the observed object such that the measured aberration represents the one affecting the scientific field. Thus, AO with a natural guide star (NGS) can only be used in the vicinity of bright stars.

direzione del cielo prescelta. Questi dispositivi hanno permesso di aumentare in modo significativo la porzione di cielo osservabile con ottica adattiva, tuttavia la qualità della correzione ottenuta non è equivalente a quella che si ottiene utilizzando una SGN brillante. L'impiego della SGL introduce infatti limitazioni dovute alla relativa vicinanza di questa sorgente (90 km) al telescopio e al fatto di essere una sorgente spazialmente risolta dal telescopio. Inoltre, la propagazione di un laser ad alta potenza (10-20 W) in atmosfera è soggetto a restrizioni d'uso da parte delle autorità competenti al controllo aerospaziale, il che ne rende l'uso meno efficiente.

Dunque, quando l'ottica adattiva è chiamata a fornire prestazioni di correzione estrema, come nel caso della caccia alle immagini dirette di pianeti extrasolari, o comunque nei casi in cui ci siano le condizioni per utilizzarla, è ancora la SGN ad essere chiamata in causa. A dimostrazione di questo, tutti i telescopi ottico-infrarossi di prossima generazione (Extremely Large Telescope, Giant Magellan Telescope e Thirty Meter Telescope) saranno dotati di ottica adattiva sia a SGL che SGN e, per tutti questi strumenti, sarà proprio quest'ultima a vedere la luce per prima.

Nel panorama internazionale dell'ottica adattiva, l'Italia ha avuto un ruolo da protagonista introducendo due tecnologie che oggi si sono ormai affermate come di assoluta eccellenza in questo campo. Ci riferiamo al sensore a piramide (per SGN) e il telescopio adattivo, introdotti rispettivamente da Roberto Ragazzoni e Piero Salinari negli anni '90. Il primo offre una maggiore sensibilità rispetto al sensore di Shack-Hartmann, impiegato nella maggior parte dei sistemi anteceden-

In the 2000's, to overcome this limitation, artificial stars were introduced in AO. These artificial references are generated by projecting laser beams into the atmosphere from the observation site. Through Rayleigh scattering, or, more often, by exciting the atmospheric sodium layer at 90 km, the laser creates a light source in the desired direction in the sky – a laser guide star (LGS). Although these devices significantly increase the fraction of observable sky with AO, the quality of the correction is not equivalent to that which can be achieved with a bright NGS. In fact, the LGS has its own limitations, for various reasons. Not only is it a source relatively close to the telescope (90 km), it is also spatially resolved by the telescope. In addition, prior permission is required by aerospace control authorities for the propagation of a high-powered laser (10-20 W) into the atmosphere, which makes observations less efficient.

Therefore, when we look to extreme correction performance – for example, when hunting for direct images of exoplanets – or whenever a bright NGS is available, this is the first choice. This is the very reason why next-generation optical-infrared telescopes (the Extremely Large Telescope, the Giant Magellan Telescope and the Thirty Meter Telescope) will all be equipped with both LGS and NGS AO systems. For each of these instruments, however, the latter will be the one used for the first light.

In the international framework of AO, Italy has played a leading role by introducing two revolutionary technologies in this field, the pyramid sensor (for NGS) and the adaptive telescope. These technologies were introduced in the 1990's by Roberto Ragazzoni and Piero Salinari, respectively. The pyramid sensor offers greater sensitivity compared to the Shack-

ti, e tale guadagno di sensibilità scala con il diametro del telescopio, rendendolo sempre più conveniente con il crescere dell'apertura. Il secondo pone l'elemento di correzione all'interno del treno ottico del telescopio, consentendo di ridurre in modo drastico il numero di ottiche del sistema adattivo e offrendo nel contempo la sua correzione a tutte le stazioni focali a valle di questo elemento. Il successo della combinazione di queste due tecnologie si è affermato al Large Binocular Telescope, il primo telescopio adattivo della classe 8-10 m ideato da Piero Salinari, Franco Pacini e Roger Angel, quando nel 2010 il gruppo di ottiche adattive di Arcetri, guidato da Simone Esposito, ha realizzato le prime correzioni ad altissimo contrasto nella banda del vicino infrarosso. Il successo planetario di questo risultato è testimoniato dall'adozione di queste tecnologie in diversi osservatori attuali (Very Large Telescope, Keck, Subaru, Magellan) e dal fatto che due su tre dei telescopi di prossima generazione saranno telescopi adattivi, mentre tutti e tre impiegheranno un sensore a piramide per il sistema di prima luce a SGN.

