



Lo studio delle stelle e della formazione stellare ad Arcetri

The study of stars and star formation at Arcetri

Daniele Galli, Sofia Randich

INAF – Osservatorio Astrofisico di Arcetri

Riassunto. Questo contributo ripercorre gli sviluppi degli studi di spettroscopia stellare e di formazione stellare che cominciarono ad emergere all'Osservatorio di Arcetri intorno ai primi anni '70, grazie all'impulso dato dall'introduzione di nuove tecniche nei tradizionali studi di fisica solare.

Parole chiave. Formazione stellare, radioastronomia, astronomia infrarossa, spettroscopia.

Gli esordi negli anni '70

Dagli anni '20 fino alla fine degli anni '60 del novecento, l'attività di ricerca all'Osservatorio Astrofisico di Arcetri si sviluppò principalmente nell'ambito della fisica solare, portando avanti un programma di osservazioni e fotografia astronomica prevalentemente in banda ottica. Naturalmente non erano mancate le eccezioni: una per tutte la tesi di laurea di Margherita Hack nel 1945 sulla variabile cefeide FF Aql, a testimonianza della sopravvivenza dell'interesse antico per l'astrofisica stellare che aveva reso famoso il fondatore dell'Osservatorio, Giovanni Battista Donati. A partire dai primi anni '70, cominciarono a emergere dalla fisica solare nuove linee di ricerca dedicate allo studio dei fenomeni di emis-

Abstract. This contribution traces the developments in stellar spectroscopy and star formation studies that began to emerge at the Arcetri Observatory around the early 1970s, thanks to the impetus given by the introduction of new techniques into traditional solar physics studies.

Keywords. Star formation, radio astronomy, infrared astronomy, spectroscopy.

The beginnings in the 1970s

From the 1920s until the late 1960s, research activity at the Osservatorio Astrofisico di Arcetri developed mainly in the area of solar physics, pursuing a program of astronomical observations and astronomical photography mainly in the optical band. Of course, there had been exceptions: one for all was Margherita Hack's dissertation in 1945 on the Cepheid variable FF Aql, testifying to the survival of the early interest in stellar astrophysics that had made the Observatory's founder, Giovanni Battista Donati, famous. Beginning in the early 1970s,

sione delle stelle e delle regioni di formazione stellare. Questi sviluppi presero avvio dall'introduzione di nuove tecniche dedicate espressamente allo studio della corona solare, che avevano permesso di estendere le osservazioni tradizionali in banda ottica ad altre regioni dello spettro elettromagnetico. Si cominciarono a fare osservazioni a lunghezze d'onda radio, applicando le tecniche radioastronomiche che l'allora direttore Guglielmo Righini aveva studiato a Cambridge alla fine degli anni '40, e, in parallelo, si iniziò a studiare l'emissione solare nelle bande UV e X grazie all'installazione ad Arcetri di antenne per ricevere dati dai satelliti artificiali statunitensi SOLRAD.

Intorno a queste due nuove "finestre" aperte sulla fisica solare si vennero a formare piccoli gruppi di ricercatori che cominciarono a compiere escursioni sempre più ampie in territori diversi da quelli tradizionali: Marcello Felli e Gianni Tofani insieme ad altri cominciarono ad interessarsi allo studio dell'emissione radio continua di regioni HII, mentre Roberto Pallavicini ed altri si occuparono dell'analisi e dell'interpretazione dell'emissione coronale UV e X di stelle attive e di tipo T-Tauri. Tra i più significativi risultati di questo periodo vanno segnalate diverse campagne osservative sulle sorgenti radio compatte in banda centimetrica, condotte al VLA da Felli (in collaborazione con Ed Churchwell) dal 1970 al 1990, e un importante lavoro del 1975 di Felli e Nino Panagia sullo spettro dell'emissione free-free di stelle con venti o involucri con gradienti di densità. In ambito stellare sono invece da ricordare i lavori di Pallavicini con vari collaboratori italiani e stranieri pubblicati alla fine degli anni '70 ed inizio anni '80 utilizzando dati dei satelliti EXOSAT e Einstein, in particolare la determinazione della correlazione

new lines of research dedicated to the study of stellar emission phenomena and star-forming regions began to emerge from solar physics. These developments began with the introduction of new techniques dedicated expressly to the study of the solar corona, which had made it possible to extend traditional optical-band observations to other regions of the electromagnetic spectrum: observations started to be carried out in the radio band, applying the radio astronomy techniques that then-director Guglielmo Righini had studied at Cambridge in the late 1940s; at the same time solar emission in the UV and X-bands began to be studied thanks to the installation at Arcetri of antennas specifically designed to receive data from the U.S. SOLRAD artificial satellites.

