



Il Colle di
Galileo

Venti anni di spettroscopia da terra e dallo spazio

Twenty years of spectroscopy from the ground and from space

Andrea Tozzi

INAF – Osservatorio Astrofisico di Arcetri

Riassunto. la spettrometria è sempre stata uno degli elementi portanti dell'osservazione astronomica. Presso l'Osservatorio di Arcetri si progettano e realizzano moduli spettrografici fin dagli anni novanta del secolo scorso. La complessità di questi strumenti è cresciuta nel tempo e di pari passo sono aumentate le loro dimensioni e performance, sempre mantenendo l'idea originale e lo schema di base, sapientemente trasmessi da una generazione di ricercatori a quella successiva.

Parole chiave. Spettroscopia, spettrografi, ARIEL, MOONS, GIANO, ANDES

Lo spettrografo è stato il primo strumento che gli astronomi hanno collegato otticamente ad un telescopio nel tentativo di comprendere la natura delle stelle e spiegare la loro origine, formazione ed evoluzione. Alla fine del XIX secolo Gian Battista Donati (1826-1873) e Angelo Secchi (1818-1878) misero a punto i primi spettrometri che potessero essere usati con un telescopio astronomico: il primo fece uso di una serie di prismi di vetro disposti in cascata, il secondo di un singolo prisma che funzionava anche da obiettivo. Con questi strumenti realizzarono una prima classificazione spettrale delle stelle, replicando accuratamente su carta gli

Abstract. Spectrometry has always been one of the cornerstones of astronomical observation. At the Arcetri Observatory, spectrographic modules have been designed and built since the 1990s. The complexity of these instruments has grown over time, as have their size and performance, always maintaining the original idea and basic scheme, skillfully transmitted from one generation of researchers to the next.

Keywords. Spectroscopy, spectrographs, ARIEL, MOONS, GIANO, ANDES.

The spectrograph was the first instrument that astronomers connected to a telescope in an attempt to understand the nature of the stars and explain their origin, formation and evolution. At the end of the 19th century Gian Battista Donati (1826-1873) and Angelo Secchi (1818-1878) developed the first spectrometers that could be used with an astronomical telescope: the former made use of a series of glass prisms arranged in a cascade, the latter of a single prism also working as a lens. With these instruments they made a primitive spectral classification of

spettri osservati, facendo un uso sapiente e raffinato dei colori dello spettro visibile. Il metodo osservativo usato da questi pionieri del XIX secolo tutto sommato è identico a quello usato nella moderna strumentazione: un sistema ottico per raccogliere i fotoni, un elemento dispersivo e un sistema ottico per focalizzare la luce dispersa su un rivelatore. Non mancava la lampada di calibrazione: se oggi-giorno si ambisce all'uso di *laser comb* o Fabry Perot, all'epoca ci si accontentava delle poche sorgenti spettrali a disposizione, in primis la lampada al sodio, la cui luce usata come riferimento, veniva messa a confronto diretto con quella proveniente dall'astro in osservazione con ottimi risultati: si consideri che un occhio allenato è in grado di discernere la lunghezza d'onda associata ad un certo colore con una precisione di pochi nanometri.

All'Osservatorio di Arcetri la tradizione spettroscopica è sempre stata presente e con essa una vera e propria scuola di costruzione degli spettrografi. Volendo cercare il capo di questo filo rosso che unisce almeno due generazioni di ricercatori e tecnologi ante litteram, potremmo identificare con il *LongSlit Infrared Spectrometer* (LonGSp) il primo moderno apparato spettroscopico realizzato su questa collina. I suoi ingredienti sono del tutto assimilabili a quelli attualmente usati per progettare gli strumenti dei futuri grandi telescopi che daranno modo ai nostri giovani ricercatori l'opportunità di osservare il cielo con una risoluzione spettrale e con una capacità osservativa che farebbero felici Donati e Secchi. LonGSp faceva uso di un reticolo diffrattivo, un *detector* Rockwell basato sul HgTeCd (il glorioso NICMOS 256x256 pixel), un'elettronica di lettura autocostruita, un criostato operante alla temperatura di 77K e infine un sorprendente computer 486