Sempre negli anni '10, lo sviluppo nel campo delle camere CCD ha introdotto commercialmente i chip a moltiplicazione elettronica, i quali consentono di avere dispositivi a bassissimo rumore ($\sim 0.3 e^-$) ed alta frequenza di lettura (2000 fotogrammi/s). Queste caratteristiche li rendono ideali per i sensori di ottica adattiva, permettendo di minimizzare il rumore di misura. Questo dispositivo, impiegato nel sensore a piramide insieme al telescopio adattivo, compone un sistema ottimale capace di ottenere informazione da ogni singolo fotone proveniente dalla SGN per la correzione del fronte d'onda. Il progetto SOUL ha realizzato questo sistema aggiornando il sistema SGN di LBT con i nuovi CCD a moltiplicazione elettronica,

Hartmann sensor used in previous systems. The gain in sensitivity scales with the diameter of the telescope, making it more and more convenient as the aperture size increases. The adaptive telescope uses one of the elements of the telescope optical train as corrector, causing a drastic reduction in the number of optics of the adaptive system. Apart from this, it also passes its correction on to all focal stations downstream of this element. The combination of both these technologies was successfully established at the Large Binocular Telescope (LBT) – the first adaptive telescope of the 8-10 m class designed by Piero Salinari, Franco Pacini and Roger Angel – when the Arcetri AO group, led by Simone Esposito, made the very first high-contrast corrections in the near-infrared band in 2010. This success was reflected when several current observatories (the Very Large Telescope, Keck, Subaru and Magellan) adopted these technologies; indeed two of three next-generation telescopes will be adaptive, while all will employ a pyramid sensor for the NGS.

In the 2010's, a breakthrough development occurred in the field of CCD cameras when electron multiplication chips became available on the market: these are devices with very low noise ($\sim 0.3 e^-$) and a high reading rate (2000 frames/s). These features make them ideal for AO sensors, as they can minimize measured noise. Together with the pyramid sensor and the adaptive telescope, they make for an optimal system, one that is capable of obtaining information from every single photon coming from the NGS for wavefront correction. The SOUL (single conjugate adaptive optics upgrade for LBT) has adopted this system by updating the LBT's NGS system with new electron multiplication CCDs, thus creating the only system in the world that

creando così l'unico sistema al mondo che unisca queste tre tecnologie. L'aggiornamento dell'*hardware*, insieme alla riottimizzazione di tutto il sistema, consente di avere migliori prestazioni in termini di correzione, spostando il precedente limite di luminosità della SGN di circa 2 magnitudini. Questo offre all'astrofisica nuove finestre osservative come l'osservazione ad alto contrasto di stelle più deboli di 2 magnitudini, aumentandone drasticamente il numero osservabile. Lo stesso vale nel campo degli oggetti extragalattici, tipicamente troppo deboli per osservati con sistemi a SGN. E' stato nuovamente il gruppo di ottiche adattive di Arcetri a proporre e realizzare questo progetto che oggi è installato e funzionante all'LBT.

Durante la sua caratterizzazione in cielo, SOUL ha confermato le prestazioni attese e i primi tests su oggetti di interesse scientifico, come protostelle, esopianeti e ammassi globulari, comprovandone il potenziale scientifico. In Figura 1 riportiamo l'esempio dei getti generati dalla formazione di una protostella, osservati nel vicino infrarosso da Fabrizio Massi (INAF-Osservatorio Astrofisico di Arcetri) durante i test di SOUL a Novembre 2020. In questo caso la correzione ha raggiunto il limite di diffrazione dell'apertura di 8 m fornendo una risoluzione spaziale doppia rispetto alle precedenti osservazioni con ottica adattiva. Questo è ottenuto proprio grazie alla capacità di SOUL di sfruttare al meglio il flusso luminoso proveniente dalla SGN di magnitudine $R \sim 14$ (al centro del bordo destro in Fig. 1). SOUL sarà ora offerto alla comunità astrofisica e impiegato per osservazioni di routine al telescopio LBT. Il suo corredo di strumenti verrà presto completato con dispositivi di seconda generazione per poterne sfruttare al pieno il potenziale ad ampio spettro: nel visibile (SHARK-VIS), nel vicino infra-

combines and uses these three technologies. Moreover, the hardware update, together with re-optimization of the whole system, allows for better correction, moving the previous brightness limit of the NGS by about 2 magnitudes. This offers astronomers new observational windows, such as high-contrast observation of faint stars, significantly increasing their observable number. The same is true for the field of extragalactic objects, which are typically too faint to be observed with NGS systems. It was once again the effort of the Arcetri AO group that led to the conception and implementation of this project at LBT, which is now ready to be offered to the astrophysics community.

