

**В. Билиотти¹, Д. Боначчини¹, Г. Бруса¹, М. Каррабба², М. Сеччони³,
С. Эспозито⁴, М. Гатти⁵, Е. Маркетти⁶, Р. Рагацони⁶**

ПРИМЕРЫ РАЗВИТИЯ ОПТИКИ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ В ИТАЛИИ

Представлено краткое описание работ итальянских ученых в области оптики высокого разрешения – от моделирования датчиков волнового фронта до подсистем космических аппаратов. Результаты успешного лабораторного эксперимента по коррекции наклонов приводятся совместно с результатами модельных исследований прогнозируемой точности работы датчика волнового фронта Шак – Гартмана. Кроме того, представлены некоторые эксперименты в области звездной спекл-интерферометрии и проект сфазированного модуля для космического солнечного интерферометра.

1. Введение

В статье описываются проводимые в Италии работы по повышению углового разрешения изображений астрономических объектов.

Заинтересованность Италии в этой области вызвана ее участием в разработке проектов двух больших телескопов: телескопа «Галилей» (3,5-м активный телескоп, конструкция близка к конструкции NTT-ESO), который будет установлен в Ла Палма на Канарских островах, и Большого бинокулярного телескопа (ББТ) (телескоп с двумя апертурами, каждая по 8,4 м), устанавливаемого на Маунт Грахам в США.

Представленные здесь субпроекты иллюстрируют отдельные аспекты деятельности итальянских ученых, не описывая их полностью.

2. Первые результаты адаптивной компенсации наклонов с использованием лабораторного корректора

Мы представляем результаты лабораторных экспериментов, полученные в начале июня 1993 г. с использованием второго прототипа системы стабилизации изображения для астрономических наблюдений. Эти эксперименты являются частью комплекса исследований, проводимых группой адаптивной оптики Арцетри (Arcetri Adaptive Optics Group), целью которых является разработка и реализация Адаптивной оптической системы для 3,5-м телескопа «Галилей» и 8,4-м телескопа ББТ.

Основой прототипа системы является «быстрое» пьезокерамическое зеркало (Р.І.3) и датчик углов наклонов на четырех квадратных кремниевых фотодиодах. Вначале для проверки нашей системы в лабораторных условиях мы разработали «генератор изображения». Для того чтобы оценить статистические характеристики пространственного распределения флуктуаций коэффициента преломления, мы определили модуляционную передаточную функцию этого генератора, с использованием которой получили структурную функцию фазы, согласующуюся с моделью колмогоровской турбулентности. По нескольким измерениям временных флуктуаций смещения центра тяжести изображения была получена спектральная плотность мощности одномерного случайного движения изображения, совпадающая с теоретическими прогнозами (рис. 1).

После механической и электронной компенсаций передаточной функции для каждого из каналов системы с разомкнутой обратной связью, для того чтобы добиться соответствия с атмосферной спектральной плотностью мощности флуктуаций наклонов, мы замкнули обратную связь и провели на опытном стенде тестирование работы стабилизатора изображения с использованием нашего «генератора изображения». Результаты измерений функции размытия точки для длинной экспозиции приведены на рис. 2 для следующих случаев: компенсация отсутствует, компенсация дрожания изображения по одной из осей; для сопоставления приведе-

ны модельные результаты для одномерного случая. Параметры и результаты этого эксперимента представлены в табл. 1.

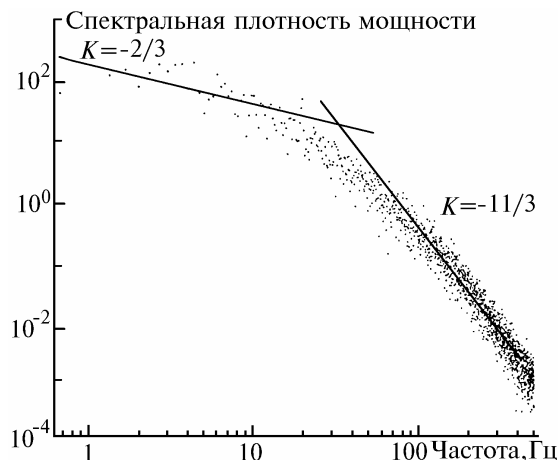


Рис. 1. Плотность мощности спектров для одномерного движения изображения

Т а б л и ц а 1

Параметры и результаты эксперимента по коррекции углов наклона (FWHM – ширина на половине максимума, SNR – отношение сигнал-шум)