Small groups of astronomers gathered around these two new "windows" opened on solar physics and they began to make increasingly large excursions into territories other than those traditionally covered by the Observatory. Marcello Felli and Gianni Tofani, along with others, took an interest in the study of the continuous radio emission of HII regions, while Roberto Pallavicini and others were gradually involved in the analysis and interpretation of the UV and X coronal emission of active stars and T-Tauri stars. Among the most significant achievements during this period were several observational campaigns on centimeter-band compact radio sources, conducted at the VLA by Felli and Ed Churchwell from 1970 to 1990, and the seminal work by Felli and Nino Panagia in 1975 on the free-free emission spectrum of stars with winds or envelopes with density gradients. In the stellar research field, on the other hand, works by Pallavicini and collaborators published in the late 1970s and early 1980s using data from the

tra la luminosità X, luminosità bolometrica e velocità di rotazione per stelle di vari tipi spettrali. Pallavicini ebbe inoltre un ruolo di rilievo nello sviluppo del satellite XMM-Newton dell'Agenzia Spaziale Europea, del quale fu *Mission Scientist* e in quello del satellite italiano/olandese BeppoSAX.

La direzione di Franco Pacini (1978)

La nomina di Franco Pacini a direttore dell'Osservatorio nel 1978 fornì una spinta notevole agli studi sulla materia interstellare. Pacini contribuì a promuovere lo sviluppo dell'astronomia in banda millimetrica e submillimetrica e favorì l'inserimento ad Arcetri di nuovi ricercatori con competenze teoriche e modellistiche, come Antonella Natta, Carlo Giovanardi, e Francesco Palla. Sotto la direzione di Pacini si intensificò la partecipazione a conferenze internazionali dedicate al settore allora nascente della formazione stellare. Era nato ad Arcetri il primo nucleo del "gruppo di formazione stellare" i cui interessi spaziavano dalle osservazioni radio e infrarosse alla modellizzazione dei processi radiativi e dinamici.

Lo sviluppo dell'astronomia infrarossa (1980)

L'astronomia infrarossa in particolare ricevette negli anni '80 un interesse crescente da tutti i punti di vista: osservativo, teorico e tecnologico. Si trattava di un campo nuovo, e pochissimo rappresentato in Italia; tuttavia proprio nel 1980

EXOSAT and Einstein satellites determined the correlation between X-luminosity, bolometric luminosity and rotational velocity for stars of various spectral types. Pallavicini also played a leading role in the development of the XMM-Newton satellite of the European Space Agency, as well as in the BeppoSAX Italian/Dutch space mission.

Franco Pacini's directorship (1978)

The appointment of Franco Pacini as director of the Observatory in 1978 gave a major boost to research into interstellar matter. Pacini helped promote the development of millimeter- and submillimeter-band astronomy and fostered the inclusion at Arcetri of new researchers with theoretical and modeling expertise, such as Antonella Natta, Carlo Giovanardi, and Francesco Palla. Under Pacini's directorship, participation in international conferences devoted to the then nascent field of star formation was intensified. The first nucleus of the "star formation group", whose interests ranged from radio and infrared observations to the modeling of radiative and dynamical processes, had been born at Arcetri.