During its characterization, SOUL delivered the expected performance in the first tests of objects of scientific interest, such as protostars, exoplanets and globular clusters, thereby confirming its scientific potential. Figure 1 shows the example of the jet system generated by the formation of a protostar, which was observed in the near infrared by Fabrizio Massi (INAF-Osservatorio Astrofisico di Arcetri) during the SOUL tests in November 2020. In this case, SOUL obtained a spatial resolution limited only by the diffraction of the 8 m aperture, which turned out to be twice that of previous observations with NGS AO. This was possible precisely because of the system's ability to exploit the luminous flux coming from a NGS of magnitude $R \sim 14$, visible in the Figure 1 at the center right. SOUL will now be used routinely for observational purposes at the LBT. Its set of instruments will soon be upgraded with second-generation instrumentation to allow its potential in a wide range of the spectrum to be exploited: in the visible (SHARK-VIS), in the near infrared (SHARK-NIR and LUCI) and also in thermal infrared

rosso (SHARK-NIR e LUCI) e anche nell'infrarosso termico (LMIRCam). Infine SOUL rappresenta oggi un vero e proprio avamposto tecnologico per i sistemi a SGN dei telescopi di prossima generazione.

Enrico Pinna è tecnologo dell'INAF-Osservatorio Astrofisico di Arcetri dal 2009. Si occupa di sistemi di ottica adattiva per grandi telescopi da terra. È responsabile del progetto SOUL al Large Binocular Telescope e collabora in altri progetti internazionali per telescopi ottico-infrarossi della attuale e futura generazione.



Figura 1. Osservazione della sorgente IRAS20126+4104 compiuta con la camera LUCI e il sistema di ottica adattiva SOUL al Large Binocular Telescope nel Novembre 2020. Si tratta di una protostella di alta massa della quale si osservano i due getti di gas espulsi nel processo di accrescimento. La stella in formazione non è visibile, ma i due getti si estendono su tutta la diagonale dell'immagine, coprendo distanze dalla stella da alcune centinaia di unità astronomiche fino a 0.5 parsec. La componente rossa dell'immagine corrisponde all'emissione dell'idrogeno molecolare (2.12 μm) che ne evidenzia gli archi di shock in entrambi i getti. La componente bianca visualizza invece la radiazione termica a 2.2 μm delle stelle di campo e quella della protostella diffusa dalle polveri.

Figure 1. Observation of IRAS20126 + 4104 carried out with the LUCI camera and the SOUL adaptive optics system at the Large Binocular Telescope in November 2020. The source is a high-mass protostar in which the ejection of two gas jets in the accretion process is observed. Although the forming protostar is not visible, the two jets extend over the entire diagonal of the image, covering distances from the star from a few hundred astronomical units up to 0.5 parsec. The red component of the image corresponds to the emission of molecular hydrogen (2.12 μm), which highlights the shock arcs in both jets, whereas the white component displays the 2.2 μm thermal radiation of field stars and that emitted by the protostar and diffused by the dust.

(LMIRCam). Finally, SOUL today represents a real technological outpost for NGS systems of next-generation telescopes.

Enrico Pinna has been a researcher at the INAF-Osservatorio Astrofisico di Arcetri since 2009. His research activity focuses on adaptive optics systems. He is the leader of the SOUL project for the Large Binocular Telescope and collaborates on other international projects for the current and next generation of optical-infrared telescopes.

Pietro Malara

Il microspettrometro in una goccia

A Fourier transform microspectrometer in a droplet

CNR - UNO

Il Colle di
Galileo

Sommario. Un esperimento svolto presso la sezione di Napoli dell'Istituto Nazionale di Ottica (INO) del CNR ha mostrato la possibilità di effettuare l'analisi spettrochimica di un materiale semplicemente sfruttando l'evaporazione di una goccia di liquido sulla punta di una fibra ottica. Corredato da una speciale procedura di analisi, questo semplice sistema optofluidico equivale ad uno spettrometro a trasformata di Fourier miniaturizzato, dal costo estremamente contenuto e capace di operare automaticamente in assenza di sorgenti di energia.

Parole chiave. Spettroscopia, spettrometro a trasformata di Fourier, optofluidica, fibra ottica.

