

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.