stars, painstakingly reproducing by hand the spectra they observed, making skillful and refined use of the colors of the visible spectrum. The observational method used by these 19th-century pioneers is the same as that used in modern times: an optical system to collect photons, a dispersive element, and an optical system to focus the scattered light on a detector. There was no lack of a calibration lamp: while we now aspire to use a laser comb or a Fabry Perot, at that time few spectral sources were available, primarily the sodium lamp, the light of which was compared directly with that coming from the astronomical source under observation with excellent results: bear in mind that a trained eye can discern the wavelength associated with a certain color with an accuracy of a few nanometers.

At the Arcetri Observatory, the spectroscopic tradition has always been present, along with a real school of spectrograph construction. Wanting to look for the end of this thread linking at least two generations of ante litteram researchers and technologists, we could identify the LongSlit Infrared Spectrometer (LonGSp) as the first modern spectroscopic apparatus built on the Arcetri hill in the early 1990s. Its components were entirely comparable to those currently used to design the instruments of future large telescopes that will give our young researchers the opportunity to observe the sky with a spectral resolution and observational capability that would be astonishing for Donati and Secchi. LonGSp made use of a diffractive grating, a Rockwell detector based on HgTeCd (the glorious 256x256-pixel NICMOS), self-built readout electronics, a cryostat operating at a temperature of 77K, and finally an amazing 486 computer on which the procedures for decoding the analog signal based on the C language ran (even

sul quale giravano le procedure per la decodifica del segnale analogico basate sul linguaggio C (già negli anni novanta i dati spettrali erano registrati e analizzati da un codice numerico). Questo strumento era collegato al Telescopio Infrarosso del Gornergrat (TIRGO), nei pressi dell'omonimo ghiacciaio sopra Zermatt in Svizzera, dove operò con successo dal 1994 al 1997.

Nei primi anni del secolo odierno, partì una nuova avventura non dissimile dalla precedente per i suoi tratti costituenti: nel 2002 una *call* di INAF selezionò il progetto GIANO per dotare il Telescopio Nazionale Galileo (TNG) di uno spettrometro infrarosso ad alta risoluzione spettrale. La *Preliminary Design Review* (PDR) nel 2004, la *Final Design Review* (FDR) nel 2009, la fase di assemblaggio (MAIT) fra il 2007 e il 2011 e infine il *commissioning* nel 2012 al TNG, situato a La Palma nelle isole Canarie. Lo spettrometro ha dimensioni considerevoli: il criostato che lo contiene somiglia ad una bombola del gas di 3 m di lunghezza per 1.5 m di diametro il cui ingombro fu progettato a misura degli angusti spazi dei nostri laboratori e dei corridoi: memorabile la procedura di uscita di GIANO che prevedeva lo smontaggio degli infissi e il suo trasporto millimetrico. La risoluzione spettrale, tutt'ora invidiata, è pari a 50000 in un range spettrale che va da 0.9 micron a 2.4 micron con un rumore elettronico di acquisizione inferiore al singolo elettrone: elettronica progettata e realizzata presso il laboratorio elettronico di Arcetri.

Nel 2014, durante una cena a Montreal in occasione del congresso SPIE, partì l'avventura per un nuovo spettrometro: MOONS, spettrometro a doppia risoluzione spettrale per il VLT. Il consorzio comprendeva molte nazioni e il piccolo

back in the 1990s spectral data were recorded and analyzed by a numerical code). This instrument was connected to the Gornergrat Infrared Telescope (TIRGO) near the glacier of the same name above Zermatt in Switzerland, where it operated successfully from 1994 to 1997.