La capacità di analizzare la distribuzione spettrale di una radiazione elettromagnetica e di rivelarne le modifiche causate dalla sua interazione con la materia è essenziale in tutte le discipline scientifiche. Attraverso lo spettro della radiazione trasmessa, riflessa o emessa da un campione è possibile infatti identificarne la natura o quantificare la presenza di specifiche specie chimiche. Negli ultimi anni, i progressi delle tecnologie di nanofabbricazione e dell'optoelettronica integrata hanno permesso di miniaturizzare i dispositivi per l'analisi spettrale fino alle dimensioni di un chip [1-3], permettendo all'analisi spettrochimica di uscire dai laboratori ed aprirsi al vastissimo campo delle applicazioni in situ.

Come per la loro controparte macroscopica, esistono due principali tecniche alla base dei microspettrometri: la prima consiste nell'utilizzare uno o più elementi dispersivi per dividere la radiazione in diversi canali spettrali e acquisire,

Abstract. An experiment at the National Institute of Optics (INO) of the CNR has shown the possibility of carrying out spectrochemical analysis of a material simply by exploiting the evaporation of a liquid drop on the tip of an optical fiber. Endowed with a proper data analysis procedure, this simple optofluidic system is equivalent to a miniaturized Fourier transform spectrometer, capable of operating automatically and at an extremely low production cost.

Keywords. Spectroscopy, spectrometer, optofluidics, optical fiber sensors.

The ability to analyze the spectral distribution of electromagnetic radiation and to measure its changes upon interaction with matter is essential in all scientific disciplines. Through the spectrum of radiation transmitted, reflected or emitted by a material sample, it is possible to identify its nature or to quantify the presence of specific chemical species. In recent years, advances in nanofabrication technologies and integrated optoelectronics have made it pos-

parallelamente o in successione, l'intensità di ogni canale. L'alternativa è rappresentata dagli spettrometri in trasformata di Fourier (FT). In questi ultimi, la radiazione da analizzare viene inviata ad un interferometro a bracci mobili, la cui scansione genera un segnale oscillante nel tempo (interferogramma). A differenza degli spettrometri dispersivi, nella tecnica FT non esiste una diretta corrispondenza tra segnale acquisito e spettro: ogni elemento dell'interferogramma contiene infatti una parziale informazione su tutta la distribuzione di lunghezze d'onda della radiazione incidente. Lo spettro completo della radiazione in esame può essere estratto solo dopo una scansione completa dell'interferometro, tramite un algoritmo di trasformata di Fourier [4].

È stato dimostrato che proprio questa "delocalizzazione" dell'informazione spettrale negli analizzatori FT genera un grosso vantaggio in termini di risoluzione e rapporto segnale rumore (noto come Felgett advantage [5]). Tuttavia, il prezzo da pagare per tale vantaggio è la necessità di parti meccaniche in movimento, che è al contempo uno dei principali limiti per la robustezza degli spettrometri FT ed un ostacolo non indifferente alla loro miniaturizzazione.

L'esperimento condotto al Cnr-Ino [6] dimostra che l'analisi spettrale con la tecnica FT può essere realizzata dal più semplice dei sistemi microoptofluidici: una goccia poggiata all'estremità di una fibra ottica. La radiazione da investigare, inviata attraverso la fibra ottica, viene parzialmente riflessa prima dall'estremità della fibra e poi dalla superficie della goccia. La sovrapposizione dei due campi retroriflessi all'interno della fibra genera così un segnale di interferenza. Poiché la superficie della goccia recede durante l'evaporazione del

sible to miniaturize the traditionally bulky spectrometers down to the chip size [1-3], allowing spectrochemical analysis to exit laboratories and opening the way to their applications in field.

As with their macroscopic counterpart, there are two main techniques underlying microspectrometers: the first is to use one or more dispersive elements to divide the radiation into different spectral channels and acquire the intensity of each channel in parallel or sequentially. The alternative is represented by Fourier transform (FT) spectrometers. In the latter, the radiation to be analyzed is sent to an interferometer with movable arms, whose scan generates an oscillating signal over time (interferogram). Unlike with dispersive spectrometers, in the FT technique there is no direct correspondence between the acquired signal and the output spectrum: each element of the interferogram in fact contains partial information on the entire distribution of wavelengths of the incident radiation. The full spectrum of the radiation under examination can be extracted only after a complete scan of the interferometer, using a Fourier transform algorithm [4].

It has been shown that this "delocalization" of the spectral information in FT analyzers generates great advantages in terms of resolution and signal to noise ratio (known as the Felgett advantage [5]). However, the price to pay for this benefit is the need for mechanical moving parts, which limit the robustness of FT spectrometers and represent a significant obstacle to their miniaturization.

