

3 Evoluzione Stellare e Struttura della Galassia

3.1 Proprietà fisico/chimiche delle polveri nel mezzo interstellare

Il problema della natura della polvere cosmica presente in diversi ambienti interstellari, quali il mezzo diffuso (ISM) e le nubi molecolari, è legato alla possibilità di interpretare le evidenze osservative attraverso uno schema evolutivo del materiale di tipo fisico-chimico. In questo contesto i grani a base di carbonio giocano un ruolo di rilievo. A causa della loro struttura intrinseca essi subiscono infatti significative trasformazioni nelle proprietà fisiche indotte da fattori ambientali come i campi di radiazione, i raggi cosmici o l'interazione col gas (idrogeno in primo luogo). A loro volta, le trasformazioni della natura della polvere cosmica possono influenzare la stessa evoluzione dell'ambiente spaziale dove essa è presente. La strategia posta in essere dai ricercatori dell'OAC include il trattamento delle caratteristiche chimiche e fisiche di grani di carbone quali l'interazione con atomi di idrogeno e la formazione di legami CH, considera le trasformazioni della struttura elettronica e l'interpretazione del *bump* interstellare, e valuta l'andamento dell'estinzione delle polveri in funzione della temperatura.

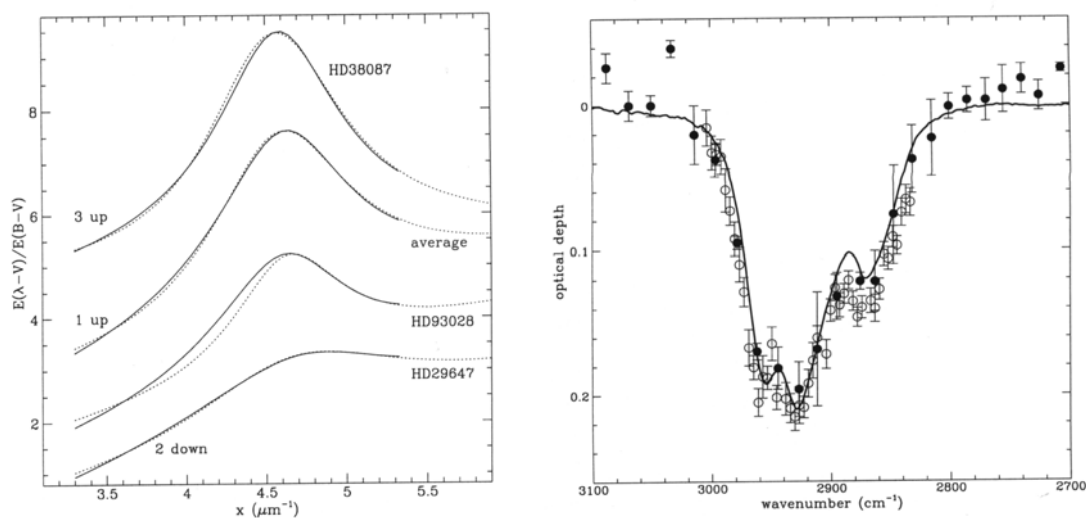


Figura 20: A sinistra, confronto tra le curve di estinzione interstellare (*linee tratteggiate*) e i profili ottenuti come combinazione di grani di carbone processati. A destra, banda C-H dei grani di carbone amorfo, prodotta per irraggiamento con idrogeno atomico (*linea continua*), confrontata con quella osservata in direzione del Centro Galattico - sorgente IRS 6E (*cerchi pieni* = bassa risoluzione, *cerchi vuoti* = alta risoluzione).

L'osservazione nell'ISM diffuso per mezzo di spettroscopia IR di legami C-H a $3.4 \mu\text{m}$ implica che debba essere attivo un meccanismo di re-idrogenazione dei grani di carbone. Si è mostrato, infatti, che i fotoni UV, dei quali è ricco l'ISM, riescono a rompere efficacemente i legami CH. Studi di laboratorio hanno provato che è possibile formare legami CH in grani di carbone se irraggiati con atomi di idrogeno. Si è visto che il processo di idrogenazione di grani di carbonio nei tempi scala delle nubi interstellari è il meccanismo responsabile della formazione di legami CH.

Attraverso l'indagine di laboratorio i ricercatori dell'OAC hanno proposto un nuovo approccio al problema del *bump* interstellare a 220 nm , che si basa sulla presenza di una classe di materiali a base di carbonio le cui proprietà ottiche e strutturali variano in accordo al grado di processamento subito nelle diverse regioni del mezzo interstellare. Si è mostrato, infatti, come le proprietà ottiche del materiale proposto e analizzato in laboratorio siano dipendenti dalla dose di irraggiamento UV subita. Combinando diverse popolazioni di grani con un diverso grado di processamento UV si sono potuti quindi riprodurre i profili del *bump* osservati in vari ambienti astronomici.

