IstitutoVeneto
diScienzeLettere
edArti

UN INTRECCIO TURBOLENTO: LA RICERCA IN OTTICA ADATTIVA AI TEMPI DELLE 'GUERRE STELLARI'

di Roberto Ragazzoni*

In questi tristi giorni in cui le armi risuonano cupe in una Europa che non ha ancora completamente rimarginato le ferite delle guerre balcaniche, e che sta inevitabilmente perdendo i testimoni diretti della Seconda guerra mondiale, provo a tratteggiare quel periodo, per certi versi intenso ed entusiasmante, dello sviluppo in ambito astronomico delle cosiddette tecniche di ottica adattiva, e del loro involontario intrecciarsi (anche se, come vedremo, si tratterà di uno 'sguardo a distanza'), con la ricerca in ambito militare, nella parte finale dell'età dell'oro (per dirla alla Hobsbawm) relativa alle iniziative note al grande pubblico come 'guerre stellari'.

Nonostante che un telescopio spaziale possa, in linea di principio, osservare oggetti celesti indisturbato dagli effetti dell'atmosfera terrestre, l'enorme costo di sviluppo e i rischi connessi ad ogni lancio in orbita atmosferica continuano a rendere l'astronomia ottica da terra un obbligo inevitabile. Nell'ultimo mezzo secolo, infatti, mentre sono state moltissime le missioni spaziali che hanno esplorato quelle porzioni di spettro elettromagnetico altrimenti invisibili da terra (si pensi ai Raggi X, a quelli gamma, ma anche a diverse regioni dello spettro infrarosso) due soli grandi telescopi hanno scrutato il cielo alle stesse lunghezze d'onda coperte classicamente dalla superficie del nostro pianeta: l'Hubble e il James Webb. Tra questi intercorrono oltre trent'anni di distanza e il primo, di 2.4 metri di diametro, raggiunge lo spazio esterno a distanza di oltre 40 anni dal telescopio Hale di Monte Palomar, il cui diametro è più che doppio del glorioso osservatorio orbitante lanciato nel 1990.

Per tutti questi motivi la compensazione della turbolenza atmosferica per i telescopi a terra rimane tuttora, e lo era ancor di più nell'epoca in cui stiamo ambientando questa breve narrazione, di importanza fondamentale. La misura di come la nostra turbolenta atmosfera (anche dai siti caratterizzati dalla trasparenza più cristallina, come i picchi nelle isole oceaniche o nel bel mezzo dei deserti) e l'introduzione artificiale nel cammino ottico all'interno del telescopio di una perturbazione eguale ma di senso contrario, prende il nome di ottica adattiva (ovvero che, continuamente, si adatta alle mutevoli condizioni atmosferiche a cui l'osservazione viene sottoposta). Questa tecnica permette così di raggiungere dal suolo la stessa qualità di raccolta delle immagini di un analogo telescopio posto al di fuori della nostra atmosfera.

All'inizio degli anni '80 del secolo scorso, in piena 'guerra fredda', il confronto, muscolare ma senza spargere una sola goccia di sangue, tra le due superpotenze, si era spostato dalla corsa alla Luna, che aveva caratterizzato le due decadi precedenti, allo sviluppo e alla proliferazione di armi