The experiment conducted at CNR-INO [6] shows that Fourier transform spectral analysis can be performed by the simplest microoptofluidic system, namely a droplet evaporating on the end facet of an optical fiber. The radiation to be investigated, sent through the optical fiber, is

liquido, la differenza di fase tra i campi interferenti varia nel tempo. L'intensità totale retroriflessa nella fibra genera quindi un segnale equivalente a quello di un interferometro in scansione.

Nell'interferogramma retroriflesso è dunque codificata un'informazione spettrale sulla radiazione iniettata nella fibra, estraibile matematicamente con una trasformata di Fourier. Tuttavia, poiché la forma di una goccia e la sua dinamica di evaporazione sono difficilmente controllabili o riproducibili, spettri acquisiti in istanti diversi utilizzando gocce diverse potrebbero non essere consistenti. Ciò renderebbe lo spettrometro inutilizzabile, poiché anche per una semplice misura di trasmissione di un campione materiale, è sempre necessario normalizzare lo spettro della radiazione trasmessa per lo spettro della radiazione incidente, precedentemente acquisito.

Nell'esperimento condotto all'Ino, il problema dell'irriproducibilità della dinamica evaporativa delle gocce è stato affrontato agendo sia sul piano sperimentale che su quello matematico. Un interferogramma "di riferimento" relativo ad una singola lunghezza d'onda, viene registrato in maniera sincrona all'interferogramma della radiazione da analizzare. Confrontando le informazioni contenute nei due interferogrammi è possibile normalizzare con ottima approssimazione tutti i parametri del segnale che dipendono dalla forma istantanea della goccia e dalla sua velocità di evaporazione.

Le caratteristiche degli spettri ottenuti tramite questa tecnica optofluidica dipendono in gran parte dal liquido utilizzato: la sua volatilità determina infatti il tempo di scansione dell'interferogramma, mentre tensione superficiale e adesio-

partially reflected first by the fiber end facet and then by the curved surface of the droplet. The superposition of these two retro-reflected fields inside the fiber generates an interference signal. Since the droplet surface recedes continuously during the evaporation process, the phase difference between the interfering fields varies over time. The total intensity back-reflected in the fiber therefore generates a signal equivalent to that of a scanning interferometer.

The spectral information on the radiation injected into the fiber is therefore encoded in the retroreflected interferogram, and can be extracted mathematically with a Fourier transform algorithm. However, since the droplet shape and its evaporation dynamics are difficult to control or reproduce, the spectra acquired at different times using different droplets may not be consistent. This would make the spectrometer unusable, since even for a simple transmission measurement of a material sample it is always necessary to normalize the spectrum of the transmitted radiation to the previously acquired spectrum of the incident radiation.

In the experiment conducted at INO, the problem of the non-reproducibility of the evaporative dynamics of the droplet was tackled by acting both on experimental and mathematical levels. A "reference" interferogram produced by a single wavelength was recorded synchronously to the main signal to be analyzed. By comparing the information contained in these two interferograms it was possible to normalize all the parameters that depend on the instantaneous droplet shape and its evaporation rate, with excellent approximation.

The characteristics of the spectra obtained by this optofluidic technique largely depend on the liquid used: its volatility determines the scanning time of the interferogram, while its

ne alla superficie della fibra determinano dimensione e forma della goccia, che sono collegati alla risoluzione spettrale.

Gli esperimenti condotti hanno per esempio dimostrato che con una sola goccia di alcool isopropilico è possibile analizzare lo spettro di qualunque radiazione con una risoluzione di 2.6 nm in meno di 100s. Utilizzando l'acqua invece, che grazie alla sua maggiore tensione superficiale forma gocce molto meno schiacciate sulla superficie della fibra, si raggiungono risoluzioni subnanometriche. Tuttavia, poiché una goccia di acqua evapora molto più lentamente, l'acquisizione dell'interferogramma richiede diversi minuti. La finestra spettrale di operatività dello spettrometro optofluidico invece è unicamente limitata dalla componentistica in fibra ottica e dai detector utilizzati. Nell'esperimento dimostrativo condotto all'INO è stata analizzata la trasmissione di dell'acetilene nel range 1400-1650 nm, ma in principio non esistono limitazioni alla finestra spettrale, che può essere estesa o traslata nel medio infrarosso utilizzando fibre ottiche e materiali opportunamente selezionati.