Параметры	Результаты
Диаметр апертуры 1,5 см	FWHM (без коррекции) \approx 3,4 FWHM (дифр.)
$r_0 = 0,44$ см	FWHM (с коррекцией) \approx 1,7 (дифр.)
Усиление по постоянному току 60	FWHM (моделирование) \approx 1,5 (дифр.)
Частота 20 Гц	SNR (с коррекц.) / SNR (без коррекц.) \approx 1,5 (лабораторный эксперимент)
Время экспозиции 30 с	SNR (с коррекц.) / SNR (без коррекц.) \approx 2,0 (моделирование)

В ближайшем будущем будет выполнено улучшение датчика углов наклонов по двум аспектам: во-первых, датчик будет дополнен двумя лавинными фотодиодами, во-вторых, в сотрудничестве с группой Ф. Роддье (F. Roddier), 13-элементным датчиком кривизны волнового фронта.

3. Моделирование измерений волнового фронта датчиком Шак–Гартмана

Измерение волнового фронта – это важнейший этап работы как активных, так и адаптивных оптических систем. В результате моделирования датчика Шак–Гартмана и множества экспериментов, выполненных на оптическом стенде и телескопе, была написана комплексная компьютерная программа, детально описывающая работу датчика, включая допустимые отклонения, а также неточности, возникающие в процессе производства. На рис. 3 схематически изображена реальная конструкция датчика Шак–Гартмана.

Если в активной оптике необходимо точное определение формы волнового фронта, то в адаптивной оптике основное внимание должно быть обращено на скорость вычислений и снижение шума. Следуя этому простому рецепту, было выполнено большое количество численных экспериментов, в которых учитывались шумы, имеющие различные статистические характеристики, при этом для получения соответствия результатам измерения рассматривались различные алгоритмы решения. Внимание уделялось также процедуре обращения матрицы, зачастую плохо обусловленной, возникающей в процессе решения дифференциальных уравнений, описывающих работу датчика Шак–Гартмана.