A new adventure, not dissimilar to the previous one, began in the early years of this century: in 2002 an INAF call selected the GIANO project to equip the Galileo National Telescope (TNG) with an infrared spectrometer with high spectral resolution. The Preliminary Design Review (PDR) in 2004, the Final Design Review (FDR) in 2009, the assembly phase (MAIT) in 2007-2011 and, finally, the commissioning in 2012 at TNG. The spectrometer is very large, the cryostat that contains it resembles a gigantic gas cylinder about three meters long and 1.5 meters in diameter, designed to fit into the narrow spaces of our laboratories and corridors: GIANO's exit procedure, which involved the disassembly of the fixtures and its millimetric transportation, is memorable. The spectral resolution, still envied, is equal to 50000 in a spectral range that goes from 0.9 to 2.4 micron with an electronic acquisition noise lower than a single electron: the electronics were invented and created in the Arcetri electronic laboratory.

The adventure for a new spectrometer began in 2014, during a dinner at the SPIE congress in Montreal. The spectrometer was MOONS, a dual spectral resolution spectrometer for the VLT. The consortium included many nations, and the small Arcetri group was responsible for an important part of the project: the optical design! Then we also ended up being responsible for the mechanical design of the collimation optics, the dichroic filters and the disperser handling apparatus: half a ton of aluminum, glass, and lots of cutting-edge technology to move by 350 mm in a couple

gruppo di Arcetri era responsabile per la progettazione di una parte importante: il disegno ottico! Poi finimmo anche a fare la progettazione meccanica dell'ottica di collimazione, dei filtri dicroici e dell'apparato di movimentazione dei dispersori: mezza tonnellata di alluminio, vetro e tanta tecnologia di punta da spostare di 350 mm in un paio di minuti a -210°C . Il tutto in un telescopio notoriamente soggetto a violenti terremoti. MOONS opera da 647 nm a 1650 nm (bande RI, I, YJ, H) con una duplice risoluzione spettrale, osservando 1000 oggetti contemporaneamente grazie ad altrettante fibre ottiche posizionate sul gigantesco piano focale del VLT. Attualmente questo mastodontico strumento è in fase di collaudo presso l'*integration room* del Royal Observatory di Edimburgo (UK): questo strumento non sarebbe mai entrato nei laboratori di Arcetri!

Nel 2019, in pieno periodo pandemico, un nuovo grande progetto prese vita ad Arcetri: un piccolo gruppo di tecnologia spaziale fu coinvolto nel progetto ARIEL (*Atmospheric Remote-sensing Infrared Exoplanet Large-survey*), una missione spaziale ESA per la realizzazione di uno spettrofotometro che sarà lanciato nel 2029 verso il punto lagrangiano L2 per l'osservazione delle atmosfere dei pianeti extrasolari. L'Osservatorio di Arcetri è responsabile di una importante parte elettronica, la *Instrument Control Unit* (ICU) e la *Detector Control Unit* (DCU) del modulo FGS, nonché del *Telescope Assembly*, un innovativo progetto di telescopio spaziale interamente realizzato in alluminio, compreso lo specchio primario parabolico di forma ellittica da 1.1x0.75 metri. Di nuovo uno spettrometro, spaziale questa volta, che ha curiosamente degli aspetti simili al LongSp, ma che opera su una banda da 0.7 micron a 7.8 micron.

of minutes at -210°C . All in a telescope notoriously prone to violent earthquakes. MOONS operates from 647 nm to 1650 nm (RI, I, YJ, and H bands) with dual spectral resolution, observing 1,000 objects simultaneously thanks to the presence of 1,000 optical fibers on the VLT's giant focal plane. This mammoth instrument is currently being tested in the integration room of the Royal Observatory in Edinburgh, UK: this instrument would have never fitted inside the Arcetri laboratories!

A major new project came to life at Arcetri in 2019. A small space technology group was involved in the ARIEL (Atmospheric Remote-sensing Infrared Exoplanet Large-survey) project, an ESA space mission to build a spectrophotometer that will be launched towards the Lagrangian L2 point in 2029 to observe the atmospheres of extrasolar planets. The Arcetri Observatory is responsible for an important electronic part, the Instrument Control Unit (ICU) and the Detector Control Unit (DCU) of the FGS module, as well as the Telescope Assembly, an innovative project for a space telescope made entirely of aluminum, including the 1.1x0.75-meter elliptical parabolic primary mirror. This spectrometer has curious similarities to LongSp, but hosted by a spacecraft and operating on a band ranging from 0.7 to 7.8 microns..