Il principio di rivelazione ottica dimostrato all'INO dimostra dunque la possibilità di realizzare una nuova classe di microanalizzatori di spettro in trasformata di Fourier, in cui l'evaporazione o le forze di capillarità che agiscono spontaneamente su un liquido sono il motore della scansione di un interferometro. La semplicità del meccanismo optofluidico rende tali dispositivi estremamente economici e, grazie all'assenza di parti meccaniche in movimento, capaci di operare automaticamente anche in assenza di sorgenti di energia.

surface tension and adhesion to the fiber surface determine the size of the droplet, which sets the spectral resolution. Experiments have in fact shown that with a single drop of isopropyl alcohol it is possible to analyze the spectrum of any radiation with a resolution of 2.6 nm in less than 100s. On the other hand, when water is used, which thanks to its higher surface tension forms larger drops on the fiber end facet, subnanometric resolutions are achieved. However, since a water droplet evaporates much more slowly, the scan takes several minutes. The operating spectral window of the optofluidic spectrometer is only limited by the optical fiber components and the detectors used. In the demonstration experiment conducted at INO, the transmission of acetylene in the range 1400-1650 nm was analyzed, but in principle there are no limitations to the spectrometer's bandwidth, which can be extended or translated into the mid-infrared using suitably selected materials.

The principle of optical detection demonstrated at INO therefore demonstrates the possibility of creating a new class of Fourier transform spectrum microanalyzers, where evaporation or capillary forces acting spontaneously on the liquid drive the interferometer scan. The simplicity of the optofluidic mechanism makes these devices extremely economical; thanks to the absence of moving mechanical parts, they are also robust and capable of operating automatically even in the absence of energy sources.

Bibliografia

1. Antila, J. et al. MEMS- and MOEMS-based near-infrared spectrometers. In *Encyclopedia of Analytical Chemistry* (ed. R.A. Meyers) (2014).
2. Zheng, S. N. et al. Microring resonator-assisted Fourier transform spectrometer with enhanced resolution and large bandwidth in single chip solution. *Nat. Commun.* **10**, 2349 (2019).
3. Le Coarer, E. et al. Wavelength-scale stationary-wave integrated Fourier transform spectrometry. *Nat. Photonics* **1**, 473–478 (2007).
4. Bell, R. *Introductory Fourier Transform Spectroscopy* (Elsevier, 2012).
5. Fellgett, P. B. On the ultimate sensitivity and practical performance of radiation detectors. *J. Opt. Soc. Am.* **39**, 970–976 (1949).
6. Malara, P., Giorgini, A., Avino, S. et al. A self-operating broadband spectrometer on a droplet. *Nat Commun* **11**, 2263 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41467-020-16206-8>

Pietro Malara si è laureato in Fisica all'Università "Federico II" di Napoli e ha conseguito il dottorato di ricerca in metodologie fisiche per l'Ecologia presso l'Università "Vanvitelli". Dal 2012 è ricercatore presso il CNR-Istituto Nazionale di Ottica (INO), sezione di Napoli. Le sue attività di ricerca riguardano principalmente la spettroscopia laser ad alta sensibilità, lo sviluppo di tecniche di interrogazione ad alte prestazioni di sensori in fibra ottica e lo studio delle proprietà e le applicazioni di risonatori ottici solidi e liquidi (pietro.malara@ino.cnr.it)

Bibliography

1. Antila, J. et al. MEMS- and MOEMS-based near-infrared spectrometers. In *Encyclopedia of Analytical Chemistry* (ed. R.A. Meyers) (2014).
2. Zheng, S. N. et al. Microring resonator-assisted Fourier transform spectrometer with enhanced resolution and large bandwidth in single chip solution. *Nat. Commun.* **10**, 2349 (2019).
3. Le Coarer, E. et al. Wavelength-scale stationary-wave integrated Fourier transform spectrometry. *Nat. Photonics* **1**, 473–478 (2007).
4. Bell, R. *Introductory Fourier Transform Spectroscopy* (Elsevier, 2012).
5. Fellgett, P. B. On the ultimate sensitivity and practical performance of radiation detectors. *J. Opt. Soc. Am.* **39**, 970–976 (1949).
6. Malara, P., Giorgini, A., Avino, S. et al. A self-operating broadband spectrometer on a droplet. *Nat Commun* **11**, 2263 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41467-020-16206-8>

Pietro Malara graduated in Physics from "Federico II" University of Naples (Italy) and obtained a PhD in physical methodologies for Ecology at "Vanvitelli" University (Caserta, Italy). After a 3-year post-doc focused on the design of quantum cascade lasers (Harvard University, MA) he got a research position at the CNR-National Institute of Optics (INO) in Italy. Since then, his research activities mainly concern high-sensitivity laser spectroscopy, optical sensors, and the study of the properties and applications of optical resonators (pietro.malara@ino.cnr.it)