nucleari sempre più potenti, numerose, e invariabilmente costose, da entrambe le parti della cortina di ferro. Questa *escalation* sancita dal concetto di una sicura distruzione dell'avversario (in inglese *Mutual Assured Destruction*, il cui acronimo non a caso identifica la parola 'MAD', pazzo, nella lingua anglosassone) avrebbe comportato costi insopportabili. In questo contesto il presidente americano Ronald Reagan si fece promotore della cosiddetta *Strategic Defence Initiative* (Iniziativa di Difesa Strategica) popolarmente nota come 'scudo spaziale' o, appunto guerre stellari. Si tratterebbe, in sostanza, di un sistema di avvistamento e distruzione dei missili balistici avversari, mediante l'uso di fasci laser di grande potenza. Naturalmente la propagazione di questi fasci seguirebbe una sorte simile, se non per un fattore di scala relativo alla potenza coinvolta, a quella della luce di una stella ai limiti della nostra galassia, o di un nucleo galattico attivo ai margini dell'universo conosciuto, per fare un paio di esempi. Sebbene il progetto fosse accuratamente 'classificato' (ovvero tenuto segreto) nei suoi livelli di dettaglio, l'idea concettuale di come questo sistema dovesse funzionare risultava non solo di dominio pubblico, ma pienamente integrato nella vulgata popolare. Il volo del primo *Space Shuttle*, nell'aprile del 1981, è forse il primo momento in cui al grande pubblico viene rivelata la presenza di 'speciali macchine fotografiche' in grado di scrutare lo scudo termico della navetta, la cui sopravvivenza nel rientro nell'atmosfera terrestre si basava sulla integrità di queste.

È rimarchevole che, dopo poco meno di un paio di decenni, mi sarei trovato sull'isola di Haleaka, nell'arcipelago delle Hawaii, a osservare una stella della costellazione del Cigno con quelle stesse segretissime macchine fotografiche, invero un telescopio

*Negli anni '80 del secolo scorso il costo crescente di mantenere un arsenale nucleare di missili balistici intercontinentali stava diventando economicamente insostenibile. Ronald Reagan, qui sulla copertina di un «*TIME*» dell'epoca, approvò un'iniziativa per distruggere i missili nemici prima che questi potessero raggiungere il loro bersaglio. L'iniziativa entrò rapidamente nella cultura popolare guadagnandosi l'appellativo di 'guerre stellari'. La propagazione della luce nell'atmosfera terrestre giocava un ruolo chiave nella realizzazione di questa tecnologia.*

dotato di un sistema, segretissimo per lungo tempo, di ottica adattiva. Ma se quella del conteggio delle famigerate piastrelle a protezione della pancia dello *Space Shuttle* poteva essere una notizia quasi per 'addetti ai lavori', che quindi nel suo dettaglio potrebbe essere stata di non chiara comprensione al grande pubblico, possiamo citare, solo come uno dei molti esempi, la scena del film *Spie come noi* di solo qualche anno dopo (precisamente il 1985) in cui, in un clima parodistico da operetta, il tentativo di collaudo di un sistema di propagazione di un laser di potenza verso un missile balistico fallisce e finisce per colpire un satellite civile

impegnato a trasmettere musica moderna, producendo a cascata, nell'esilarante *fil-rouge* del film, la distruzione di un televisore, con conseguente meraviglia dei ragazzini che stavano seguendo il *video-clip* del momento.

È egualmente interessante che, storicamente, il primo sistema (certo assai rudimentale) di controllo ottico della propagazione di un fascio di luce viene ascritto agli 'specchi ustori' di Archimede, un'applicazione ingegnosa, probabilmente mai messa in pratica, ma di stampo smaccatamente militare.

