

Attività di ricerca di Scilla Degl'Innocenti

RIASSUNTO SINTETICO

La mia attività scientifica si è svolta secondo due filoni principali: 1) l'analisi di problemi aperti in comune tra evoluzione stellare e fisica teorica, con particolare attenzione alla fisica dei neutrini 2) lo studio delle caratteristiche evolutive di stelle di ammasso e di campo, galattiche ed extragalattiche, per l'interpretazione dell'evoluzione delle popolazioni stellari nel quadro dell'evoluzione galattica e la calibrazione di scale astrofisiche di distanza e di tempo.

Nei primi anni di attività di ricerca ho lavorato principalmente nell'ambito del primo filone, mentre, successivamente, l'attività si è spostata principalmente su vari argomenti riguardanti la modellizzazione delle caratteristiche delle varie popolazioni stellari ed il confronto teoria-osservazione. Ho continuato comunque ad interessarmi anche di problemi in comune tra la fisica stellare e la fisica teorica/nucleare, in particolare del calcolo di modelli solari, anche in relazione alla produzione di neutrini e dell'influenza di misure aggiornate di sezioni d'urto nucleari sulle caratteristiche evolutive stellari.

Gli argomenti di cui mi sono principalmente interessata sono quindi:

Modelli di struttura ed evoluzione stellare

Modelli solari e produzione di neutrini solari

Formazione stellare

Nucleosintesi stellare

Analisi di ammassi stellari e di stelle di campo semplici e binarie

Modelli sintetici di popolazioni stellari e modelli galattici per conteggi stellari

Eliosismologia ed asterosismologia

Reazioni nucleari e caratteristiche stellari

Le attività descritte sono state effettuate anche nell'ambito di numerosi progetti di ricerca finanziati, nazionali ed internazionali, di cui sono stata anche responsabile/responsabile locale (vedi CV). Nelle aree di ricerca descritte ho pubblicato 3 articoli di rassegna, 121 articoli su riviste internazionali con referee (di cui 86 con un numero di autori minore od uguale a 5) ed 81 tra contributi in atti di congresso ed in volume (vedi elenco delle pubblicazioni). Sono stato relatore, anche su invito, ad un gran numero di congressi nazionali ed internazionali. Ho svolto attività di referaggio (anche come membro effettivo GEV, Area 02, SSD FIS05, FIS06) e di editing. Commissario in 38 concorsi universitari e controrelatore/membro di 21 commissioni per esame finale di dottorato di ricerca in Fisica/Astronomia presso varie Università italiane (vedi CV).

RIASSUNTO DETTAGLIATO

(Gennaio 2022)

Nel seguito descriverò la mia attività nei summenzionati campi di ricerca, facendo riferimento agli articoli su riviste con referee della lista delle pubblicazioni.

Problemi aperti in comune tra evoluzione stellare e fisica teorica/nucleare

1) Modelli solari, produzione di neutrini ed eliosismologia

La ricerca, svolta principalmente durante il lavoro di dottorato presso l'Università di Ferrara e nei due anni immediatamente successivi, è stata rivolta allo studio delle caratteristiche interne del Sole in relazione al problema (al tempo non ancora risolto) dei neutrini solari. In questo ambito sono stati

prodotti risultati a favore della già supposta improbabilità di una soluzione basata su una variazione del modello solare standard. Questo attraverso una serie di lavori che analizzavano sia gli effetti sul modello solare e sulla produzione di neutrini di una variazione entro i limiti di incertezza della composizione chimica e dei vari inputs fisici (sezioni d'urto e schermaggio elettronico per reazioni nucleari della catena pp e CNO, opacità, efficienza della diffusione microscopica ecc.), sia i risultati degli esperimenti di rivelazione di neutrini solari in maniera il più possibile indipendente dalle previsioni dei modelli (102, 109, 114, 115, 117, 118, 121).

Più in dettaglio, al tempo, vari autori sostenevano che i risultati sperimentali sul flusso di neutrini potessero essere spiegati con una riduzione della temperatura centrale del Sole. Sono stati quindi analizzati un gran numero di modelli solari non standard con ridotta temperatura centrale prodotti variando diversi inputs fisici e la composizione chimica solare. Analizzando la dipendenza dei modelli solari dai vari inputs, ho ricavato anche semplici leggi analitiche per la dipendenza delle caratteristiche strutturali e del flusso di neutrini dagli inputs utilizzati, confermate dal calcolo dei modelli.