Ilaria Vagniluca^{1,2}, Nicola Biagi², Davide Bacco³,
Alessandro Zavatta²

Un sistema di crittografia quantistica per cifrare la videochiamata del Premier a ESOF2020

*A quantum cryptography system used to encrypt the
Italian Prime Minister's videocall at ESOF2020*

¹Dipartimento di Fisica “Ettore Pancini” dell’ Università degli Studi di Napoli
“Federico II”, Via Cinthia 21, 80126 Napoli (Italia)

²Consiglio Nazionale delle Ricerche - Istituto Nazionale di Ottica (CNR-INO),
Largo E. Fermi 6, 50125 Firenze (Italia)

³CoE SPOC, DTU Fotonik, Technical University of Denmark, 2800 Kgs. Lyn-
gby (Denmark)

Riassunto. Durante la cerimonia di chiusura dell’EuroScience Open Forum (ESOF2020), svolta lo scorso 6 settembre a Trieste, il Presidente del Consiglio Giuseppe Conte ha preso parte a una dimostrazione pubblica di un protocollo di crittografia quantistica, realizzata dal gruppo di Comunicazioni Quantistiche dell’Istituto Nazionale di Ottica di Firenze. La dimostrazione ha sfruttato la trasmissione di stati quantistici attraverso la rete in fibra ottica LightNet.

Parole chiave. Crittografia quantistica, tecnologie quantistiche, EuroScience Open Forum, fibra ottica, Trieste.

Abstract. During the closing ceremony of the EuroScience Open Forum (ESOF2020), held on 6 September in Trieste, Prime Minister Giuseppe Conte took part in a public demonstration of a quantum cryptography protocol, carried out by the Quantum Communications group of the National Institute of Optics of Florence. The demonstration exploited the transmission of quantum states through the LightNet fiber optic network.

Keywords. Quantum cryptography, quantum technologies, EuroScience Open Forum, optical fibers, Trieste

With the digital revolution and the advent of the Internet, information security is a fundamental requirement for today’s society. This implies the ability to protect our communications from the multiple threats aimed at undermining the authenticity and integrity of information exchanged via the network. For this reason, it is necessary to safeguard sensitive data using



Con la rivoluzione digitale e l'avvento di Internet, un requisito fondamentale per la società odierna è quello della sicurezza informatica, ovvero la capacità di proteggersi dalle molteplici minacce volte a minare l'autenticità e l'integrità delle informazioni scambiate via rete. Per questo motivo, si rende necessario salvaguardare i dati sensibili mediante opportune chiavi di crittografia, capaci di garantire il riconoscimento degli utenti che hanno il permesso di accedere all'informazione protetta. Punto centrale degli attuali sistemi di sicurezza è la distribuzione di queste chiavi di autenticazione, che devono essere recapitate ai soli utenti autorizzati, con il costante rischio di essere intercettate e duplicate durante la loro trasmissione, finendo così nelle mani di utenti indesiderati. La distribuzione quantistica delle chiavi (QKD) propone una soluzione originale al problema della distribuzione delle chiavi di crittografia, con un approccio sostanzialmente diverso da quello correntemente diffuso negli attuali sistemi crittografici. Tale approccio consiste nel codificare ciascun bit della chiave nello stato quantistico di un singolo fotone (o qubit), che viene poi trasmesso all'utente destinatario attraverso un collegamento in fibra ottica standard. In questo modo, grazie alla non-ortogonalità degli stati quantistici e al principio di indeterminazione di Heisenberg, un qualunque tentativo non autorizzato di estrarre, o copiare, l'informazione trasportata dal fotone può essere scoperto dal destinatario, che diventa così in grado di valutare l'effettiva sicurezza della chiave appena ricevuta.

Un sistema di QKD è stato presentato pubblicamente durante la cerimonia di chiusura di ESOF2020 (EuroScience Open Forum), svoltasi a Trieste lo scorso 6 settembre 2020. La dimostrazione è stata condotta dal gruppo di Comunicazioni

appropriate encryption keys, capable of guaranteeing the recognition of users who have permission to access the protected information. The central point of the current security systems is the distribution of authentication keys that must be delivered to authorized users only, avoiding the risk of being intercepted and duplicated during transmission and thus preventing them from falling into the hands of unwanted users.