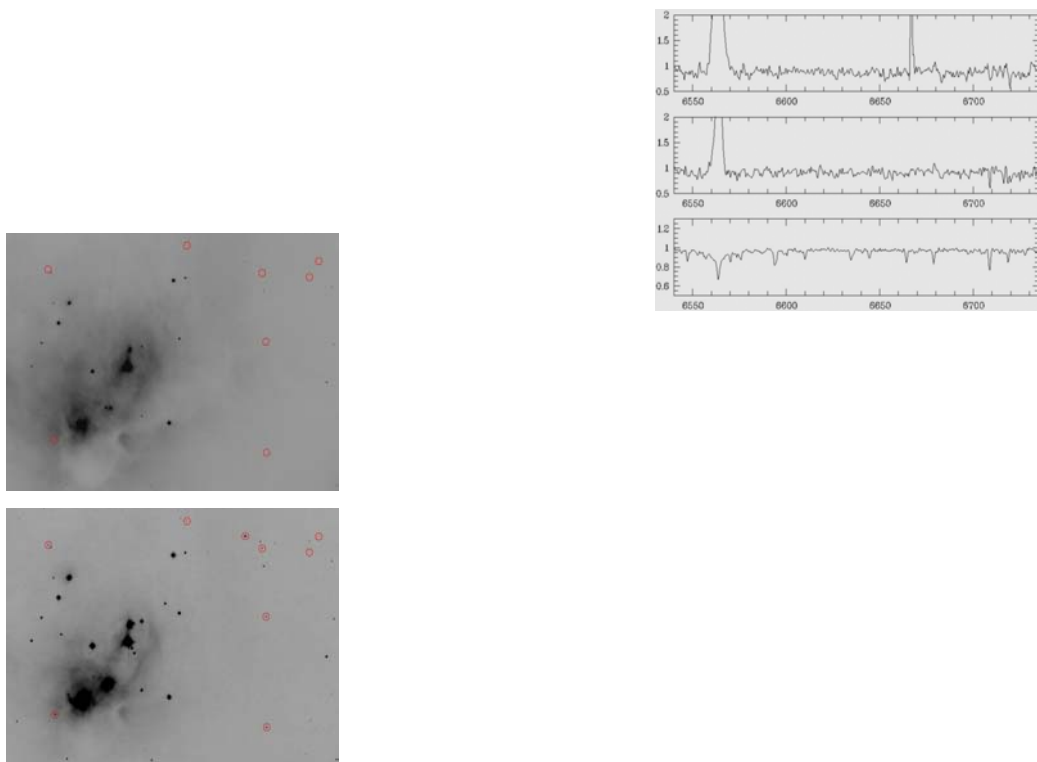


Figura 21: In alto, tricromia da immagini (circa $30' \times 30'$) della regione di formazione stellare NGC1788 nelle bande R, I e $H\alpha$, ottenute con il WFI al telescopio ESO-MPI di 2.2m. In basso a destra, diagramma colore-magnitudine delle sorgenti rivelate (le “x” indicano sorgenti ROSAT, i cerchi stelle T Tauri confermate spettroscopicamente, per tre delle quali gli spettri sono riportati nel riquadro). In basso a sinistra, dettaglio delle immagini nelle bande V (*sopra*) e I (*sotto*) dove sono marcati alcuni dei candidati Brown Dwarf giovani.

Un altro aspetto interessante riguardante la presenza di grani di polvere nel mezzo interstellare è lo studio delle variazioni con la temperatura dei coefficienti di assorbimento per unità di massa nel lontano infrarosso e a lunghezze d’onda millimetriche. I risultati ottenuti hanno mostrato una significativa dipendenza dalla temperatura; in particolare, l’assorbimento decresce al diminuire di que-

sta. I risultati sono stati utilizzati in una simulazione più realistica dell'emissione diffusa della polvere dell'ISM in accordo con i più recenti modelli di estinzione interstellare.

3.2 Popolazione stellare di pre-Sequenza (PMS) in regioni di formazione stellare vicine, funzione di massa iniziale e ricerca di brown dwarf giovani

L'attività svolta negli ultimi anni in OAC sulle stelle di pre-Main Sequence (PMS) e di piccola massa s'è incentrata sulla caratterizzazione della popolazione sparsa (per la maggior parte stelle di tipo weak-T Tauri = WTTS), scoperta sia all'interno che nell'intorno delle regioni di formazione stellare vicine ($d < 500$ pc) grazie a osservazioni X. L'individuazione di questa nuova popolazione di stelle giovani ha stimolato un vivace dibattito tra gli addetti ai lavori e ha permesso la selezione di campioni statisticamente significativi di stelle di PMS per studi sulla formazione stellare di oggetti di piccola massa su scala galattica e per la determinazione del numero di stelle per intervallo di massa, ovvero della funzione di massa iniziale (IMF), nelle regioni di formazione stellare, mediante *imaging* a grande campo e spettroscopia multioggetto, come mostrato in figura 21. Questi studi, poi, stanno accumulando un campione significativo di stelle binarie di tipo solare, per un esame dettagliato delle loro proprietà fondamentali.

Il gruppo stellare dell'OAC ha in animo di proseguire ed estendere questa ricerca attraverso la selezione di nuovi candidati di PMS di piccola massa, da stelle T Tauri a *brown dwarfs* (ovvero oggetti sub-stellari) giovani, in nuove regioni di formazione stellare caratterizzate dal gruppo dell'OAC (cfr. l'esempio in fig. 21) per la determinazione della IMF e della frequenza di dischi circumstellari in funzione della massa stellare. I principali criteri di selezione si basano su una forte emissione nei raggi X e nell'infrarosso, e su specifici indici fotometrici di colore, oltre che sulla classificazione spettrale. La presenza di intense righe in emissione, come la riga H α dell'idrogeno, e di un forte assorbimento nella riga del Litio neutro a 6708Å, primario indicatore di giovane età stellare, costituiscono altri criteri importanti.

I dati necessari saranno raccolti attraverso osservazioni nei raggi X, effettuate con telescopi orbitanti, misure nel vicino infrarosso e nell'ottico con l'impiego delle nuove tecniche di *imaging* a grande campo già disponibili (anche in vista di programmi osservativi da condurre nel prossimo futuro col telescopio VST), e con la spettroscopia multi-oggetto.

3.3 Fenomeni di attività in stelle di tipo solare dalla pre-Sequenza alla Sequenza Principale di età zero (ZAMS)

L'obiettivo principale del progetto è lo studio dell'attività in stelle di tipo spettrale simile, o più avanzato, del Sole, dalla PMS alla ZAMS. La rappresentazione classica delle atmosfere stellari è quella a "strati", che risale storicamente alla modellistica numerica piano-parallela per la formazione delle righe e del continuo. Il punto di vista alternativo è quello a "strutture", suggerito dagli studi a risoluzione spaziale medio-alta della superficie solare in diverse lunghezze d'onda. Nel primo caso è presente una fotosfera in equilibrio radiativo e strati più caldi (cromosfera e corona), mantenuti da processi di riscaldamento di tipo meccanico (generalmente di origine magnetica); nel secondo caso c'è ancora una fotosfera in profondità, ma la cromosfera è sostituita da differenti tipi di strati, dei quali alcuni più freddi persino della stessa fotosfera, altri riscaldati a temperatura più elevate da eventi di tipo shock.

Le osservazioni spettroscopiche ad alta risoluzione rappresentano un potente strumento per la raccolta di una grande quantità di dati sulla struttura delle atmosfere stellari magneticamente attive. Spettri sintetici, ottenuti tramite la modellistica numerica, possono essere confrontati con gli spettri osservati, così da fornire una diagnosi delle proprietà fisiche del plasma stellare. Da questo punto di vista lo studio del Sole e delle stelle di tipo solare sono complementari. Le osservazioni solari permettono di investigare ad elevata risoluzione spaziale e temporale una determinata stella in un certo stadio della sua evoluzione; quelle stellari offrono una prospettiva meno dettagliata ma più ampia, permettendo uno studio della dipendenza dal tempo dei fenomeni di attività, dalla fase di

pre-Sequenza Principale alla fase Sequenza Principale di Età Zero (ZAMS), e quindi dalle stelle PMS più attive e più giovani, le T Tauri classiche (CTTS), alle stelle meno attive e probabilmente meno giovani, weak-line stars (WTTS), fino alle stelle di Sequenza Principale di tipo solare, in ammassi giovani.