Lastly, since 2019, the Arcetri Observatory has been involved in the design of a new spectrometer for ESO's upcoming EELT telescope: 39 meters of optics, mechanics, electronics and software for the world's largest telescope, located in Cerro Amaltes in Chile. ANDES is the size of a loft: four cryostats will operate from the U-band (350-410 nm) to the K-band (1.8-2.4 microns) and numerous operating modules will allow these cryostats to observe the clear Chilean sky. The Observatory's technology groups are responsible for important modules: the Fiberlink

Infine, dal 2019, l'Osservatorio di Arcetri è coinvolto nel progetto di un nuovo spettrometro per il costruendo telescopio EELT di ESO: 39 metri di ottica, meccanica, elettronica e software per il più grande telescopio del mondo, ubicato a Cerro Amazonas in Cile. ANDES ha le dimensioni di un loft: quattro criostati opereranno dalla banda U (350-410 nm) alla K (1.8-2.4 micron), molti i moduli operativi permetteranno a questi criostati di osservare il limpido cielo del Cile. I gruppi tecnologici dell'Osservatorio detengono la responsabilità di importanti moduli: il modulo Fiberlink e l'IFU-SCAO. Il primo permetterà il trasporto della luce dal piano focale ai quattro spettrometri e la gestione delle sorgenti di calibrazione, il secondo permetterà di realizzare una *Integral Field Unit* (IFU), una particolare modalità osservativa degli spettrometri che permette di realizzare immagini spettrali di aree di cielo via via più piccole, usando l'impareggiabile potere risolutivo messi a disposizione dalle dimensioni dell'ELT e dalla sua ottica adattiva. In particolare il modulo *Single Coniugate Adaptive Optics* avrà il compito di misurare il contributo dell'atmosfera, delle deformazioni meccaniche e delle vibrazioni di una tale struttura, e di inviare i comandi per correggere questi disturbi allo specchio adattivo più grande del pianeta. Di nuovo una realtà resa possibile dall'Osservatorio di Arcetri sia per quanto riguarda la misura dell'aberrazione ottica introdotta dall'atmosfera che per il necessario specchio deformabile, la cui invenzione ha origine proprio ad Arcetri. Queste componenti lavorano in sinergia con un modulo spettrografico, nella cui progettazione è di nuovo coinvolto, per alcune parti essenziali, un gruppo di ricerca dell'Osservatorio di Arcetri.

module and the IFU-SCAO. The former will enable the transport of light from the focal plane to the four spectrometers and the management of calibration sources, the latter will enable the realization of an Integral Field Unit (IFU), a special spectrometer observation mode that allows spectral imaging of progressively smaller areas of sky, using the unparalleled resolution made available to us by the size of the ELT and its adaptive optics, particularly the Single Conjugate Adaptive Optics module, which will measure the contribution of the atmosphere, the mechanical deformations and vibrations of a similar structure, and sending commands to the largest adaptive mirror on the planet to correct these disturbances. Again, this has been made possible by the Arcetri Observatory both in terms of measuring the optical aberration introduced by the atmosphere and the necessary deformable mirror, the invention of which originated at Arcetri. These components work in synergy with a spectrographic module, in the design of which a research group at the Arcetri Observatory is again involved for some essential parts.

Andrea Tozzi is Technologist of the Arcetri Astrophysical Observatory. He graduated from LENS (European Laboratory for Non-Linear Spectroscopy) in 1997, and was hired by INAF-OAA in 2000. From 2000 to 2009, he worked as part of the Adaptive Optics group, designing and realizing modules such as the FLAO of LBT and HOT-ESO, centered on the pyramid wavefront sensor. Since 2009, he has been working on spectrometer projects such as GIANO, MOONS, GIARPS, ARMES, ANDES. Since 2019, he has been System Engineer of the Telescope Assembly for the ARIEL-ESA space mission and of the IFU-FiberLink module of ANDES.