The development of infrared astronomy (1980)

Infrared astronomy in particular received increasing interest in those years from all points of view: observational, theoretical and technological. It was a new field, and very poorly repre-

era stato compiuto un passo avanti importante con la costituzione del Centro per l'Astronomia Infrarossa e lo Studio del Mezzo Interstellare del Consiglio Nazionale delle Ricerche (CAISMI-CNR), ente preposto anche alla gestione del Telescopio Infrarosso da 1.5m del Gornergrat sulle alpi svizzere (TIRGO). Del centro fecero parte tra gli altri Tofani, direttore dal 1987, e Piero Salinari, responsabile del progetto TIRGO. Per questo telescopio fu progettata e interamente realizzata ad Arcetri una strumentazione che comprendeva due spettrometri e tre camere. Con il telescopio TIRGO, operativo fino al 2005, furono ottenuti diversi risultati significativi nel campo della formazione stellare galattica ed extragalattica, e furono compiuti anche studi di comete e occultazioni lunari, contribuendo alla formazione di un'eccellente "scuola infrarossa" ad Arcetri.

Gli sviluppi degli anni '90

Dagli anni '80 in poi il settore dell'astronomia infrarossa e della formazione stellare furono in continua espansione. In banda radio fu sfruttata in maniera intensiva l'antenna di 32 m di Medicina per uno studio sistematico di tutte le sorgenti maser di H₂O a 22.2 GHz esistenti a nord di -30° di latitudine, allo scopo di fornire un database omogeneo su cui condurre analisi di variabilità; in banda millimetrica furono invece utilizzati soprattutto gli strumenti dell'*Institut de Radioastronomie Millimétrique* (IRAM), il radiotelescopio da 30 m di Pico Veleta in Spagna e le 6 antenne di Plateau de Bure nelle Alpi francesi, oltre al VLA già

sented in Italy. However, in 1980 a major step forward had been taken with the establishment of the Center for Infrared Astronomy and the Study of the Interstellar Medium of the National Research Council (CAISMI-CNR), an organization also responsible for the management of the 1.5m Gornergrat Infrared Telescope in the Swiss Alps (TIRGO). The center's staff included Tofani, director from 1987, and Piero Salinari, TIRGO project manager. The instrumentation for the TIRGO telescope was designed and built entirely at Arcetri and included two spectrometers and three chambers. With the TIRGO telescope, operational until 2005, several significant results were obtained in the field of galactic and extragalactic star formation, and studies of comets and lunar occultations were also carried out, contributing to the formation of an excellent "infrared school" at Arcetri.

Developments in the 1990s

From the 1980s onward, the fields of infrared astronomy and star formation were in continuous expansion. In the radio band, the 32 m antenna at Medicina was intensively exploited for a systematic study of all existing 22.2 GHz H₂O maser sources north of -30° latitude in order to provide a homogeneous database on which to conduct variability analyses. In the millimeter band, the Arcetri group sought access to the instruments of the Institut de Radioastronomie Millimétrique (IRAM), the 30-m radio telescope at Pico Veleta in Spain and the six antennas at Plateau de Bure in the French Alps, in addition to the VLA. These facilities were

citato. Con questi strumenti furono compiute importanti osservazioni dell'emissione continua di condensazioni molecolari e dischi protostellari, e dell'emissione di riga di vari traccianti molecolari allo scopo di studiare la cinematica di *infall/outflow* delle regioni di formazione stellare.

Verso ALMA

A partire dagli anni '90, il numero dei ricercatori coinvolti aumentò considerevolmente: oltre agli astronomi già nominati, al volgere del millennio la componente osservativa radioastronomica/infrarossa comprendeva Maria Teresa Beltrán, Claudio Codella, Riccardo Cesaroni, Fabrizio Massi, Luca Moscadelli, Luca Olmi e Riccardo Valdetaro; la componente stellare includeva Elena Franciosini, Laura Magrini, e Sofia Randich. Ad essi si aggiunsero successivamente Anna Brucalassi, Davide Fedele, Andrea Lorenzani, Marco Padovani, Elena Pancino, Lorenzo Pino, Linda Podio, Germano Sacco e Nicoletta Sanna. Tra la fine degli anni '90 e i primi anni 2000 lavorarono attivamente nel gruppo stelle/formazione stellare Malcolm Walmsley (dal 1995 al 2008), Paola Caselli (dal 1996 al 2005), e Leonardo Testi (dal 1998 al 2007).