3.4 Studio della pulsazione in stelle di pre-Sequenza di massa intermedia

Durante la loro evoluzione verso la Sequenza Principale le stelle di pre-Sequenza (PMS) attraversano la striscia di instabilità: ciò suggerisce che almeno in parte l'intensa variabilità di questi oggetti possa essere dovuta a pulsazione. Fino al 1998 solo 3 candidati erano stati proposti in letteratura; essi servirono da stimolo al primo studio teorico, basato su modelli idrodinamici non lineari, che ha prodotto la striscia di instabilità teorica per stelle di PMS di massa intermedia. Da allora si è assistito ad un proliferare di lavori osservativi, volti alla ricerca della pulsazione in candidati di PMS localizzati all'interno o vicino ai bordi della striscia predetta.

Il gruppo dell'OAC che si occupa di queste tematiche ha dato un contributo rilevante, individuando 4 degli 11 candidati oggi noti in letteratura. Il lavoro non consiste solo nell'identificazione di nuovi candidati, ma anche nella analisi delle caratteristiche pulsazionali osservate alla luce delle predizioni dei modelli, col fine ultimo di vincolare i parametri intrinseci e il reale stato evolutivo di queste stelle. In figura 22 è riportata la posizione nel diagramma HR delle 11 variabili di tipo δ Scuti di PMS note, ricavata dal confronto tra le frequenze di oscillazione osservate e le predizioni di modelli di pulsazione. La regione ombreggiata indica la striscia di instabilità per i primi tre modi radiali di oscillazione mentre le linee sono le tracce evolutive di pre-Sequenza.

Sono in programma osservazioni di nuovi candidati e campagne internazionali verranno organizzate in un prossimo futuro. Dal lato teorico verrà investigato l'effetto di una variazione nella composizione chimica e sarà presa in esame la possibile coesistenza di modi non radiali.

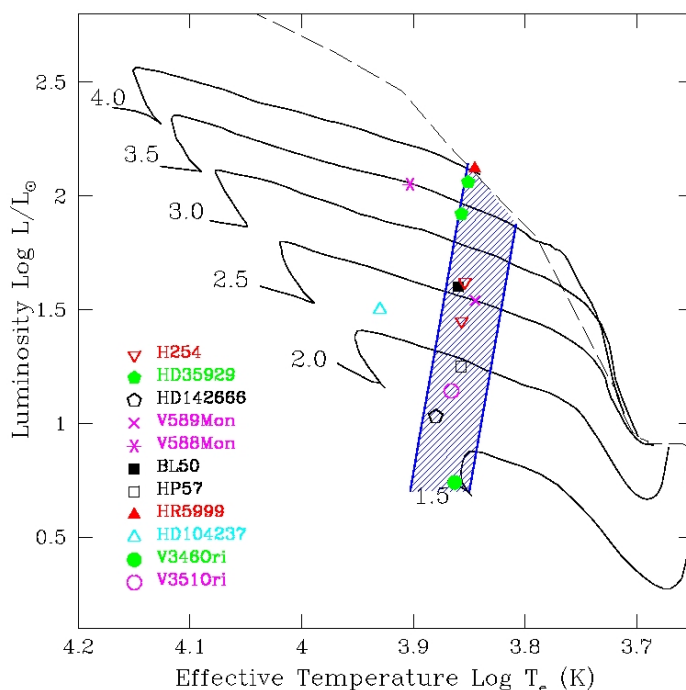


Figura 22: luogo nel diagramma HR delle 11 δ Scuti di PMS note. La regione ombreggiata indica la striscia di instabilità per i primi tre modi radiali di oscillazione; le linee sono le tracce evolutive di pre-Sequenza.

3.5 Studio di sistemi binari spettroscopici di pre-Sequenza

La verifica dei modelli teorici di evoluzione stellare si fonda sulle determinazioni dei parametri fisici fondamentali, che hanno uno dei loro cardini nello studio dei sistemi binari: uno studio che è tuttora particolarmente cruciale per le stelle appena formate, di massa paragonabile o minore a quella del Sole, a causa delle notevoli incertezze presenti nei modelli.

Le binarie spettroscopiche rappresentano il mezzo migliore per minimizzare le incertezze sperimentali, consentendo di porre dei vincoli ai modelli di evoluzione di PMS. Tuttavia, fino a pochi anni fa il numero di sistemi binari di PMS con elementi orbitali noti ammontava ad appena una ventina di oggetti. Questo numero è pressoché raddoppiato negli ultimi anni grazie all'alto numero di binarie spettroscopiche individuate tra le nuove WTTS-ROSAT nelle diverse regioni di formazione stellare studiate dal gruppo dell'OAC. Tra queste, il caso più rimarchevole è rappresentato dal

primo sistema binario ad eclisse costituito da stelle di PMS con masse di tipo solare, scoperta da un team di cui fanno parte ricercatori dell'OAC, che ha permesso un primo test osservativo delle tracce evolutive di PMS per stelle di massa solare (cfr. fig. 23).