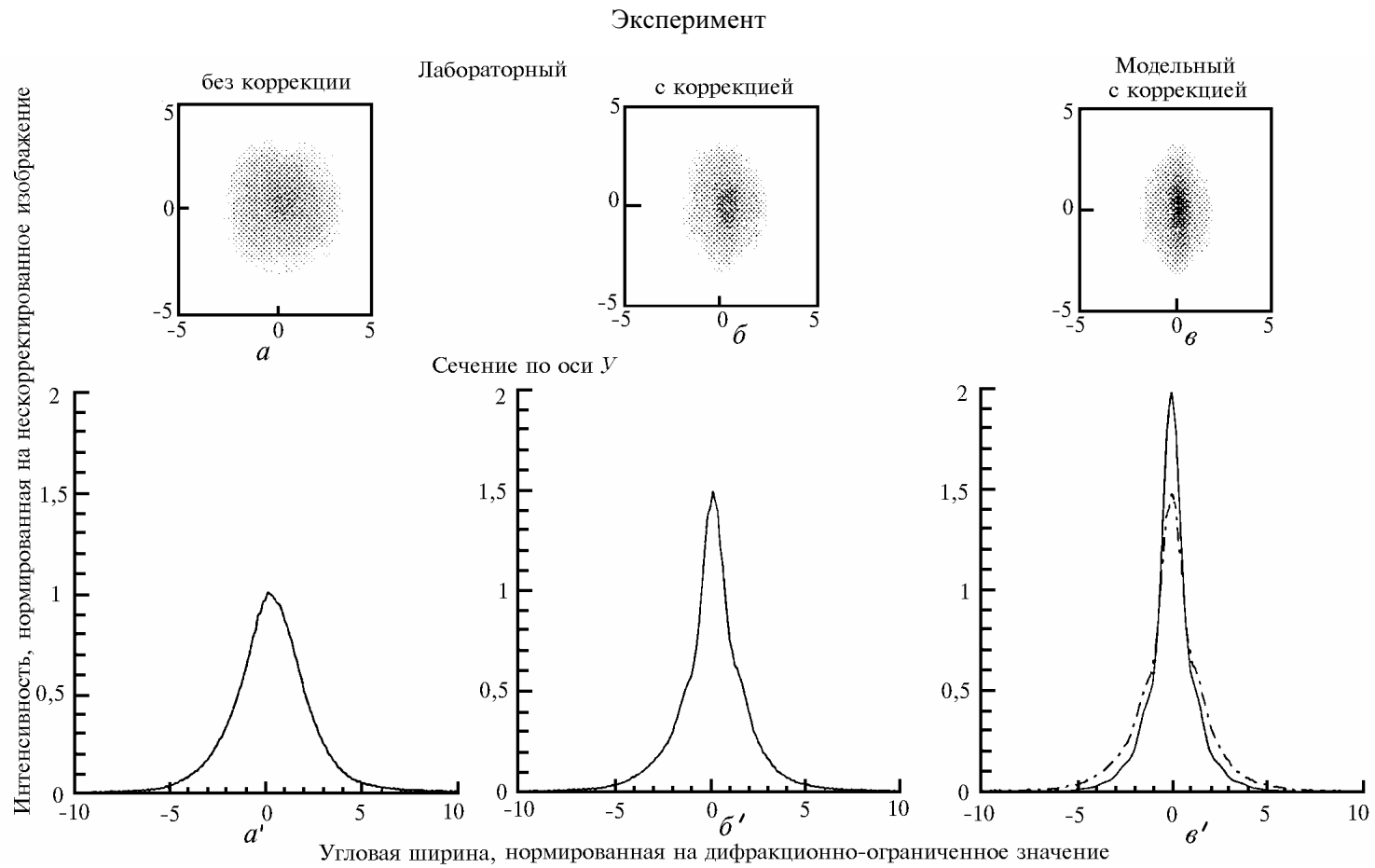


Рис. 2. Функции рассеяния точки, полученные с длинной экспозицией

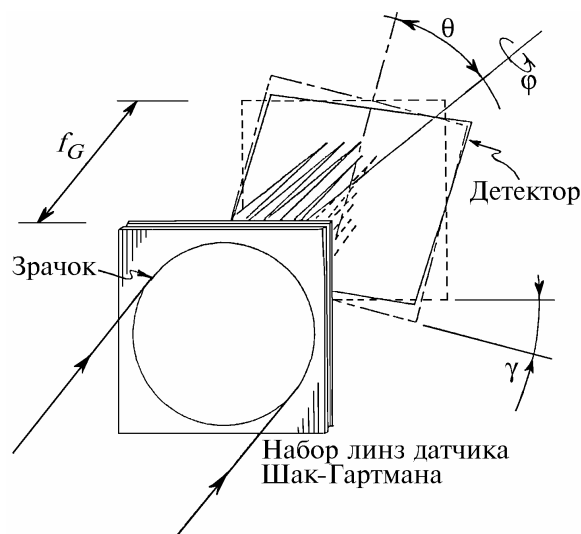


Рис. 3. Детально показанное размещение детектора относительно набора линз датчика Шак-Гартмана

4. Некоторые эксперименты в области спекл-интерферометрии

Эксперименты были выполнены на 122-см телескопе в Астрофизической обсерватории Асиаджо (Asiago) совместно с профессором С. Барбьери.

Используемая при наблюдениях спекл-камера включала систему оптического увеличения и телевизионную камеру однокаскадного усиления, регистрирующую изображения. Изображения, снимаемые с камеры, записывались на магнитную ленту обыкновенным видеомэгнитофоном. Несколько измерений было проведено с экземплярами отобранных двойных звезд, в которых пары находились на угловых расстояниях, меньших, чем одна угловая секунда. Калибровка для определения масштаба и ориентация поля зрения была выполнена по двум крупным двойным звездам. Ширина полосы пропускания использованного фильтра – 54,4 нм с центром на длине волны 589,5 нм. Время интегрирования составляло 40 мс и равнялось времени экспозиции кадра видеосистемой.

Изображения оцифровывались с помощью специализированного программного обеспечения для персональных компьютеров и видеотехники, разработанного компанией Фаст Электроник (Fast Electronic GmbH). Формат оцифровывания составлял около 256×256 пикселей с динамическим диапазоном в 8 бит (256 тонов серого цвета). Для каждого объекта было оцифровано большое количество последовательных кадров, считанных с магнитной ленты.