Un risultato che ho ottenuto è che la variazione del flusso dei diversi tipi di neutrini in questi modelli solari non standard è principalmente determinata dalla temperatura centrale, quasi indipendentemente dal modo in cui è stata ottenuta la variazione di temperatura rispetto al modello standard. Su queste basi ho dimostrato che non esiste nessun valore della temperatura centrale che potesse rendere conto simultaneamente dei risultati degli esperimenti di rivelazione di neutrini funzionanti all'epoca.

Sono stati anche analizzate possibili modificazioni della probabilità dei vari rami della catena protone-protone dovute ad incertezze nucleari nelle sezioni d'urto nucleari, che non dessero luogo a modifiche della temperatura interna del Sole; anche in questo caso non si riusciva ad ottenere accordo con i risultati sperimentali. Ho così mostrato che, assumendo proprietà standard del neutrino, tutti i modelli non standard, anche quelli con input fisici e chimici sensibilmente variati, non erano in grado di riprodurre i risultati sperimentali.

Riguardo all'analisi dei risultati degli esperimenti, sensibili in maniera diversa ai flussi di neutrini provenienti dalle varie reazioni di fusione nel Sole, ho mostrato, in accordo con i risultati di altri autori, come i risultati sperimentali del tempo fossero in disaccordo tra loro, a meno di non assumere una diminuzione del flusso di neutrini elettronici nel tragitto dal Sole ai rivelatori terrestri.

Il lavoro fin qui descritto, svolto principalmente in collaborazione con il prof. G. Fiorentini dell'Università di Ferrara e con il prof. Castellani dell'Università di Pisa, e contenuto in buona parte nella mia tesi di dottorato e negli articoli già citati, ha portato anche alla pubblicazione di un articolo di rassegna (n.3).

Mi sono poi interessata ai metodi ed ai risultati dell'eliosismologia con particolare attenzione alle informazioni eliosismologiche sulla struttura interna del Sole (e quindi indirettamente sulla produzione di neutrini). Sempre nel contesto del problema dei neutrini solari sono stati posti limiti a variazioni del modello solare standard suggerite come possibili soluzioni al problema dei neutrini solari utilizzando anche le informazioni eliosismologiche tramite metodi variazionali di confronto teoria-osservazione per le frequenze di oscillazione solari (metodi di inversione). In questo modo ho potuto escludere che alcune variazioni al modello solare ipotizzate in letteratura costituissero una possibile soluzione astrofisica al problema dei neutrini solari (93, 94, 95, 96, 100) e confermare il buon accordo tra le previsioni eliosismologiche ed i risultati dei modelli solari standard al momento dell'analisi (100, 102). Per ottenere i risultati eliosismologici ho adattato il codice evolutivo da me utilizzato per interfacciarsi con il codice per il calcolo delle oscillazioni solari e l'utilizzo del metodo di inversione sviluppato dal prof. W. Dziembowski dell'osservatorio astronomico "Copernicus" di Varsavia, con cui ho collaborato per i lavori di eliosismologia.

2) Reazioni nucleari di interesse astrofisico e limiti astrofisici a proprietà non standard di particelle

L'analisi di reazioni nucleari di interesse astrofisico e del loro impatto sulle caratteristiche evolutive stellari è un argomento a cui mi sono interessata dall'inizio della mia attività di ricerca e su cui ho continuato a lavorare saltuariamente per tutta la mia carriera.