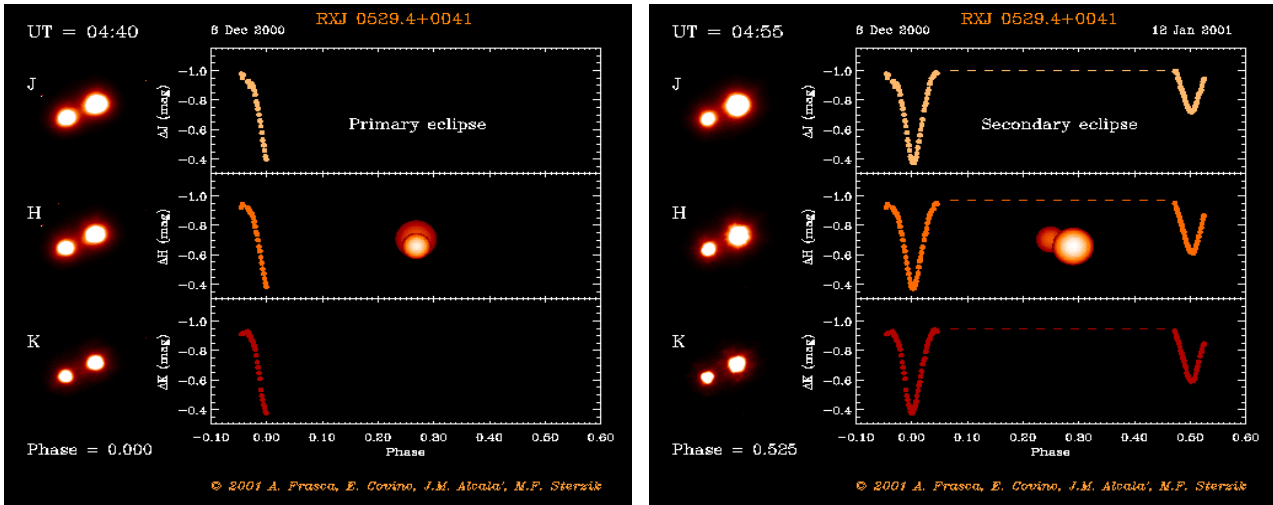


Figura 23: Immagini e curve di luce della binaria ad eclissi di PMS RXJ0529.4+0041, ottenute nelle bande J, H e K con il sistema di ottica adattiva ADONIS al telescopio ESO da 3.6m, rispettivamente al minimo principale (fase = 0) ed in prossimità del massimo di luce. Le variazioni di luce sono misurate relativamente alla compagna visuale (oggetto in basso a sinistra), che ha funto da stella di confronto. L'analisi dettagliata della curva di luce così ottenuta, congiuntamente a misure spettroscopiche del moto orbitale delle due componenti (velocità radiali) ha permesso di determinare non soltanto la massa di ciascuna stella, ma anche il raggio e la temperatura superficiale di ciascun astro e, dunque, la luminosità in modo del tutto indipendente dalla distanza.

La campagna osservativa è in corso: la spettroscopia è direttamente condotta dal gruppo OAC all'ESO (con oltre una ventina di notti già effettuate con FEROS al telescopio ESO da 1.5m di La Silla), mentre la fotometria è assicurata principalmente dal gruppo dell'Osservatorio Astronomico di Catania, con il telescopio da 0.9 m operante presso la stazione di Serra La Nave.

Lo sviluppo di questa ricerca e lo studio di questo tipo di sistemi rappresenta un punto centrale del programma per il prossimo futuro. L'obiettivo principale è di determinare parametri fondamentali per un campione rappresentativo di stelle di PMS di diverse masse ed età, necessari per verificare gli attuali modelli di evoluzione. I nuovi dati consentiranno anche di ampliare considerevolmente la statistica sugli elementi orbitali di questi sistemi e di approfondire la questione dell'evoluzione orbitale durante la fase di transizione dalla PMS alla MS.

3.6 Rotazione e attività nelle stelle di pre-Sequenza di piccola massa

Molteplici evidenze osservative indicano che l'attività magnetica nelle stelle di PMS di massa minore di 2 masse solari (T Tauri) è una manifestazione su scala amplificata dell'attività tipica delle stelle di Sequenza Principale. L'evidenza più forte di attività magnetica dovuta a un meccanismo di tipo dinamo nelle stelle T Tauri (TTS) è che esse sono sorgenti X molto intense (da 100 a 10-mila volte il livello solare) con emissione X variabile nel tempo.

I risultati di campagne di osservazione fotometriche, a diverse delle quali ha partecipato il gruppo OAC, suggeriscono l'esistenza di una dicotomia nei periodi di rotazione delle stelle di PMS intorno a 4 giorni e di una correlazione tra la presenza di un disco circumstellare e il periodo di rotazione, con periodi più lunghi per le stelle con disco. Tuttavia, le relazioni empiriche tra attività, età, massa, raggio e rotazione sono complesse, e il loro aggancio alla teoria della dinamo non è diretto. Inoltre, gli studi condotti finora su campioni diversi danno indicazioni contrastanti. Per diri-

mere l'attuale controversia è necessario disporre di campioni coevi di oggetti in opportuni intervalli di massa, ma è anche critico avere un'adeguata calibrazione delle tracce evolutive calcolate dai modelli teorici.

Lo studio della nuova popolazione di stelle di PMS identificate in diverse regioni di formazione stellare ci può consentire di disporre di campioni statisticamente significativi e di estendere le misure della rotazione e dei diagnostici di attività al fine di delineare un quadro meglio definito dell'evoluzione del momento angolare e delle sue connessioni con i fenomeni di attività magnetica e di depauperamento del litio durante la fase di PMS. A tale scopo, si prevede di utilizzare dati X congiuntamente al monitoraggio fotometrico e spettroscopico di campioni di oggetti in diverse regioni. Un esame preliminare è riportato in fig. 24.

E' opportuno infine sottolineare il grande interesse scientifico presente nella comunità internazionale per lo studio delle proprietà delle stelle attive di piccola massa, in particolare per le controparti stellari di sorgenti X, e ribadire il ruolo chiave della spettroscopia ad alta risoluzione. Difatti, in risposta ad un recente "call for ideas" nell'ambito dei programmi di survey ESO, è stato proposto di condurre una grande survey spettroscopica sulle stelle attive dell'emisfero Sud, utilizzando lo spettrografo FEROS al telescopio ESO da 2.2m. Tale programma è volto all'identificazione spettroscopica di un vasto campione di stelle attive basato sulla correlazione del catalogo di sorgenti X della ROSAT All-Sky Survey (RASS) con il catalogo astrometrico Tycho-2, che produrrebbe il più ampio campione spazialmente completo di stelle attive nelle vicinanze solari (circa 20-mila oggetti). E' in progetto la costituzione di un consorzio di gruppi di ricerca europei, tra cui l'OAC, e l'avvio di una trattativa con ESO per l'utilizzo del telescopio da 2.2m per i prossimi due anni.