Negli anni '90 l'accesso ad una strumentazione millimetrica di punta era diventato per il gruppo di Arcetri ormai una necessità imprescindibile. Grazie anche al lavoro di persuasione di Franco Pacini in qualità di membro dell'ESO Council, nel dicembre 1998 si giunse alla firma di un *Memorandum of Understanding* tra la

used to conduct important observations of the continuous emission of molecular cloud cores and protostellar disks, and of the line emission of various molecular tracers, for the purpose of studying the infall/outflow kinematics of star-forming regions. The research activity carried out at the time developed in the most diverse directions, also opening up to theoretical topics such as protostellar and main pre-sequence evolution, and primordial star formation.

Towards ALMA

In the 1990's, the number of researchers involved increased considerably: in addition to the astronomers already named, by the turn of the millennium the radio astronomy/infrared observing component included Maria Teresa Beltrán, Claudio Codella, Riccardo Cesaroni, Fabrizio Massi, Luca Moscadelli, Luca Olmi, and Riccardo Valdetaro; the stellar component included Elena Franciosini, Laura Magrini, and Sofia Randich. They were later joined by Anna Brucalassi, Davide Fedele, Andrea Lorenzani, Marco Padovani, Elena Pancino, Lorenzo Pino, Linda Podio, Germano Sacco, and Nicoletta Sanna. Between the late 1990s and the early 2000s, Malcolm Walmsley (1995 to 2008), Paola Caselli (1996 to 2005), and Leonardo Testi (1998 to 2007) worked actively in the star formation group.

During the 1990s, access to state-of-the-art millimeter instrumentation had become an unavoidable necessity for the Arcetri group. Thanks in part to the persuasive effort of Franco Pacini as a member of the ESO Council, a Memorandum of Understanding was signed in

National Science Foundation e varie organizzazioni scientifiche europee, tra cui ESO, per “la progettazione e realizzazione di un grande interferometro millimetrico/sub-millimetrico denominato Atacama Large Millimeter Array (ALMA)” che iniziò ad essere operativo già dal 2007 durante la sua costruzione, ultimata nel 2011. A partire dai primi anni 2000, alcuni membri del gruppo di Arcetri furono coinvolti in prima persona nella gestione di ALMA: ad esempio Walmsley e Testi ricoprirono il ruolo di rappresentanti per l’Italia nell’*ALMA Advisory Committee* rispettivamente dal 2000 al 2003 e dal 2003 al 2006. Grazie ad ALMA, il gruppo di Arcetri poté realizzare numerosi e importanti progetti di ricerca nel campo dell’astrochimica, dei dischi protoplanetari, della dinamica delle nubi molecolari e in generale nella caratterizzazione delle proprietà fisiche delle regioni di formazione di stelle di piccola e grande massa. Queste tematiche si sono ulteriormente sviluppate negli anni e costituiscono ancora oggi alcune fra le ricerche di punta svolte all’Osservatorio.

La spettroscopia ottica (1988)

Dalla fine degli anni '80 Roberto Pallavicini e alcuni collaboratori, pur continuando ad utilizzare in modo intenso le osservazioni in banda X e radio per lo studio delle corone stellari, capirono l’importanza della spettroscopia ottica ad alta risoluzione per l’indagine complementare delle cromosfere delle stelle. Cominciarono in quel periodo numerose campagne osservative con i telescopi

December 1998 between the National Science Foundation and various European scientific organizations, including ESO, for “the design and construction of a large millimeter/sub-millimeter interferometer called the Atacama Large Millimeter Array (ALMA)”, which began to be operational as early as 2007, during its construction, completed in 2011. Starting in the early 2000s, some members of the Arcetri group were personally involved in the management of ALMA: Malcolm Walmsley and Leonardo Testi, for example, served as representatives for Italy on the ALMA Advisory Committee from 2000 to 2003 and from 2003 to 2006, respectively. Thanks to ALMA, the Arcetri group was able to carry out several important research projects in the field of astrochemistry, protoplanetary disks, molecular cloud dynamics and, in general, in the characterization of the physical properties of low- and high-mass star-forming regions. These research lines further developed during the years that followed and now represent some of the most cutting-edge investigations areas at the Observatory.