Negli anni '90 ho partecipato attivamente alla collaborazione europea (NACRE, Nuclear Astrophysics Compilation of REaction rates) per la compilazione di un database di sezioni d'urto a bassa energia e rates di fusione nucleare per 86 reazioni nucleari di interesse astrofisico tra particelle cariche, per elementi con carica $Z \leq 14$. Per ogni reazione veniva fornito sia il rate con la relativa incertezza in forma tabulare, sia una sua approssimazione analitica. In particolare ho analizzato le reazioni importanti per il modello solare: $^1\text{H}(p, \nu e^+)^2\text{H}$, $^3\text{He}(^3\text{He}, 2p)^4\text{He}$, $^3\text{He}(\alpha, \gamma)^7\text{Be}$, $^7\text{Be}(p, \gamma)^8\text{B}$, $^{14}\text{N}(p, \gamma)^{15}\text{O}$. La mia attiva presenza all'interno della collaborazione è testimoniata anche dalla presentazione di 5 talks ai meeting della collaborazione (vedi lista talks nel CV). Il lavoro della collaborazione è stato pubblicato in un articolo (87) ed il database di reazioni era fino a qualche anno fa disponibile anche in un portale in rete. I rates stimati dalla collaborazione sono stati di riferimento per molti lavori di astrofisica e sono ancora adottati per certe reazioni, come testimoniato anche dalle 1823 citazioni dell'articolo relativo (ISI/WoS al 31/08/2021).

Più recentemente ho iniziato una collaborazione, ancora attiva, con ricercatori dei Laboratori Nazionali del Sud che si occupano della misura di sezioni d'urto nucleari ad energie di interesse astrofisico con il metodo del Trojan Horse. In quest'ambito ho analizzato gli effetti sulle abbondanze superficiali di elementi leggeri in stelle giovani delle incertezze ancora presenti sul rate di varie reazioni di fusione di elementi leggeri: $^6\text{Li}(p, \gamma)^7\text{Be}$, $^7\text{Li}(p, \alpha)^4\text{He}$, $^2\text{H}(d, p)^3\text{H}$ and $^2\text{H}(d, n)^3\text{He}$, $^9\text{Be}(p, \alpha)^6\text{Li}$, $^{10}\text{B}(p, \alpha)^7\text{Be}$ (29, 36, 39, 41, 72, 76). I vari risultati sono stati anche recentemente riassunti in articolo di rassegna (n.1)

Nel corso degli anni ho analizzato anche gli effetti evolutivi su stelle di popolazioni diverse degli aggiornamenti di varie sezioni d'urto rilevanti in fisica stellare: $p+p$, $^{12}\text{C} + \alpha$, 3α , ecc.. (28, 40, 90, 95, 97).

Nel 2004, subito dopo che l'esperimento LUNA al Gran Sasso aveva fornito la prima stima per la sezione d'urto $^{14}\text{N}(p, \alpha)^{15}\text{N}$, che risultava circa la metà del valore generalmente assunto, ho analizzato gli effetti della variazione di sezione d'urto sul modello solare, la produzione di neutrini solari e l'età stimata degli ammassi globulari, in collaborazione principalmente con G. Fiorentini dell'Università di Ferrara. I risultati mostravano che modello solare e quantità eliosismologiche teoriche rimanevano sostanzialmente invariate mentre, come atteso in prima approssimazione, la produzione di neutrini CNO decresceva come il valore della sezione d'urto $^{14}\text{N}+p$. L'età stimata degli ammassi globulari risultava invece aumentata di una quantità che variava da 0.5 a 1 Gyr, a seconda della composizione chimica e del metodo utilizzato per determinare la luminosità del Turn-Off (75).

Ho inoltre analizzato, in alcuni articoli, gli effetti sull'evoluzione stellare di ipotizzate proprietà non standard per alcune particelle, ponendo limiti a variazioni al modello standard dal confronto-teoria osservazione per opportune osservabili stellari (122, 106, 104, 84, 120).

Studio delle caratteristiche evolutive di stelle di ammasso e di campo

Le previsioni teoriche delle caratteristiche evolutive di stelle di ammasso e di campo ed il confronto con i corrispondenti dati osservativi, per l'interpretazione dell'evoluzione delle popolazioni stellari nel quadro dell'evoluzione galattica, è stato il mio principale argomento di ricerca negli ultimi 20 anni. L'attività di ricerca può essere divisa in diversi sottoargomenti illustrati nel seguito.