Andrea Tozzi è Tecnologo dell'Osservatorio Astrofisico di Arcetri. Laureatosi al LENS (*European Laboratory for Non-Linear Spectroscopy*) nel 1997, è stato assunto nel 2000 presso INAF-OAA. Dal 2000 al 2009 ha lavorato nel gruppo delle Ottiche Adattive progettando e realizzando moduli quali il FLAO di LBT e HOT-ESO, centrati sul sensore di fronte d'onda a piramide. Dal 2009 lavora su progetti di spettrometri quali GIANO, MOONS, GIARPS, ARMES, ANDES. Dal 2019 è il *System Engineer del Telescope Assembly* per la missione spaziale ARIEL-ESA e del modulo IFU-FiberLink di ANDES.

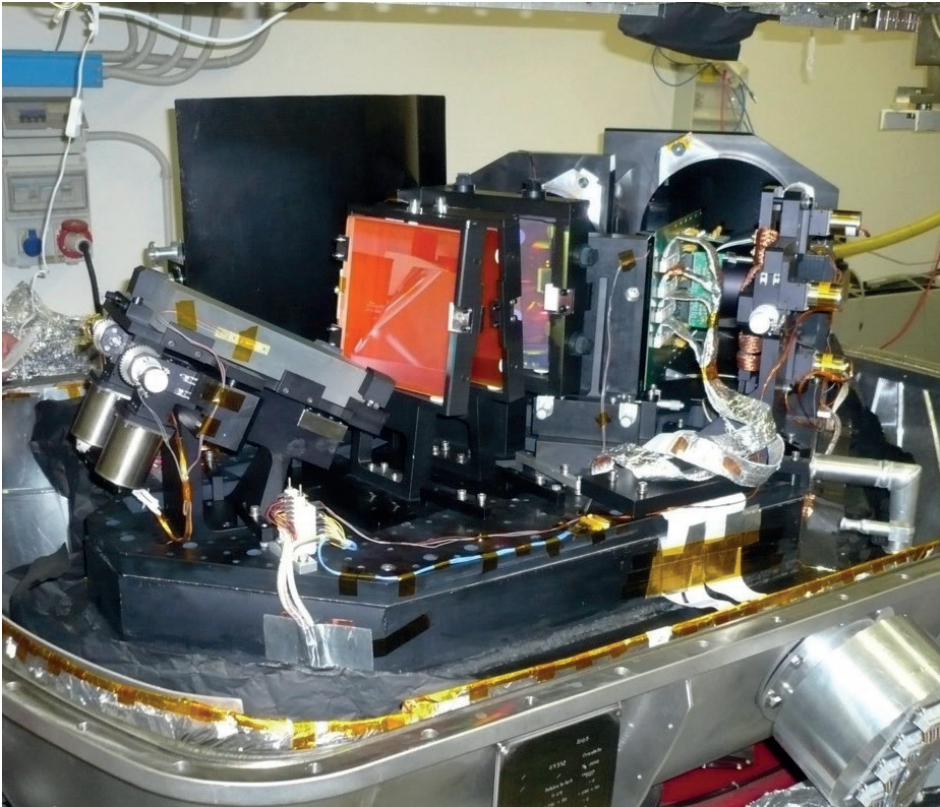


Figura 1. Lo spettrografo GIANO in fase di montaggio presso l'Osservatorio Astrofisico di Arcetri (crediti: A. Tozzi).

Figure 1. The GIANO spectrograph under assembly at the Arcetri Astrophysical Observatory (credits: A. Tozzi).