Optical Spectroscopy (1988)

While continuing to make intensive use of X-band and radio observations for the study of stellar coronae, at the end of the '80s, Roberto Pallavicini and a few collaborators realized the importance of high-resolution optical spectroscopy for the complementary investigation of the chromospheres of the stars. Numerous observing campaigns at the time began with the telescopes of the European Southern Observatory (ESO), particularly with the CAT telescope

dell'ESO, in particolare con il telescopio CAT e lo spettrografo ad alta risoluzione CES. Successivamente la spettroscopia ad alta risoluzione fu estesa alla più generale indagine di altre proprietà stellari e allo studio dell'abbondanza del litio, elemento chiave per la caratterizzazione delle stelle, della loro età ed evoluzione. Con il ritorno ad Arcetri di Sofia Randich a metà degli anni '90, la spettroscopia stellare si è progressivamente aperta a tematiche di ricerca diverse, rivolte sia a popolazioni stellari giovani sia a stelle ed ammassi stellari vecchi e alla cosiddetta "archeologia Galattica". Queste attività sono culminate nella *survey* spettroscopica Gaia-ESO, un progetto più che decennale, guidato ad Arcetri e realizzato con il Very Large Telescope (VLT) dell'ESO. Gaia-ESO rappresenta la più grande campagna osservativa stellare mai svolta su un telescopio della classe degli 8m.

La consapevolezza dell'importanza della spettroscopia ottica motivò l'interesse di Pallavicini anche nello sviluppo di nuova strumentazione. In particolare, fu PI italiano dello spettrografo X-Shooter, il primo degli strumenti di seconda generazione installati al VLT. X-Shooter fu sviluppato da un consorzio che oltre ad ESO includeva Danimarca, Francia, Italia ed Olanda; purtroppo Pallavicini, scomparso nel 2009, non ha potuto vedere la prima luce di questo strumento che è stato ed ancora è fondamentale per molte ricerche di punta dell'astrofisica stellare ma non solo.

Gli studi teorici

La fruttuosa collaborazione tra Francesco Palla e Steve Stahler, iniziata nei primi anni '80 alla Cornell University di Ithaca, New York, sotto la guida di Ed

and the CES high-resolution spectrograph. Subsequently, high-resolution spectroscopy was extended to the more general investigation of other stellar properties and to the study of the abundance of lithium, a key element for the characterization of stars, their ages and evolution. With the return to Arcetri of Sofia Randich in the mid-1990s, the research based on stellar spectroscopy gradually opened up to different topics, aimed at the both the investigation of young stellar populations and to the field of old stars, star clusters and so-called "Galactic archaeology". These activities culminated in the Gaia-ESO Spectroscopic Survey, a more than 10-year long project coordinated at Arcetri (Fig. 3) and carried out using ESO's Very Large Telescope (VLT); Gaia-ESO represents the largest stellar observation campaign ever carried out using an 8m-class telescope.

Awareness of the importance of optical spectroscopy motivated Pallavicini's interest also in the development of new instrumentation. In particular, he was the Italian PI of the X-Shooter spectrograph, the first of the second-generation instruments installed at the VLT. X-Shooter, was developed by a consortium that, in addition to ESO, included Denmark, France, Italy and the Netherlands. Unfortunately, Pallavicini, who passed away in 2009, was unable to see the first light of this instrument which was and still is fundamental to many key researches in stellar astrophysics, as well as other projects. Lastly, we should point out that, in 1995, Pallavicini organized the IX "Cool Stars, Stellar Systems and The Sun" conference in Florence, where future Nobel Prize winners, Michel Mayor and Didier Queloz, announced the discovery of the first exoplanet.