1) Calcolo di modelli stellari e loro applicazioni

Il continuo miglioramento delle capacità osservative da terra e da satellite implica la necessità di modelli teorici sempre più precisi ed aggiornati. Mi sono quindi occupata con continuità del

miglioramento del codice di evoluzione stellare da me utilizzato (codice FRANEC, versione di Pisa) sia con l'aggiornamento e l'inclusione di processi fisici (rates di reazioni nucleari, equazione di stato, opacità, diffusione microscopica di elio e metalli, overshooting, modelli realistici di atmosfera ecc..) sia con l'ottimizzazione delle procedure di calcolo. Ho svolto questo lavoro inizialmente in maniera totalmente autonoma ed in seguito assieme a laureandi/assegnisti/ricercatori dell'Università di Pisa. Nel tempo sono stati quindi prodotti vari database di modelli tipici delle stelle delle varie popolazioni del Gruppo Locale, procedendo anche ad una calibrazione sistematica degli indicatori di età e di distanza in funzione della composizione chimica per un ampio range di abbondanze (73, 74, 77, 90, 91, 97, 101, 105, 110, 116).

In tempi recenti il codice è stato completamente riaggiornato negli input fisici e nella procedura di calcolo (grazie alla collaborazione con Matteo Dell'Omodarme, Giada Valle, Emanuele Tognelli e Pier Giorgio Prada Moroni dell'Università di Pisa) per seguire in maniera estremamente rapida ed il più possibile precisa l'evoluzione di stelle di massa piccola ed intermedia con varie composizioni chimiche in tutte le fasi evolutive quiescenti, dalla pre-sequenza principale fino alla fase di nana bianca. Sono stati quindi calcolati modelli aggiornati di stelle di masse e composizioni chimiche diverse (216 composizioni diverse) rappresentative delle popolazioni stellari della nostra Galassia e delle galassie del Gruppo Locale, con le corrispondenti isocrone. Parte dei modelli e delle isocrone calcolate, sono stati resi disponibili alla comunità scientifica al sito <http://astro.df.unipi.it/stellar-models/>. Per modelli di piccola massa sono stati anche analizzati in dettaglio la luminosità del Turn-Off e del ramo orizzontale (fondamentali indicatori di età e distanza per ammassi antichi) e sono state fornite relazioni analitiche che legano la luminosità del Turn Off alla composizione chimica, all'efficienza della convezione esterna ed all'età dell'ammasso e la luminosità del ramo orizzontale (nella regione delle RR Lyrae) alla composizione chimica ed alla massa della stella. Queste relazioni sono state analizzate per la prima volta quantitativamente in maniera statistica, fornendo anche indicazioni sull'interazione nei modelli tra inputs fisici e chimici. Modelli ed isocrone sono stati confrontati con diagrammi Colore-Magnitudine di ammassi globulari selezionati, ottenendo un accordo molto buono. E' stato inoltre discusso in dettaglio il confronto con i modelli di altri autori. (43).

Nel corso degli anni, utilizzando i vari modelli stellari calcolati, ho studiato le caratteristiche di ammassi stellari di diverse età e composizione chimica sia della nostra Galassia che nelle Nubi di Magellano, anche in collaborazione con ricercatori italiani e stranieri. Sono state anche analizzate le popolazioni stellari di campo in galassie nane (10, 42, 52, 53, 54, 59, 60, 61, 62, 66, 71, 74, 79, 81, 103, 107, 108, 112, 113).

1.1) Modelli di Pre-Sequenza Principale e Protostella

Uno sforzo significativo è stato effettuato per la corretta modellizzazione della fase di Pre-Sequenza Principale anche per stelle di massa molto piccola, fino al limite dell'innescio dell'idrogeno centrale (lavoro svolto in sinergia con E. Tognelli e P.G. Prada Moroni dell'Università di Pisa). In questo caso è stato necessario porre particolare attenzione alla scelta dei modelli di atmosfera, dell'equazione di stato e dell'opacità radiativa a basse temperature. Anche questi modelli sono disponibili sul sito precedentemente indicato con le corrispondenti isocrone, calcolati per un'ampio range di composizioni chimiche, masse ed età; per ciascuna composizione chimica sono stati poi utilizzati due diversi valori di mixing length e di abbondanza originale di deuterio. Le caratteristiche dei modelli sono discusse in dettaglio e confrontate con quelle di altri lavori di letteratura. Inoltre le principali incertezze sulle previsioni teoriche sono state discusse criticamente (46).