Обработка данных осуществлялась с использованием языка интерактивных данных (Interactive Data Language), разработанного компанией Ресерч Системс (Research Systems, Inc.). Был вычислен спектр мощности изображения объекта путем деления суммарного спектра мощности изображений объектов на передаточную функцию для опорной звезды. После преобразования Фурье спектра мощности мы получили автокорреляционную функцию для распределения интенсивности светимости объекта в плоскости изображения. С использованием этого метода получено оптическое разрешение трех близких двойных звезд: ξ UMa (рис. 4) 10 UMa и ϵ Nuа; характеристики этих систем приведены в табл. 2.

Двойные ϵ Nuа находятся на расстоянии, очень близком к дифракционному пределу телескопа (0,1"), поэтому полученные результаты показывают высокую эффективность работы системы. Большое различие между звездными величинами пары 10 UMa (Δm около 2,07) было серьезным тестом для установки, имеющей низкий динамический диапазон оцифровывания и ограниченную чувствительность камеры.

В табл. 3 приведены расстояния между звездами и координатные углы, полученные из автокорреляционных функций.

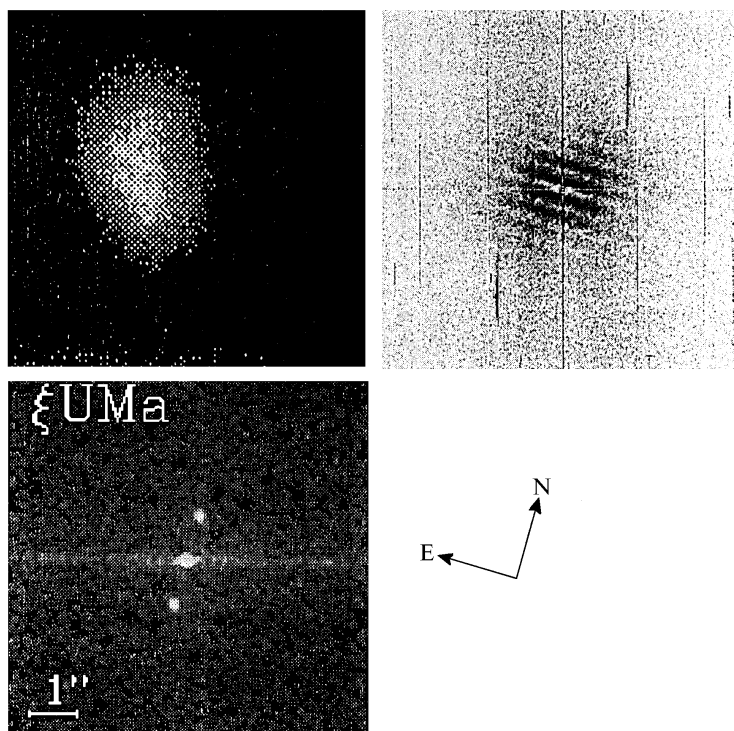


Рис. 4. Спеклограмма, спектр мощности и функция автокорреляции двойных звезд ξ Большой Медведицы

Таблица 2

Статистические параметры для трех разрешенных двойных звезд; последняя строка показывает степень наших знаний о параметрах орбит

Параметры	ϵ Ная	10 UMa	ξ UMa
Ссылка в каталоге	ADS 6993	DM+42° 1956	ADS 8119
Δm	0,9	2,07	0,5
Период, в годах	15,076	21,0850	59,840
a''	0,2520	0,6190	2,5300
e	0,690	0,150	0,414
i°	49,3	134,8	122,65
ω°	264,0	210,0	127,53
Ω°	109,3	22,8	101,59
Степень	1	2	1

Примечание к табл. 2: Δm – разница звездных величин; a'' – угловое расстояние между двумя звездами; e – эксцентриситет орбиты (0 – круговая орбита, 1 – параболическая); i° – склонение орбиты над лучами зрения (в град.); ω° – прямое восхождение; Ω° – угол параллакса (в град.).