Salpeter, produsse una serie di importanti lavori teorici sull'evoluzione stellare protostellare e di pre-sequenza principale pubblicati in un arco di venti anni tra il 1980 e il 2000, e portò alla realizzazione del fondamentale libro di testo *The Formation of Stars*, pubblicato nel 2004, a tutt'oggi la principale opera di riferimento nel settore. Gli interessi di Francesco Palla si estendevano anche alla formazione delle prime stelle nell'Universo, alla chimica dell'universo primordiale e all'evoluzione chimica galattica degli elementi leggeri (con Daniele Galli). La sua scomparsa prematura nel 2016 costituì una perdita incolmabile per il gruppo di formazione stellare e per tutto l'Osservatorio. Gli studi teorici si svilupparono anche in altre direzioni: negli anni '90 Francesca Bacciotti e Daniele Galli iniziarono lo studio dei fenomeni associati al campo magnetico nei getti protostellari e nella fase di collasso gravitazionale. Entrambe queste linee di ricerca si sono poi sviluppate anche in stretta collaborazione con gruppi osservativi, sia dell'Osservatorio (il gruppo di radioastronomia) che stranieri. Recentemente, a questi studi si è affiancata una linea di ricerca teorica/osservativa (Marco Padovani) focalizzata sugli effetti dei raggi cosmici nell'evoluzione chimica e dinamica della materia interstellare.

Daniele Galli è Astronomo Associato all'INAF-Osservatorio Astrofisico di Arcetri, dove si occupa di formazione stellare. Dal 2017 insegna Fisica della Materia Interstellare all'Università di Firenze.

Sofia Randich è Dirigente di Ricerca presso INAF-Osservatorio Astrofisico di Arcetri di cui è direttrice da gennaio 2018. La sua ricerca si rivolge all'astrofi-

Theoretical studies

The fruitful collaboration between Francesco Palla and Steve Stahler (University of California, Berkeley), which began in the early 1980s at Cornell University in Ithaca, New York, under the leadership of Ed Salpeter, produced a series of important theoretical works on protostellar and pre-main sequence stellar evolution published between 1980 and 2000, and resulted in the seminal textbook "The Formation of Stars", published in 2004, which is still the leading reference work in the field. Francesco Palla's interests also extended to the formation of the first stars in the Universe, the chemistry of the early universe and the galactic chemical evolution of light elements (with Daniele Galli). His untimely death in 2016 was an unbridgeable loss for the star formation group and for the entire Observatory. Theoretical studies also developed in other directions: in the 1990s, Francesca Bacciotti and Daniele Galli began studying the phenomena associated with magnetic fields in protostellar jets and in the gravitational collapse phase. Both of these lines of research later developed in close collaboration with observational groups, both from the Observatory (the radio astronomy group) and from abroad. Recently, these studies have been joined by a theoretical/observational line of research (Marco Padovani) focused on the role of low-energy cosmic rays in the chemical and dynamical evolution of interstellar matter.



Figura 1. Il gruppo stelle e formazione stellare a Villa Galileo nel 2018. Da sinistra: F. Hersant, C. Codella, V. Taquet, L. Olmi, F. Bacciotti, L. Moscadelli, R. Cesaroni, E. Bianchi, F. Fontani, M. Padovani, C. Favre, F. Massi, A. Lorenzani, L. Podio, V. Roccatagliata, D. Galli, N. Sanna, E. Franciosini, G. Guidi, T. Margheri, C. Mininni, L. Colzi, E. Pancino, L. Bravi, C. Toci, S. Randich, D. Fedele, G. Sacco (crediti: archivio OAA).

Figure 1. The star and star formation group at Villa Galileo in 2018. From left: F. Hersant, C. Codella, V. Taquet, L. Olmi, F. Bacciotti, L. Moscadelli, R. Cesaroni, E. Bianchi, F. Fontani, M. Padovani, C. Favre, F. Massi, A. Lorenzani, L. Podio, V. Roccatagliata, D. Galli, N. Sanna, E. Franciosini, G. Guidi, T. Margheri, C. Mininni, L. Colzi, E. Pancino, L. Bravi, C. Toci, S. Randich, D. Fedele, G. Sacco (credits: OAA archives).

sica stellare e allo studio della formazione ed evoluzione della nostra Galassia. È Co-Principal Investigator della Gaia-ESO Survey.

Daniele Galli is Associate Astronomer at INAF-Osservatorio Astrofisico di Arcetri, where he works on star formation. He has been teaching a course on Physics of the Interstellar Medium at the University of Florence since 2017.

Sofia Randich is Director of Research at INAF-Osservatorio Astrofisico di Arcetri, and has been Director of the Institute since January 2018. Her research activity focuses on stellar astrophysics and on Galactic archaeology. She is Co-Principal Investigator of the Gaia-ESO Survey.