Il calcolo di modelli stellari giovani è stato esteso anche alla fase di protostella, in modalità di accrescimento di massa da disco sottile, tenendo conto degli intervalli di possibili valori dei parametri di accrescimento (rate di accrescimento di massa, frazione di energia di accrescimento rilasciata alla

stella ecc..) in dipendenza anche dalla massa dei nuclei stellari “seme” dell’ordine della massa gioviana o della decina di masse gioviane.

I modelli di stelle di Pre-Sequenza principale sono stati anche utilizzati per il confronto con ammassi stellari giovani (anche utilizzando dati osservativi del satellite Gaia e della survey Gaia-ESO), trovando un ottimo accordo e determinando età e distanza degli stessi e per lo studio di regioni di formazione stellare in collaborazioni con ricercatori di diversi istituti in Italia ed all’estero (7, 13, 16, 19, 44, 45).

Un problema aperto in cui questi modelli di protostella e stelle giovani possono essere applicati con profitto è quello del problema della discrepanza tra teoria ed osservazione per le abbondanze superficiali di ^7Li . Il problema è in generale molto complesso ed in stelle di sequenza principale richiede probabilmente l’introduzione di meccanismi fisici “non standard” come ad es. mescolamenti indotti dalla rotazione, mentre per stelle di Pre-Sequenza Principale la situazione è un po’ più semplificabile. Vari autori sostengono che per stelle così giovani possano entrare in gioco gli effetti di campo magnetico negli involucri esterni, che causano, come uno dei principali effetti, la diminuzione dell’efficienza della convezione esterna. Ho quindi svolto un’analisi quantitativa della dipendenza dell’abbondanza superficiale di litio dagli input fisici e dalla composizione chimica per stelle di Pre-sequenza principale (in collaborazione con E. Tognelli e P.G. Prada Moroni) in modo da poter dare una stima precisa delle incertezze sulle previsioni teoriche di questa quantità. Tali previsioni (con relativa stimata indeterminazione) sono state poi confrontate con i risultati osservativi per 5 ammassi aperti giovani ben osservati della nostra Galassia, con determinazione spettroscopica della composizione chimica. Le età di tali ammassi sono state determinate consistentemente tramite confronto tra i nostri modelli ed il diagramma colore-magnitudine (CMD). Sempre tramite confronto con il CMD è stata stimata l’efficienza della convezione esterna, tale da riprodurre i colori stellari osservati. E’ stato mostrato che modelli di Pre-Sequenza Principale con un’efficienza della convezione esterna sensibilmente minore di quella di sequenza principale erano in grado di riprodurre sia la posizione delle stelle nel diagramma colore-magnitudine che l’abbondanza superficiale di litio. Gli stessi risultati si ottengono dall’analisi di 4 sistemi binari spettrofotometrici per cui sono disponibili stime precise di massa ed altre osservabili delle stelle componenti. Questo lavoro costituisce quindi una conferma dell’ipotesi di inibizione parziale della convezione in tali stelle dovuta probabilmente a fenomeni magnetici (41). Sempre riguardo agli effetti del campo magnetico sulle stelle giovani, è stato recentemente introdotto nel codice (in sinergia con E. Tognelli e P.G. Prada Moroni) la possibilità di valutare gli effetti sulla struttura dell’involucro convettivo e quindi sull’abbondanza di litio superficiale, dovuti alla presenza di un campo magnetico che si manifesta attraverso la presenza di macchie. Il lavoro di confronto tra modelli ed osservazioni di ammassi aperti giovani, presentato parzialmente ad un congresso, è in pubblicazione.

Ho anche analizzato (principalmente in collaborazione con E. Tognelli e P.G. Prada Moroni) l’impatto sulle stelle di Pre-Sequenza Principale di piccola massa delle caratteristiche della fase di protostella; in accordo con i risultati di altri autori, si evidenzia come il parametro più critico sia la frazione di energia ceduta alla stella dalla materia in caduta. In un recente lavoro ci siamo concentrati sull’evoluzione temporale dell’abbondanza superficiale di litio per stelle di bassa metallicità, in dipendenza dai parametri di accrescimento di protostella. L’analisi, non presente nella letteratura precedente, è legata al “problema dell’abbondanza di litio cosmologico”, cioè alla discrepanza tra le previsioni dei modelli cosmologici standard per l’abbondanza di litio cosmologico e le osservazioni in stelle vecchie a bassa metallicità (il cosiddetto “Spite Plateau”).