I primi sistemi di ottica adattiva 'civile' per usi prettamente astronomici vedono la Francia in prima linea nel 1989 con un sistema pionieristico che oggi appare rudimentale, ma che ha evidentemente suscitato l'interesse di diverse comunità, facendo in modo che di lì a meno di due anni una grande parte dei risultati ottenuti dai militari venissero declassificati (desecretati) e che si profilasse uno scenario nel decennio successivo, di grandissimo fermento e di un confronto serrato ma sempre con una certa distanza (si vivevano i tempi euforici della fine della potenziale apocalisse nucleare) tra due comunità che, con risorse, motivazioni e trascorsi completamente differenti, avevano affrontato un identico problema. Si apre così un confronto interessante tra lo sviluppo di tecnologie per usi diametralmente opposti. Non c'è nulla di apparentemente più 'inutile' sul piano pratico, almeno a breve termine, di realizzare telescopi in grado di comprendere come si siano formate le galassie primordiali, o di analizzare lo spettro di pianeti extrasolari per cercare di discernere evidenze spettrali della presenza della clorofilla. Eppure questi sono due tra i tanti esempi che vengono utilizzati per giustificare gli sforzi profusi nella comunità dello sviluppo di strumentazione astronomica da terra, per realizzare un sistema di compensazione della turbolenza atmosferica. La stessa compensazione, che serviva a concentrare una manciata di fotoni provenienti dal nucleo di una galassia ai confini dell'universo osservabile, godeva di molte analogie (ma certo anche di significative differenze, considerando l'enorme energia in gioco nel caso dell'applicazione bellica) con quella necessaria a focalizzare un fascio di luce laser di potenze mai viste in alcun laboratorio, per riuscire a infliggere un danno fatale a un missile che si muoveva a velocità suborbitali nel loro mortale percorso verso l'obiettivo prefissato.

L'Air Force Maui Optical Station, AMOS, è una stazione ottica sulla cima di una delle isole delle Hawaii equipaggiata con diversi telescopi. Principalmente per la osservazione di satelliti in orbita bassa. Uno di questi telescopi comprende uno tra i primi sistemi di compensazione della turbolenza atmosferica costruito prima degli anni '90 del secolo scorso. Dopo il termine della guerra fredda un manipolo di astronomi italiani lo ha utilizzato per osservazioni della stella P-Cygni, nella costellazione omonima.

Lo sviluppo di tecnologie all'interno di ambiti sociali e culturali molto differenti mi riporta alla memoria un altro esempio eclatante. Così come in Europa il centro per la costruzione di acceleratori di particelle di grandi dimensioni è senza dubbio localizzato presso il CERN di Ginervra, l'analogo polo del blocco sovietico trova collocazione

Uno dei quattro Very Large Telescope sulle Ande Cilene, per usi astronomici, equipaggiato con quattro laser al sodio. I quattro fasci laser, di debole potenza, servono a realizzare quattro 'stelle artificiali' posizionabili anche in quelle zone di cielo dove nessuna stella naturale sufficientemente brillante è presente, consentendo di misurare, studiando come la loro immagine viene distorta dalla nostra atmosfera, la turbolenza lungo il cilindro attraverso il quale la luce di galassie lontane scorre e permettendo quindi di compensarne la distorsione ottica.

a Dubna, una città a poca distanza da Mosca, dove si possono trovare esempi di magneti per l'accelerazione di particelle di grande ingegno ma che hanno una proprietà invariabilmente diametralmente opposta ai loro analoghi occidentali: non hanno alcuna accortezza nel limitare il consumo dell'energia elettrica, proprio perché, per dirla con le parole di un fisico russo che me ne ha illustrato le caratteristiche in occasione di un incontro bilaterale con l'Italia «a quel tempo nessuno conteggiava il costo dell'energia elettrica». Analogamente, mentre molte delle soluzioni escogitate dagli astronomi prevedevano l'uso parsimonioso dei costosi rivelatori a infrarosso o escludevano l'impiego simultaneo di un grande numero di telescopi, queste stesse soluzioni non venivano certo scartate in un ambiente in cui, per dirla con la frase di uno dei tanti fisici e ingegneri incontrati nelle varie visite nei laboratori di ricerca destinati alla *Strategic Defense Initiative* (le guerre stellari, appunto) «la sicurezza nazionale non ha prezzo».