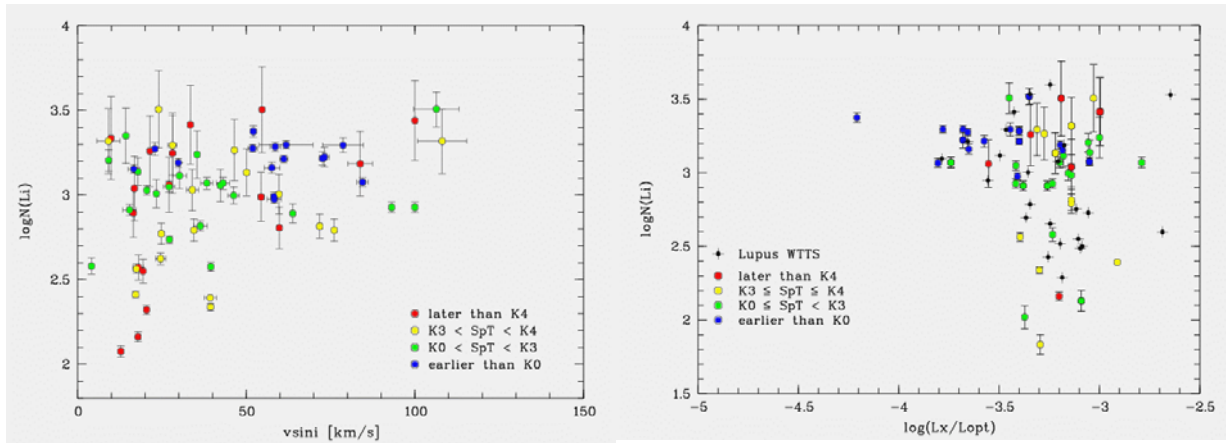


Figura 24: *Destra*: diagramma di abbondanza di Litio in funzione dell'indicatore di attività L_x/L_{opt} . I tipi spettrali più avanzati sono più vicini al limite di saturazione $\log(L_x/L_{\text{opt}}) = -3.1$ e presentano una maggiore dispersione nell'abbondanza di Litio. L'età stimata di questo campione è inferiore a 10 milioni di anni. *Sinistra*, diagramma di abbondanza di Litio in funzione della velocità di rotazione per un campione di stelle giovani scoperte sulla base della loro attività X, nella regione generale di Orione. I tipi spettrali più avanzati, tra i quali vi sono i rotatori più lenti, mostrano una dispersione più alta dell'abbondanza di Litio.

3.7 Pulsazioni in nane bianche (WDs) e subnane calde B (sdBs)

Le nane bianche costituiscono, dopo il Sole, la classe di stelle più studiate da un punto di vista sismologico. Solo per esse è stato possibile identificare, in alcuni casi, i vari modi di pulsazione e quindi, dal confronto coi modelli, misurare importanti parametri stellari quali rotazione, massa, massa delle *shell* esterne di H e/o di He, campi magnetici, e anche luminosità e distanze. Recentemente è stata anche scoperta una nuova classe di stelle pulsanti, le variabili sdB (sdBV), con carat-

teristiche molto simili a quelle delle WD pulsanti: periodi di pulsazione brevi, dell'ordine dei minuti, e ampiezze piccole (qualche percento).

Lo studio delle pulsazioni nelle sdBV ha aperto una nuova prospettiva all'indagine sulla struttura di questi oggetti, con importanti implicazioni per quanto attiene la conoscenza della loro evoluzione, sulla quale esistono alcune importanti questioni aperte. In particolare non è ancora chiara l'origine di questi oggetti: se siano il prodotto di stelle singole con perdita di massa particolarmente elevata o se provengano da sistemi binari interagenti.

Il progetto dei ricercatori OAC riguardante le WD e sdB pulsanti si articola in tre sezioni:

1. *Pulsatori sdB*: da circa tre anni è attiva una collaborazione internazionale per la ricerca di nuove sdBV, che ha portato finora alla scoperta di 10 nuovi pulsatori. Al momento è in atto un programma di monitoraggio fotometrico della sdB pulsante HS2201+2610, che coinvolge vari Osservatori: Beijing, Moletai, Wendelstein, Loiano, Tenerife, Fich (Iowa), SARA (Kitt Peak), Calar Alto, NOT. Lo scopo principale di questo programma è di stimare la variazione secolare dei periodi di pulsazione, in quanto misura diretta della modifica della struttura interna della stella e, dunque, dei suoi tempi evolutivi. I primi risultati di questo lavoro mostrano che una misura della variazione secolare dei periodi di pulsazione (o almeno un limite superiore) può essere ottenuta in 3-4 anni di monitoring fotometrico.

2. *Pulsatori WD-sdB per COROT*: l'obiettivo è di verificare se, nei campi di COROT (satellite per l'astrosimologia), esistano delle nane bianche o subnane B pulsanti, per studiarne in estremo dettaglio le proprietà pulsazionali. Siccome nessuna delle pulsanti note di queste classi cade nei campi di COROT, il primo passo di questo lavoro consiste nel selezionare degli oggetti prossimi alle fasce d'instabilità, e verificare la loro stabilità pulsazionale tramite "ground-based time-series photometry".

3. *Campagna WET*: il Whole Earth Telescope (WET, vedi anche <http://wet.iitap.iastate.edu/>) è un network internazionale di telescopi di classe 1-2 m situati a varie longitudini, con i quali si realizzano campagne intensive di "time-series photometry" per lo studio dettagliato degli spettri di potenza di oggetti con variazioni multiperiodiche rapide (periodi tipici dell'ordine dei minuti), quali WD, sdB, ma anche variabili cataclismiche e altri oggetti. L'accuratezza in frequenza che si raggiunge con campagne della durata tipica di 2 settimane è dell'ordine di 1 μ Hz. A queste campagne si pensa di partecipare anche nei prossimi anni utilizzando il fotometro fotoelettrico TTCP del telescopio TT1 (vedi <http://www.na.astro.it/~silvotti/TTCP.html>), che si trova attualmente a Loiano in attesa di essere trasportato al Toppo di Castelgrande non appena il telescopio sarà operativo.

3.8 Processi di accrescimento ed emissione nelle Variabili Cataclismiche

L'attività si sviluppa su diverse problematiche riguardanti i sistemi binari cataclismici; in particolare vengono qui citate quelle di maggior rilievo internazionale:

- processi di accrescimento, con particolare enfasi sulle condizioni di formazione di accrescimento e/o di complesse geometrie di accrescimento, così come processi non standard in presenza di campi magnetici;
- studio dell'emissione X con particolare enfasi sulla variabilità (periodica e non) e sue caratteristiche spettrali;
- studio dell'emissione UV, ottica e nel vicino IR, e delle loro variabilità periodiche e non, al fine di *i)* individuare effetti di riscaldamento (X e di ciclotrone) determinando le condizioni fisiche delle regioni di accrescimento, nonché di regioni localizzate delle atmosfere delle stelle componenti ed i conseguenti bilanci energetici delle emissioni primarie e secondarie; *ii)* determinare le emissioni intrinseche delle stelle componenti e di conseguenza misurare i loro parametri fondamentali, con particolare enfasi sugli effetti dell'accrescimento sullo stadio evolutivo; *iii)* studiare i fenomeni di variabilità non periodica nei tassi di perdita di massa e di accrescimento, i processi di attività dinamo-magnetica e loro relazione con rotazione nelle stelle secondarie di tardo tipo spettrale;
- ricerca di sistemi di popolazione di disco e di alone in survey (X ed ottiche) e studio delle loro proprietà.