Abbiamo quindi analizzato le caratteristiche evolutive e l’andamento dell’abbondanza di litio superficiale in protostella e Pre-Sequenza, per tre composizioni chimiche d’interesse, in dipendenza dall’energia rilasciata durante l’accrescimento, dalla massa e raggio del nucleo stellare “seme” e dall’andamento temporale dell’accrescimento. I risultati mostrano che per riprodurre le abbondanze di litio osservate in stelle di popolazione II di diversa massa e metallicità sarebbe necessario un improbabile fine tuning dei parametri di accrescimento (4).

Modelli di protostella sono anche stati utilizzati per analizzare la possibilità di produrre stelle ricche di elio in ammassi globulari tramite l'accrescimento di materiale processato da generazioni stellari precedenti o per mostrare come un episodio di accrescimento di un pianeta roccioso sufficientemente massivo potrebbe giustificare le anomalie chimiche osservate in una stella dell'ammasso giovane Gamma Velorum (26, 27).

Vari lavori svolti su stelle di Pre-Sequenza Principale e protostelle sono stati anche recentemente riassunti in articolo di rassegna (n.2).

1.2) Valutazione quantitativa delle incertezze delle previsioni teoriche

Attualmente lo scenario evolutivo generale è ben definito e supportato dalle osservazioni anche se permangono incertezze non trascurabili dovute agli errori negli input fisici utilizzati nei modelli, alla non perfetta determinazione della composizione chimica della popolazione stellare osservata od alla non ben definita efficienza di alcuni meccanismi fisici come ad es. la diffusione microscopica o l'overshooting nei nuclei convettivi. Data la disponibilità di dati osservativi fotometrici, spettroscopici, dinamici ed asterosismologici sempre più precisi la valutazione delle incertezze teoriche nei modelli è diventata fondamentale per la significatività del confronto teoria osservazione. In questo campo ho un'esperienza di lunghissima data; nel corso degli anni ho analizzato in dettaglio l'affidabilità delle previsioni teoriche per tutte le più rilevanti fasi evolutive quiescenti (ad es. luminosità di stelle di ramo orizzontale, di clump dell'elio e di sequenza di raffreddamento di nana bianca come indicatori primari di distanza, luminosità del bump dell'RGB e del clump dell'AGB, posizione nel diagramma Colore-Magnitudine della sequenze principale di età zero, ZAMS, luminosità del "lithium depletion boundary", tempi di vita nelle diverse fasi evolutive ecc..) e l'effetto delle incertezze teoriche e della composizione chimica sulla determinazione di distanza ed età di ammassi stellari. (32, 51, 69, 82, 85, 86, 88, 97, 99, 101, 105).

Ho valutato anche l'impatto delle incertezze dei modelli evolutivi sui risultati dei modelli pulsazionali di stelle variabili RR Lyrae e Cefeidi, e quindi sulla determinazione delle distanze astrofisiche, in collaborazione principalmente con M. Marconi di INAF-Osservatorio Astronomico di Capodimonte (56, 65, 78).

Con il recente aggiornamento del nostro codice si è reso possibile il calcolo di un gran numero di modelli in maniera semi-automatica e quindi anche la valutazione dell'incertezza dei calcoli teorici tramite metodi statistici. Ho quindi analizzato (in sinergia con G. Valle, M. Dell'Omodarme e P.G. Prada Moroni dell'Università di Pisa) le incertezze nei risultati evolutivi per stelle caratteristiche di ammassi stellari antichi nella nostra Galassia e nelle galassie esterne. A tale scopo abbiamo variato simultaneamente i principali inputs fisici dei modelli, entro le loro indeterminazioni, tramite variazione sistematica degli inputs su una griglia fissa. In questo modo si può anche tener conto delle possibili interazioni tra i differenti inputs fisici. Siamo così stati anche in grado di definire, a mia conoscenza per la prima volta in letteratura, una "banda di errore" per le previsioni teoriche sulla posizione delle stelle nel diagramma Colore-Magnitudine di ammasso. In un articolo successivo è stato dimostrato che la dipendenza dei risultati dalla composizione chimica dell'ammasso è, in generale, relativamente trascurabile (38,40).