Nascono in questi anni (parliamo dell'ultimo decennio del secolo scorso) nuovi sensori di fronte d'onda, come quello a piramide, nuove tipologie di specchi deformabili di dimensioni mai viste sino a quel momento, e nuovi sistemi di compensazione dell'atmosfera a grande campo di vista. Queste tecniche non hanno eguali sul lato strategico, se non forse l'ultima per qualche potenziale applicazione su obiettivi in grande movimento angolare. Fatto sta che ben presto le guerre stellari sono abbandonate e, almeno per un periodo che sembra forse essere a un cambio di pagina, la diplomazia, con i suoi conseguenti trattati di non proliferazione di armi nucleari, ha dominato la scena (e fatto temporaneamente dimenticare l'orrore di una potenziale autodistruzione della nostra specie).

La propagazione di un fascio laser in cielo, poi, era stata teorizzata da due ingegnosi astronomi francesi, Renaud Foy e Antoine Labeyrie, non certo per danneggiare alcunché, ma per realizzare delle cosiddette 'stelle laser' artificiali. Si tratta infatti di eccitare uno strato di sodio che si colloca, naturalmente, a una altezza di circa 92 chilometri di quota, in modo da generare una sorgente artificiale, una specie di 'lampadina' creata artificialmente al di fuori della parte dell'atmosfera terrestre responsabile della stragrande maggioranza della turbolenza inflitta all'immagine di un astro lontano. Questa analogia nella propagazione di un fascio laser all'esterno della nostra atmosfera, per usi strettamente pacifici, ha richiesto uno sviluppo assai più lento di quanto inizialmente ci si aspettava. Su questo fronte in molti hanno pensato che diverse tecnologie militari non fossero state completamente declassificate.

Il maggior uso, per così dire, della 'forza bruta' da parte militare ha convinto me

e molti altri colleghi che, se ci sono tecnologie ancora non divulgate al pubblico civile, queste non contengano alcuna idea particolarmente efficiente. Diversi l'hanno pensata a lungo in modo differente.

L'ottica adattiva per usi astronomici mostra infatti immediatamente un'apparente limitazione. A parte i casi in cui si vogliono osservare con alta precisione i paraggi di una stella brillante (in cui si contempla il caso di grande interesse scientifico della ripresa diretta di pianeti extrasolari) normalmente l'astronomo, specie quello extragalattico, rivolge il suo sguardo verso regioni di cielo popolate da sorgenti estremamente deboli, proprio per rifuggire l'eventuale disturbo di insolenti stelle della nostra galassia che si frappongano tra l'osservatore e una qualche debole sorgente ai limiti dell'universo. Eclatante in questo senso sono i due cosiddetti *Hubble Deep Field*. Regioni di cielo sostanzialmente scevre di sorgenti evidenti per telescopi a terra che, osservate ripetutamente dall'Hubble Space Telescope con pose equivalenti di quasi 150 ore, hanno mostrato una grande varietà di sorgenti sostanzialmente tutte poste al di fuori della nostra galassia, la Via Lattea. Una simile osservazione sarebbe impossibile con un sistema convenzionale di ottica adattiva a terra utilizzando come riferimento una stella naturale, per la semplice mancanza di questa e per la piccolezza del cosiddetto campo isoplanatico, la regione angolare di cielo all'interno della quale la perturbazione della luce è coerente. Dal fatto che questo angolo sia molto piccolo discende un'osservazione fattibile anche a occhio nudo. È infatti facilmente verificabile che lo scintillio delle stelle non caratterizza la luce dei pianeti del sistema solare, quando questi sono visibili. La luce di Mercurio, Venere, Marte, Giove o Saturno, infatti, sottende un angolo impercettibile per la risoluzione dell'occhio umano, ma largamente superiore a quella dell'angolo isoplanatico descritto poc'anzi. L'insieme di tante porzioni del disco, sebbene impercettibile all'occhio umano, soggetto allo scintillio dell'atmosfera terrestre in tanti modi completamente indipendenti tra di loro, tendono a creare una compensazione tra gli stessi, rendendo la percezione complessiva come quella di una sorgente luminosa ben più stabile di quella delle singole stelle.