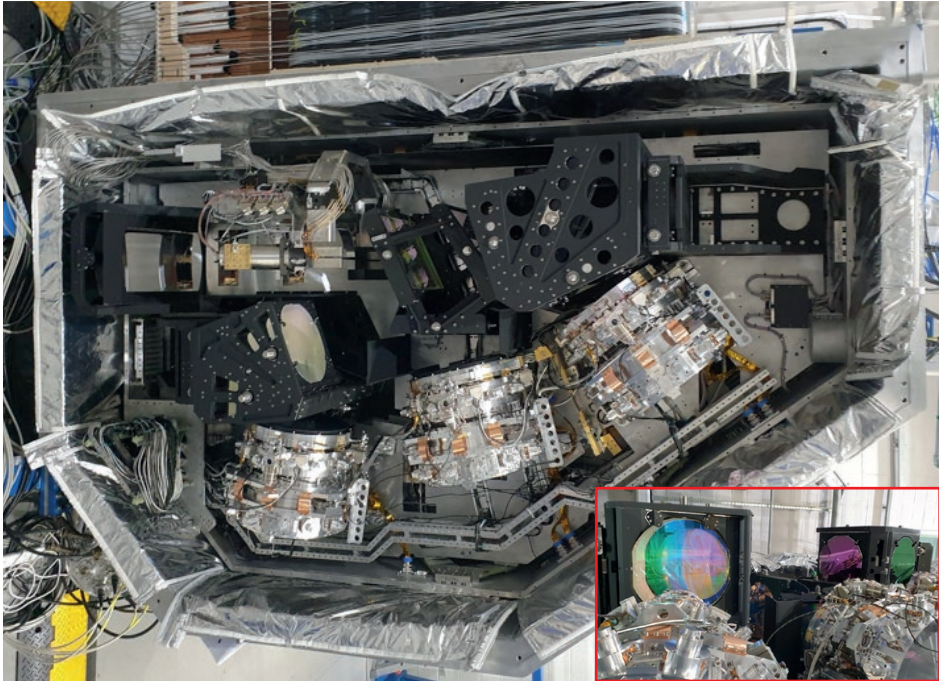


Figura 2. Lo spettrografo MOONS in fase di assemblaggio: i moduli in nero sono quelli realizzati da INAF-OAA: collimatore (in basso), modulo dicroico (nel mezzo) e i due sistemi di movimentazione dei moduli H (in alto) e YJ (in basso). Nel riquadro un particolare delle ottiche (crediti: Phil Rees).

Figure 2. The MOONS spectrograph under assembly: the modules in black are those made by INAF-OAA: collimator (bottom), dichroic module (in the foreground) and the dual-module handling systems H (top) and YJ (bottom). Details of the optics are shown in the box. (Credits: Phil Rees).

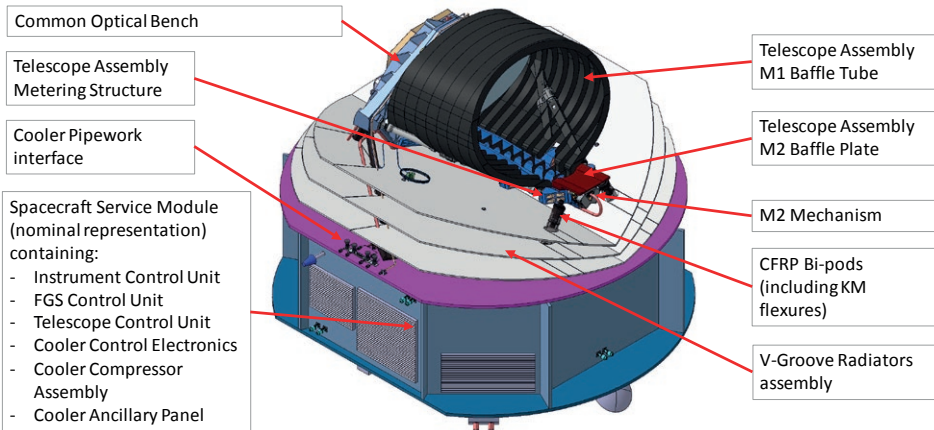


Figura 3. ARIEL è un telescopio spaziale per l'osservazione delle atmosfere dei pianeti extrasolari: sopra il piano color fucsia, il Telescope Assembly (INAF-OAA). Nella parte sottostante sono presenti i moduli ICU e DCU (INAF-OAA) (crediti: ESA).

Figure 3. ARIEL is a space telescope for observing the atmospheres of exoplanets: above the fuchsia plane, the Telescope Assembly (INAF-OAA). The ICU and DCU modules (INAF-OAA) are present below (credits: ESA).