Le ricerche, concentrate soprattutto sull'aspetto osservativo, si avvalgono di programmi coordinati X, UV ed ottici di rilievo internazionale. In particolare, per le osservazioni in X vengono utilizzati satelliti come BeppoSAX, RXTE e, nel futuro, Chandra e XMM; per quelle nella banda UV l'HST, e nell'ottico e nel NIR i telescopi di Loiano, ESO, SAAO, CFHT, OHP. Sono da menzionare le attività di supporto a progetti futuri come XEUS, per la verifica di strumentazione di "fast timing", ed i coinvolgimenti in COROT e EDDINGTON per la ricerca di variabilità periodiche nell'ottico, in WSO/UV e UVISS, per lo studio UV della variabilità spettrale.

3.9 Satellite COROT per l'astrosismologia

Nell'ambito dei progetti scientifici che sarà possibile realizzare con il satellite COROT per l'astrosismologia, che sarà lanciato nel 2004, alcuni ricercatori OAC hanno individuato due linee di ricerca originali: *a)* lo studio di stelle δ Scuti di pre-Sequenza, e *b)* lo studio di variabili cataclismiche (CV)

Per quanto concerne il primo punto, il problema principale consiste nel caratterizzare eventuali δ Scuti di pre-Sequenza nei campi che saranno osservati da COROT. Per questo scopo gli sforzi sono rivolti sia all'analisi temporale di oggetti di pre-Sequenza già noti, sia all'individuazione di nuovi candidati. Per quanto attiene il secondo punto, è stato proposto di osservare con COROT la *dwarf nova* CW Mon, il che consentirebbe un'analisi temporale estremamente dettagliata di questo sistema con importanti implicazioni sugli studi evolutivi delle CV in genere.

3.10 Variabili pulsanti e popolazioni stellari in ammassi galattici ed in galassie del Gruppo Locale

Lo studio di ammassi giovani e di stelle di campo nelle Nubi di Magellano ha rivelato che:

- i)* la popolazione di campo antica nelle due Nubi ha una metallicità inferiore al valore normalmente adottato;
- ii)* gli eventi di formazione stellare nel recente passato non sono stati gli stessi in differenti regioni, sia per LMC che per SMC. Ulteriori osservazioni a grande campo verranno analizzate per confermare questi risultati.

Per quanto riguarda le variabili RR Lyrae negli ammassi globulari NGC 3201, appartenente alla Galassia, e Reticulum in LMC, lo studio delle proprietà pulsazionali di queste variabili permette di porre vincoli sulla distanza (e quindi sull'età) di questi oggetti. Notiamo che il caso di Reticulum è particolarmente importante poiché la distanza di LMC è la base della scala delle distanze extragalattiche.

Lo studio delle proprietà pulsazionali delle variabili RR Lyrae e delle Cefeidi anomale nella galassia nana Carina permetterà, per confronto con le predizioni di nuovi modelli pulsazionali calcolati dal gruppo dell'OAC, di porre vincoli stringenti sulle popolazioni stellari a cui appartengono (componente vecchia le RR Lyrae, componente intermedia le Cefeidi anomale). La figura 25 mostra le curve di luce delle RR Lyrae osservate nella galassia Carina.

Per il futuro appare necessario:

- a)* continuare lo studio di RR Lyrae in ammassi globulari galattici ed estendere l'analisi (mediante osservazioni a grande campo) alle popolazioni di variabili in galassie vicine,
- b)* estendere, anche tramite l'uso di VST, il tipo di ricerche effettuate su Carina ad altre galassie sferoidali nane del Gruppo Locale, e
- c)* perfezionare lo scenario teorico pulsazionale per le Cefeidi anomale, le SX Phoenicis e le Cefeidi di Pop. II.