In questo contesto l'adozione di una stella artificiale, realizzata mediante un fascio laser, sembra essere la panacea, potendola utilizzare in qualsivoglia direzione. Essendo poi la luce laser assolutamente monocromatica, il rischio che questa luce possa 'inquinare' le osservazioni astronomiche risulta facilmente risolvibile usando nello strumento scientifico un filtro in grado di eliminare la sola lunghezza d'onda utilizzata dal laser. Altri problemi dovuti alla limitata distanza della sorgente sono risolvibili utilizzando un certo numero di sorgenti artificiali, portando a telescopi dotati di laser multipli, come oramai quotidianamente succede per alcuni tra i maggiori telescopi alle isole Hawaii, sulla cordigliera delle Ande o nel deserto dell'Arizona.

Tuttavia lo stesso fascio in salita del raggio laser è egualmente affetto dalla stessa turbolenza atmosferica rendendo la posizione assoluta di queste stelle artificiali assolutamente indeterminata. Questo problema, noto come problema della indeterminazione del 'tip-tilt' (il 'tip' e il 'tilt' indicano lo spostamento erratico sui due assi dell'immagine di una stella sul piano focale per effetto della turbolenza atmosferica) hanno prodotto, nel periodo attorno al cambio di millennio appena trascorso, una pletora di possibili soluzioni diverse da quella banale di utilizzare una qualche stella naturale di riferimento.

Poiché nessuna tecnologia militare declassificata comprendeva esplicitamente una qualche tecnica di misura assoluta del tip-tilt mediante sistemi laser, e forse dalla percezione dell'interesse che questi hanno mostrato per diverse delle tecnologie suggerite in ambito astronomico, diversi colleghi hanno pensato che non tutte le soluzioni escogitate in ambito militare siano state effettivamente divulgate.

Alcune di queste soluzioni, proposte in ambito francese, prevedevano l'utilizzo di una stella laser cosiddetta 'policromatica'. Con un certo grado di semplificazione il fascio laser in partenza è invero combinato da due colori leggermente differenti, in modo da consentire l'eccitazione di particolari transizioni nel sodio e, pur illuminando lo strato naturale a 92 chilometri con un fascio di colore sostanzialmente arancione, il fascio di ritorno comprende anche una piccola quantità di luce ultravioletta. In questo modo la simmetria perfetta tra il fascio di salita e quello di discesa viene spezzato ed è possibile, almeno in linea di principio, determinare il valore assoluto del tip-tilt dalla misura differenziale tra le due stelle artificiali così create. Oltre a quella tradizionale, per così dire, quella spostata verso il blu. La limitata trasparenza della nostra atmosfera alla luce ultravioletta (per la fortuna delle specie viventi che abitano il globo), la scarsa efficienza intrinseca della conversione da parte del sodio della luce arancione verso quella ultravioletta, e la delicatezza della misura hanno fatto sì che questa tecnica, sebbene sia stata portata avanti con convinzione pensando di avere azzeccato la soluzione 'segreta' dei 'colleghi con le stellette', non abbia portato a risultati apprezzabili, e sia stata abbandonata dopo diverso tempo (e molte energie e risorse impiegate lungo la strada).