Таблица 3

Угловое расстояние между парами звезд и угол позиции для ϵ Ная, 10 UMa, ξ UMa

Объект	Угловое расстояние между парами, угл. с	Угол позиции
ξ UMa	$0,88 \pm 0,02$	$355,5 \pm 1,5$
Эфемериды (1993.15)	0,86	356,38
10 UMa	$0,46 \pm 0,05$	$183,9 \pm 6,2$
Эфемериды (1993. 15)	0,52	192,04
ξ Ная	$0,20 \pm 0,05$	147 ± 14
Эфемериды (1993. 15)	0,21	128,55

5. Система фазирования для звездного интерферометра

Одним из критических факторов точной работы интерферометра является его сфазированность, т.е. активный контроль в реальном времени за выполнением условия

$$\Delta(OPX) \ll \lambda, \quad (1)$$

где Δ – означает конечные временные вариации, OPX – оптическая разность хода между каждой из пар телескопов в системе и λ – минимальная длина волны спектральной полосы детектируемого реального изображения. Фактически, если приведенное выше условие выполняется, то действительное изображение (представляющее собой интерференционную картину) будет заморожено в фокальной плоскости и затем развернуто для получения окончательного высокого пространственного (порядка 0,035 угл.с при $\lambda = 121$ нм) и временного (менее 1 с) разрешения изображения наблюдаемого объекта.

Система фазирования (СФ) многозеркального ультрафиолетового солнечного телескопа (в английской аббревиатуре MUST) концептуально подобна системе SUN (Солнечная ультрафиолетовая сеть), но под первичным зеркалом телескопа Ричи–Кретьена помещен цилиндр диаметром 300 мм и высотой 100 мм (рис. 5), который фокусирует пять пучков, приходящих от входного зрачка системы в центр 20 мм плоского зеркала (зеркало 16 на рис. 6). Точечная диафрагма диаметром 2 мм пропускает световой поток, соответствующий полю зрения (ПЗ) на небе в 30 угл.с в систему фокусировки, тогда как оставшаяся область ПЗ (корона в 30–300 угл.с) отражается по направлению СФ.

Набор линз 17, каждая диаметром 27 мм, представляющий совместно с рекомбинационным телескопом афокальную оптическую систему, коллимирует эти пять пучков. Затем они направляются плоским зеркалом 18, размерами 20×20×5 мм, на два ахроматических вращающихся клина 19, 20, что позволяет смещать область высокого контраста поля зрения по осям расположенной за ними оптической системы до телескопов предварительной настройки (моделирование распространения лучей в линзах и узле оптических клиньев было начато недавно). Набор линз 21, 22 фокусирует и направляет выделенную область поля зрения, составляющую около 30 угл.с на небольшое плоское зеркало 23 с набором точечных отверстий, которые являются достаточно широкими и пропускают часть поля зрения, соответствующую диску Эйри одного телескопа (приблизительно 0,25 угл.с при $\lambda = 121$ нм).

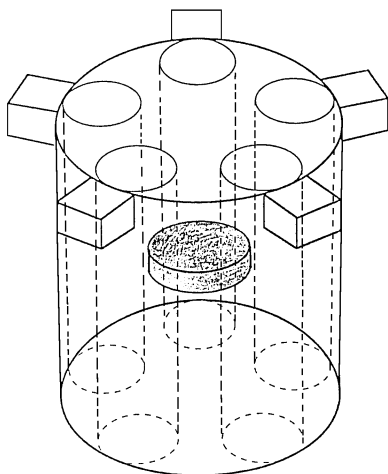


Рис. 5. Размещение системы фазирования в многозеркальном ультрафиолетовом солнечном телескопе

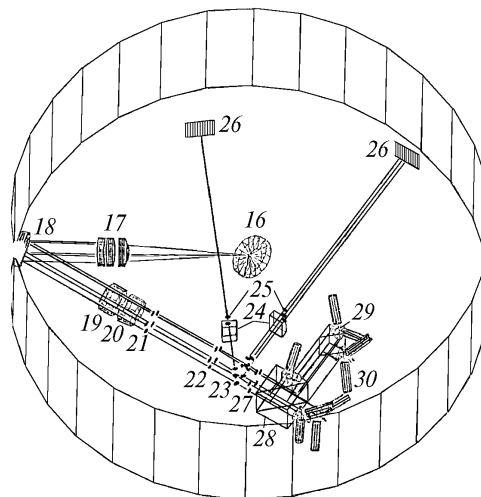


Рис. 6. Схематичное изображение системы фазирования многозеркального ультрафиолетового солнечного телескопа