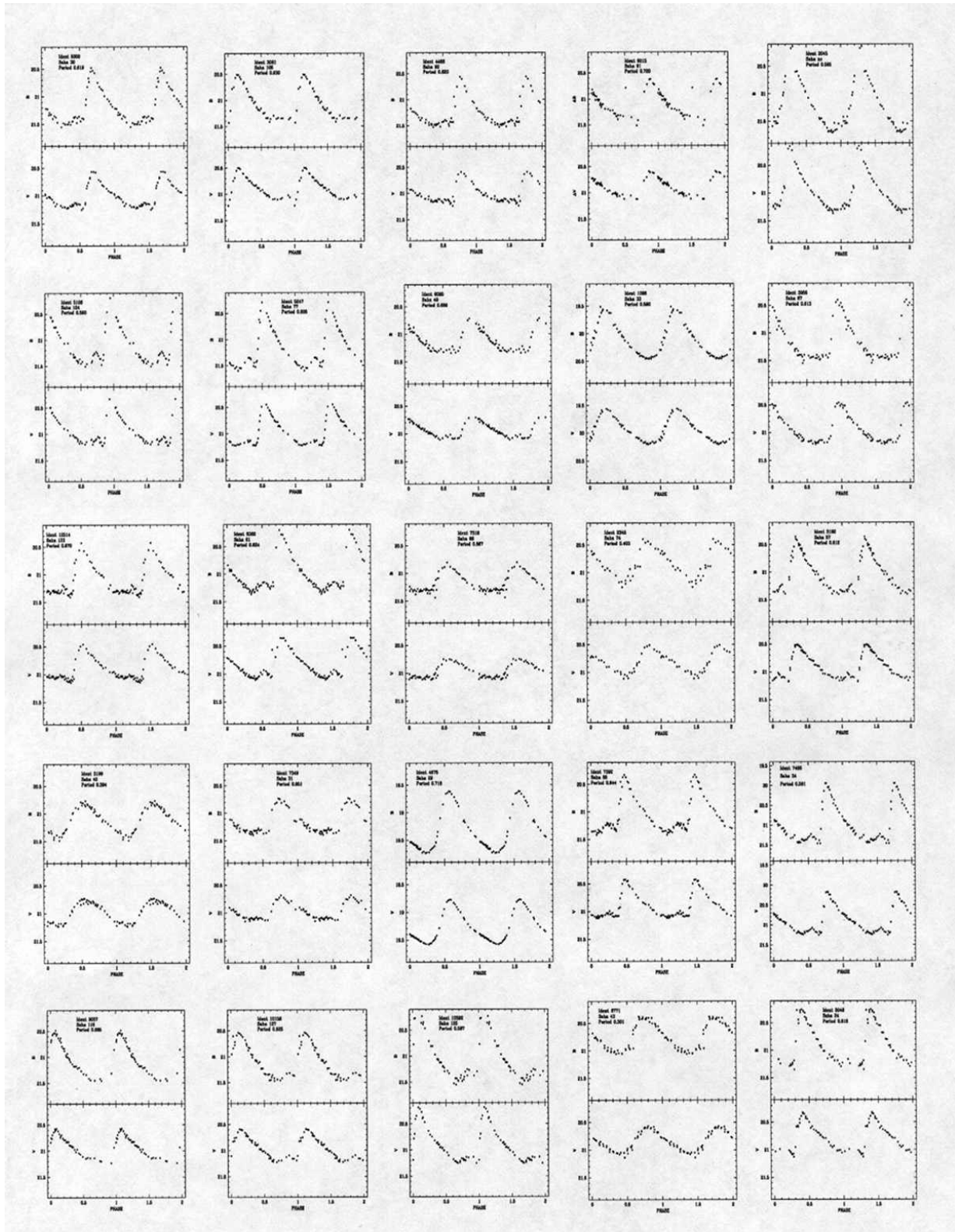


Figura 25: curve di luce delle RR Lyrae osservate nella galassia Carina.

3.11 Variabili pulsanti e scala delle distanze

Un gruppo di ricercatori OAC è impegnato sia nell'analisi teorica che nelle osservazioni delle proprietà di oscillazione delle RR Lyrae e delle Cefei classiche col fine di ricavare informazioni sui parametri intrinseci e in particolare sulla luminosità, e quindi sulla distanza, di queste variabili.

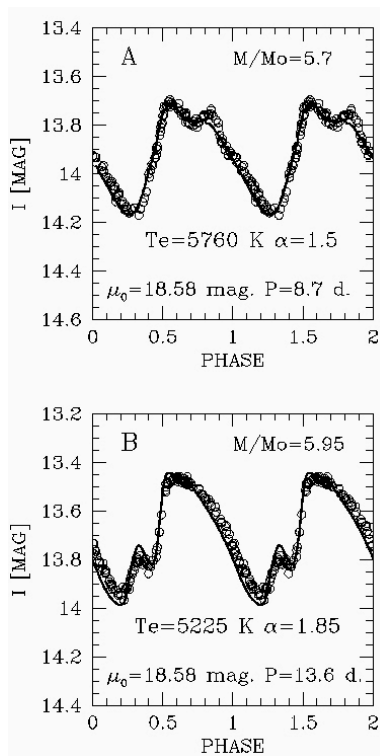


Figura 26: fit con curve teoriche delle curve di luce osservate per due Cefeidi nella Grande Nube di Magellano.

I principali risultati ottenuti riguardano: *a)* la ricalibrazione teorica della scala delle distanze extragalattiche utilizzando le predizioni di modelli di Cefeidi classiche, e la stima dell'effetto sulla costante di Hubble; *b)* la costruzione di metodi pulsazionali per ricavare la distanza di campioni di RR Lyrae appartenenti sia alla Galassia che a galassie vicine del Gruppo Locale, utilizzando i risultati di modelli idrodinamici al variare della massa e della composizione chimica; *c)* il fit delle curve di luce osservate sia per Cefeidi che per RR Lyrae con curve teoriche in grado di riprodurre accuratamente le caratteristiche morfologiche delle variazioni luminose e il periodo di oscillazione, fornendo una stima diretta della luminosità intrinseca e, quindi, della distanza. In figura 26 è mostrato il fit per due Cefeidi nella Grande Nube di Magellano

Dal punto di vista osservativo sono in corso l'analisi delle Cefeidi della galassia IC1613 e uno studio nel vicino infrarosso (dati VLT) delle popolazioni di Cefeidi in galassie vicine. Dal lato teorico il gruppo OAC è impegnato in un raffinamento delle griglie dei modelli di Cefeidi ed RR Lyrae e nella costruzione di modelli per altre categorie di variabili.

Per il prossimo futuro si prevede: *i)* la costruzione di relazioni PL e PLC sintetiche per le Cefeidi, che tengano conto sia delle previsioni evolutive che di quelle pulsazionali; *ii)* l'utilizzo della scala di distanza predetta per le Cefeidi classiche per vincolare indicatori secondari (ad esempio è in corso una collaborazione per la calibrazione delle Supernovae di tipo Ia); *iii)* l'applicazione della scala di distanza predetta dalle RR Lyrae e da altre variabili di Pop. II per stimare le distanze di ammassi globulari e galassie del Gruppo Locale.

3.12 Supernovae

Lo studio delle supernovae ha implicazioni fondamentali in molti campi della moderna astrofisica, dall'evoluzione stellare all'evoluzione chimica delle galassie, dalla fisica degli oggetti collassati (stelle a neutroni e buchi neri), alle fasi del mezzo interstellare. Inoltre, le supernovae sono laboratori naturali per molti fenomeni fisici fondamentali come l'emissione di neutrini, onde gravitazionali, raggi cosmici etc. Se a questo si aggiunge il ruolo fondamentale delle supernovae come indicatori di distanza su scala cosmologica, si capisce il grande interesse che c'è per questi oggetti. L'obiettivo dei ricercatori OAC è sfruttare i nuovi telescopi che sono in costruzione all'Osservatorio sia per il monitoraggio di SNe vicine (TT1) che