Nel frattempo l'ottica adattiva prendeva una strada differente e riuscivamo a dimostrare, sebbene ancora indirettamente, che un sistema di correzione, che riesca a coprire un campo di vista significativamente maggiore del campo isoplanatico, sia possibile. Questo fu eseguito tentativamente col telescopio da 122 centimetri di Asiago, che in quest'anno compie 80 anni, ma le ridotte dimensioni del telescopio non hanno consentito di conseguire un risultato soddisfacente. Lo stesso esperimento eseguito al nuovo e ben più potente telescopio da 3,58 metri alle isole Canarie (il Telescopio Nazionale Galileo) riuscì perfettamente, fornendo i risultati di grande qualità che si attendevano. La piccola impresa ebbe un seguito fortunato: aprì la strada a una serie di sviluppi tecnologici e di nuova strumentazione che è tuttora *in fieri*, e si guadagnò (a posteriori, quindi, meritatamente) la copertina del primo fascicolo della rivista «Nature» del 2000. Nel giro di qualche anno, una volta stabilito che l'impresa fosse possibile, lo stesso acronimo 'MAD' veniva questa volta utilizzato per un progetto assolutamente pacifico: il cosiddetto *Multiconjugated Adaptive optics Demonstrator*. Una scelta (o meglio un 'furto') di acronimo ricco quindi di un certo simbolismo, sebbene certo per i pochi addetti ai lavori che avevano vissuto questo interessante periodo. Si trattava di un dimostratore tecnologico della cosiddetta ottica adattiva multiconiugata. La turbolenza veniva attaccata non solo su una superficie (quella dello specchio di raccolta del telescopio) ma nella sua distribuzione tridimensionale. In altre parole si può, istante per istante, non solo calcolare la deformazione della luce da parte della turbolenza, ma anche individuare a quale altezza questa veniva prodotta. Lo strumento, montato su uno dei grandi telescopi da 8.2 metri di diametro in Cile,

doveva, appunto, dimostrare la possibilità di compiere in cielo queste osservazioni e non era stato previsto raccogliesse delle vere osservazioni astronomiche.

Il risultato tecnico, che andò oltre le più rosee previsioni, convinse l'*establishment* dell'Osservatorio Europeo Australe a cambiare idea, e numerose furono le osservazioni eseguite con quello 'strumento' che non aveva mai guadagnato davvero i galloni per chiamarsi tale.

La prima copertina di «Nature» dell'anno 2000 in cui tre fasci venivano misurati in tre direzioni differenti e la turbolenza veniva calcolata in modo tridimensionale così da poterne prevedere il comportamento in ogni direzione, scavalcando per la prima volta il limite dell'angolo isoplanatico.

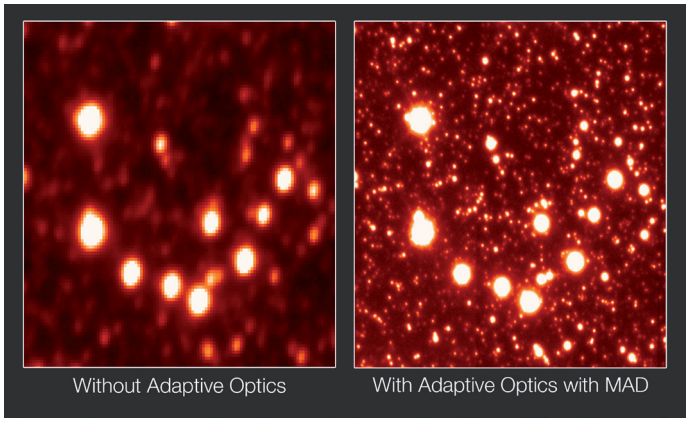
Questi risultati spalancarono la porta a una serie di strumenti sempre più sofisticati e contribuirono a dare credibilità ai nuovi telescopi della classe da 30 a 100 metri di diametro che prendevano forma in quel periodo e di cui attendiamo nei prossimi anni le 'prime luci' (ovvero l'inizio delle operazioni

Alcuni anni dopo la prova che la misura tramite differenti fasci di luce poteva ricostruire tridimensionalmente la turbolenza che sovrasta un osservatorio astronomico, nella sala di controllo sulle Ande Cilene del Very Large Telescope questo gruppo brindava al perfetto funzionamento di uno strumento che metteva in pratica questi principi e che portava l'acronimo di MAD. L'Autore è il secondo da sinistra.