Оставшаяся часть поля зрения (корона в 0,25–30 угл.с), разделяясь на два пучка, направляется для предварительного согласования на оптические элементы 24, 25, 26, один из пучков состоит из двух лучей, второй – из трех. Пучки попадают на детекторы, где поля зрения сравниваются между собой. Ожидается точность задания направления около 0,1 угл.с при наличии

описанной системы, посылающей корректирующие сигналы высокой точности на вторичное зеркало. С увеличением точности коррекции, повышающей контраст интерференционных полос в фокальной плоскости при фазировании системы, ожидается результирующая точность задания направления около 3 угл.мкс.

Пучок, прошедший точечные отверстия 23, повторно коллимируется набором линз 27 и, разделившись на призмах делителя 28, используется попарно в опорных интерферометрах 29, 30, где приборы синхронизированного детектирования позволяют выделить интерференционные полосы в белом свете. В небольшие цилиндры 30 помещены поляризационные пластины Брустера, увеличивающие контраст полос, и диоды на SiO, предназначенные для измерения светового потока. Выделение в реальном времени интерференционной картины белого света используется для генерации точных сигналов в линии задержки. В данной системе ожидается $\Delta(OPX) < \lambda/10$ для $\lambda = 121$ нм.

В настоящее время планируется лабораторный эксперимент по детектированию интерференционной картины в красном лазерном, а затем и в белом свете согласно схеме, представленной на рис. 7.

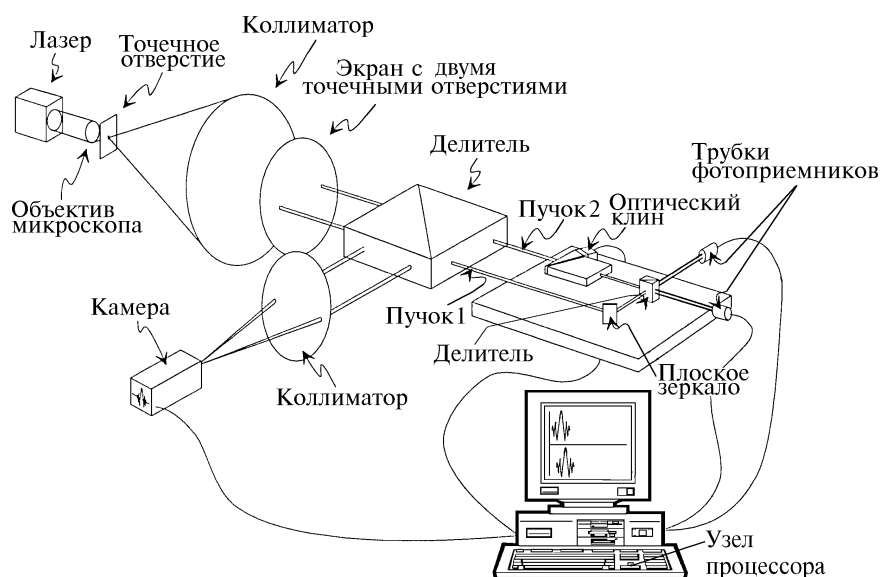


Рис. 7. Схема лабораторного эксперимента по детектированию интерферограммы двух лучей в красном лазерном (в будущем в белом) свете

Использование описанной установки предполагается на 120-см телескопе «Галилей» обсерватории Асиаджо. Результаты экспериментов будут представлены в последующих статьях.

^{1,4} Флоренция, ^{2,5}Болонья, ^{3,6} Падуа, Италия

Поступила в редакцию
13 декабря 1993 г.

V. Biliotti¹, D. Bonaccini¹, G. Brusa¹, M. Carrabba², M. Cecconi³, S. Esposito⁴, M. Gatti⁵, E. Marchetti⁶, R. Ragazzoni⁶. **An Italian Sample of High Resolution Optical Activities.**

Some italian works in the field of optical high resolution, running from wavefront sensor simulation to space subsystems, are here briefly presented. A successful tip-tilt correction achieved in laboratory is presented together with a simulation study of the expected performances of a Shack-Hartmann wavefront sensor. Furthermore some stellar speckle interferometry experience, and the design work of a cophasing module for a solar space interferometer are briefly given.