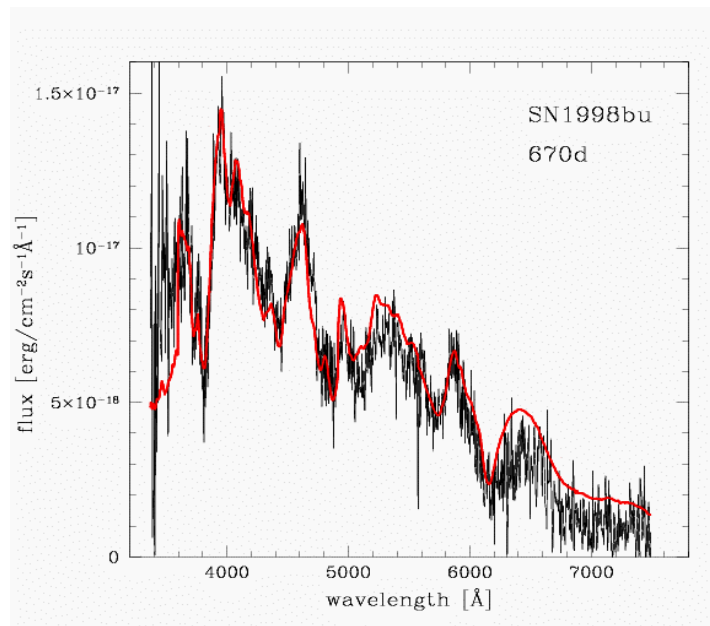


Figura 27: spettro osservato (nero) della supernova SN1998bu due anni dopo il massimo, confrontato con il risultato del modello dell'evoluzione della luminosità al massimo in presenza di un eco.

per lo ricerca di eventi a *redshift* intermedi (VST). Questa attività sarà coordinata sia a livello nazionale che europeo nell'ambito di un Research Training Network in fase di attivazione.

Come esempio delle varietà di tematiche che si presentano nello studio delle supernovae - e tra i nostri risultati recenti più inaspettati - è la scoperta dell'eco di luce della SN1998bu esplosa nella vicina galassia M96. Inizialmente questa SN appariva come una normale SN Ia. Due anni dopo l'esplosione però, lo spettro (*linea nera* in figura 27) appariva completamente diverso da quello aspettato a questa fase, e anche la curva di luce mostrava una deviazione dal declino normale. Si è capito che a queste fasi l'emissione osservata è dominata dall'eco, da parte di una nube di polvere, della luce emessa quando la SN era al massimo della luminosità. Si può dimostrare che la luminosità dell'eco varia col tempo molto più lentamente che la luminosità intrinseca della SN e diventa quindi dominante quando quest'ultima diventa molto debole.

Se, come in questo caso, si ha una stima indipendente della profondità ottica della polvere ($A_V = 0.86$ mag), dalla luminosità dell'eco possiamo dedurre la distanza dello strato di polvere dalla SN (230 anni luce). Con questi parametri si è calcolato lo spettro aspettato dell'eco che risulta una media pesata dell'evoluzione spettrale della SN vicina al massimo (*linea rossa* in fig. 27).

La straordinaria somiglianza dello spettro aspettato e di quello osservato è la miglior conferma della validità del modello. A questo punto si è anche potuta fare una previsione sull'evoluzione del diametro dell'eco, che è stata confermata da osservazioni con HST. Oltre che per il caso scientifico in sé, lo studio dell'eco delle SNe può essere utilizzato per una stima geometrica diretta della distanza della galassia oltre che fornire delle indicazioni sulla popolazione a cui appartiene il progenitore.

3.13 Popolazioni stellari: ammassi stellari; la Galassia; le galassie del Gruppo Locale

Un gruppo di ricercatori dell'OAC è impegnato in un progetto dedicato allo studio delle popolazioni stellari e delle stelle variabili in ambienti sia galattici che extragalattici, e all'interpretazione dei comportamenti osservati alla luce delle predizioni di accurati modelli di evoluzione e pulsazione stellare. Dai confronti teoria-osservazioni è infatti possibile ricavare informazioni di cruciale importanza sia per il problema della storia di formazione ed evoluzione delle galassie che per il problema della scala delle distanze cosmiche. I principali problemi affrontati dal gruppo OAC sono:

- variabili pulsanti e scala delle distanze;
- popolazioni stellari nella Galassia e in galassie vicine;
- popolazioni di disco e di alone di nane bianche galattiche

Con riferimento al primo, la figura 28 mostra i valori della costante di Hubble dedotti dalla luminosità al massimo delle Supernovae di tipo Ia (SNIa) calibrata con la scala di distanza delle Cefeidi classiche predetta dai modelli di pulsazione costruiti dal gruppo. Raffinamenti di questa calibrazione teorica sono attesi dal calcolo di un griglia più dettagliato di modelli e da una verifica più dettagliata dei dati delle supernovae.

Per quanto riguarda il secondo punto, sono già stati ottenuti importanti risultati per quanto riguarda lo studio dei diagrammi colore-magnitudine e delle popolazioni di variabili nella Via Lattea (sia nel campo che in ammassi) e in

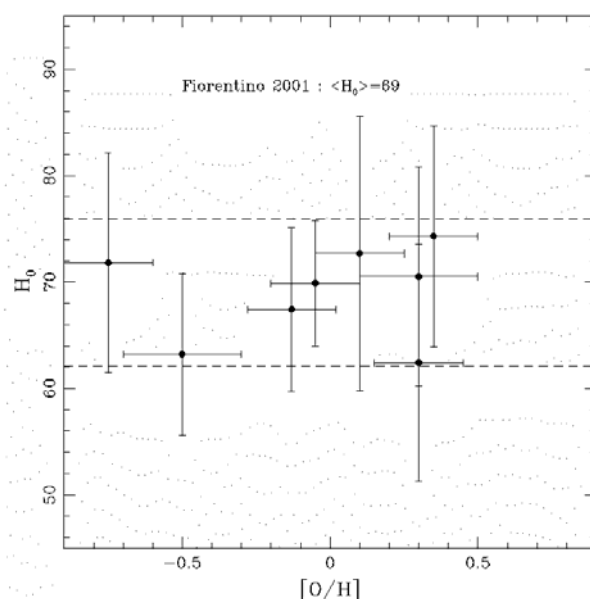


Figura 28: valori della costante di Hubble dedotti dalla luminosità al massimo delle Supernovae di tipo Ia, calibrata con la scala di distanza delle Cefeidi classiche predetta dai modelli di pulsazione costruiti dal gruppo dell'OAC.

galassie sferoidali nane e nuovi risultati sono attesi dall'aggiornamento dello scenario teorico sia evolutivo che pulsazionale e dal crescente numero di progetti osservativi dedicati.

Per quanto riguarda il terzo punto è stata fatta una selezione di candidati di nane bianche tramite i diagrammi colore-colore dai dati a grande campo del Capodimonte Deep Field (cfr. par. 5.13).

Sono ora in fase di analisi le osservazioni spettroscopiche per confermare la natura di questi oggetti e determinarne temperatura e gravità, con l'obiettivo finale di studiare le funzioni di luminosità delle nane bianche di disco e di alone.



Telescopio rifrattore equatoriale Reichenbach-Utzschneider
Monaco di Baviera 1814