Quantum key distribution (QKD) proposes an original solution to the key distribution problem, with a substantially new approach that differs from the one used in current cryptographic systems. This approach consists in encoding each bit of the key in the quantum state of a single photon (or qubit), which is then transmitted to the recipient user through a standard optical fiber link. In this way, thanks to the non-orthogonality of quantum states and Heisenberg's uncertainty principle, any unauthorized attempt to extract or copy the information carried by the photon can be discovered by the recipient, who thus becomes able to evaluate the actual security of the received key.

A QKD system was presented in a public demonstration during the closing ceremony of ESOF2020 (EuroScience Open Forum), held in Trieste on 6 September 2020. The demonstration was conducted by the Quantum Communications group of the National Institute of Optics (INO-CNR) of Florence, which realized the two stations for transmitting and receiving the quantum states of light, in collaboration with the Technical University of Denmark (DTU). The appropriately prepared qubits were transmitted through an optical fiber connection of about 10 km, which is part of the network LightNet. The optical fiber used for the QKD protocol al-

Quantistiche dell'Istituto Nazionale di Ottica (INO-CNR) di Firenze, in collaborazione con l'Università Tecnica della Danimarca (DTU), che si sono occupati della realizzazione delle due stazioni di trasmissione e di ricezione degli stati quantistici della luce. I qubit, opportunamente codificati, sono stati così trasmessi attraverso un collegamento in fibra ottica di circa 10 km, facente parte della rete LightNet. La fibra ottica utilizzata per il protocollo QKD, ha permesso di distribuire una chiave sicura tra il Dipartimento dei Sistemi Informativi dell'Università di Trieste e la sede di ESOF2020, situata nel Porto Vecchio di Trieste. La chiave di crittografia è stata quindi adoperata per l'autenticazione sicura di una videochiamata via web, alla quale hanno preso parte il Rettore dell'Università di Trieste Roberto di Lenarda, situato nel Dipartimento dei Sistemi Informativi e il Presidente del Consiglio Giuseppe Conte, che ha partecipato alla cerimonia dal palco dell'Auditorium di ESOF2020 (vedi foto). La dimostrazione pubblica è stata introdotta da un intervento del Presidente del CNR, il Prof. Massimo Inguscio.

lowed a secure key to be sent between the Department of Information Systems of the University of Trieste and the ESOF2020 headquarters, located in the Old Port of Trieste. The quantum encryption key was then used for the secure authentication of a web videocall between the Rector of the University of Trieste Roberto di Lenarda, who spoke from the Department of Information Systems, and the Italian Prime Minister Giuseppe Conte, who was attending the ceremony from the stage of the ESOF2020 Auditorium (see photo). The public demonstration was introduced by a speech given by the President of CNR, Prof. Massimo Inguscio.





A quantum cryptography system used to encrypt the Italian Prime Minister's videocall at ESOF2020

Sommario | Table of contents

Volume 10 – 1 · 2021

RAPPORTI DI ATTIVITÀ / ACTIVITY REPORTS

Cortona Young (online conference) 5
“New Frontiers in the Search for Dark Matter” 9
Breakdown of Ergodicity in Isolated Quantum Systems: From Glassiness to Localization... 15

IN EVIDENZA / HIGHLIGHTS

La polarizzazione: uno strumento diagnostico per i dischi protoplanetari |
Polarization: a diagnostic tool for protoplanetary disks 19
FRANCESCA BACCIOTTI

L'età di una stella rivelata dalla sua composizione chimica | *Stellar age revealed by
chemical composition* 25
LAURA MAGRINI, GIADA CASALI

L'ultima frontiera dell'ottica adattiva a stella guida naturale | *The last frontier of
natural guide star adaptive optics* 31
ENRICO PINNA

Il microspettrometro in una goccia | *A Fourier transform microspectrometer in a droplet* 37
PIETRO MALARA

Un sistema di crittografia quantistica per cifrare la videochiamata del Premier
a ESOF2020 | *A quantum cryptography system used to encrypt the Italian Prime
Minister's videocall at ESOF2020* 43
ILARIA VAGNILUCA, NICOLA BIAGI, DAVIDE BACCO, ALESSANDRO ZAVATTA



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
FIRENZE



INAF



ISTITUTO NAZIONALE DI ASTROFISICA
OSSERVATORIO ASTRONOMICCO DI ARCATE



INO-CNR
ISTITUTO
NAZIONALE DI
OTTICA

Versione elettronica | Online version:

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

€ 19,00

Poste Italiane spa - Tassa pagata - Piego di libro

Aut. n. 072/DCB/FI1/VF del 31.03.2005