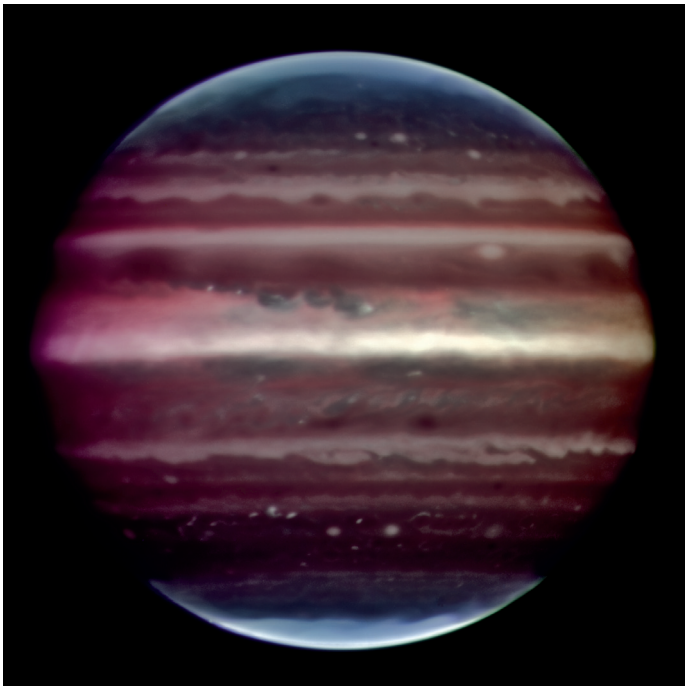
in cielo). Decretarono anche (almeno temporaneamente) la decadenza dell'importanza del problema del tip-tilt da parte delle stelle laser. Allargando il campo ben oltre l'esiguo angolo isoplanatico hanno permesso infatti di cercare una stella naturale in una platea di stelle ben maggiore. Unita allo sviluppo delle tecnologie nel campo dei rivelatori (che oramai si avvicinano grandemente al limite teorico del rumore nullo) e all'affermarsi dei nuovi sensori di fronte d'onda come quello a piramide, la ricerca di una stella naturale (ben più debole di quanto necessario un quarto di secolo addietro e su un campo di vista ben maggiore) si è trasformata da un'impresa impossibile in una probabilità ragionevole.

Naturalmente, con l'evolvere e l'affinarsi delle tecnologie, gli astronomi stanno spingendosi verso aperture e campi di vista sempre maggiori, e al contempo a lunghezze d'onda sempre più piccole, aggiungendo finalmente la banda del visibile a quella infrarossa, fino a un decennio orsono l'unica di elezione per sistemi adattivi. Un'interessante conseguenza di questo *trend* è un risvegliato interesse verso tecnologie di recupero del tip-tilt che erano state appena abbozzate e

che si potrebbero oggi dimostrare di grande interesse pratico. Tra queste, sembra destare il maggiore interesse quella in cui la simmetria tra il lancio del fascio in salita e in discesa viene 'rotto' in modo naturale semplicemente tenendo conto del tempo non nullo trascorso dalla luce nel doppio tragitto. Ammontando questo a circa un decimo di millisecondo, una misura accurata a questa frequenza di campionamento consentirebbe infatti di prolungare, in linea di principio in modo arbitrario, il tempo di integrazione per la misura del tip-tilt da una stella naturale. Senza quindi liberarsi dalla necessità di trovare una stella non artificiale nel campo di riferimento, ma consentendo di spingere il limite della sua luminosità verso valori tali per cui la probabilità di trovarne una raggiunge praticamente la certezza.



Un confronto diretto tra non solo la risoluzione ma anche la profondità raggiungibile con MAD.



Una delle immagini con maggiore risoluzione ottenute da MAD del disco del pianeta Giove.

Se questi esperimenti troveranno sviluppo e magari successo, potrebbero trattarsi degli ultimi echi di un'epoca che oggi sembra oramai relegata all'appannaggio della storia.

*Roberto Ragazzoni è professore ordinario di Astronomia e Astrofisica nell'Università di Padova, e socio corrispondente dell'Istituto Veneto di Scienze, Lettere ed Arti