Recentemente ho analizzato (in collaborazione con E. Tognelli e P.G. Prada Moroni) le incertezze teoriche sul valore del raggio per stelle di massa piccola e piccolissima ($0.1-1 M_{\odot}$), in seguito alle indicazioni derivanti da risultati osservativi di una possibile sottostima dei raggi teorici di un fattore 3-20%, in dipendenza dalla massa stellare. Sono stati quindi valutati gli effetti dell'incertezza dei più importanti inputs fisici e della composizione chimica, in funzione della massa, sia per strutture iniziali di sequenza principale che per isocrone, fornendo anche una banda di errore cumulativa sul raggio in funzione della massa e della luminosità. I risultati mostrano che l'errore sul raggio aumenta con la massa ed è dipendente dall'età; il valore massimo (di circa +12%, -15%) si ottiene per $1 M_{\odot}$ all'età

di 5 Gyr. La sola incertezza sulla composizione chimica (abbondanza di elio, metalli e mistura utilizzata) gioca un ruolo importante nell'indeterminazione sul raggio, raggiungendo per 1 $M_{\odot}$ all'età di 5 Gyr il valore di circa +7%, -10% (15).

2) Confronto teoria-osservazione tramite metodi statistici per la valutazione di quantità stellari

Nel 2009, come lavoro di tesi di M. Gennaro, di cui ero relatore (assieme a P. G. Prada Moroni), effettuammo un'analisi quantitativa statistica per determinare l'affidabilità del metodo per ottenere il rapporto di arricchimento elio-metalli ($\Delta Y/\Delta Z$) di disco locale dal confronto teoria-osservazione per la posizione nel diagramma Colore-Magnitudine di stelle di piccola massa, dato che questa dipende sensibilmente dall'abbondanza di elio e metalli. Per l'analisi furono utilizzati dati di stelle K del satellite Hipparcos, per cui erano disponibili anche valori spettroscopici di metallicità. Il valore di $\Delta Y/\Delta Z$ è stato ricavato dalla minimizzazione delle differenze teoria-osservazione e l'incertezza sui risultati degli errori osservativi è stato valutato tramite un metodo Monte Carlo. L'importanza degli effetti evolutivi e degli errori sistematici nei modelli è stata stimata tramite l'uso di dati osservativi sintetici creati utilizzando i nostri sets di modelli stellari. Abbiamo così mostrato che una grande fonte di incertezza nei risultati è l'assunzione, comune in letteratura, che le stelle di piccola massa locali possano essere considerate non evolute; la mancanza di un'accurata stima di età per le stelle di piccola massa del campione porta ad una sottostima di circa 2 del valore di $\Delta Y/\Delta Z$. Fonti di incertezza sistematica importanti sono, inoltre, i modelli di atmosfera utilizzati per il passaggio dal piano teorico a quello osservativo e l'assunta efficienza della convezione esterna superadiabatica (48).

Nel 2021, utilizzando un metodo Bayesiano ed i nostri modelli stellari aggiornati, ho analizzato, in sinergia con ricercatori dell'Università di Pisa, l'affidabilità di determinazione di $\Delta Y/\Delta Z$ e dell'efficienza della convezione esterna tramite il confronto teoria-osservazione della posizione nel diagramma Colore-Magnitudine delle stelle dell'ammasso delle Iadi, per il quale valori molto precisi di distanza e metallicità sono disponibili, ricavando $\Delta Y/\Delta Z = 2.03 \pm 0.33$. (2)

Tale metodo Bayesiano di confronto teoria-osservazione, permettendo una valutazione quantitativa, supera in capacità di analisi la semplice sovrapposizione di isocrone e modelli alle osservazioni.

Ho inoltre sviluppato, in sinergia con M. Dell'Omodarme, G. Valle e P.G. Prada Moroni dell'Università di Pisa, una tecnica di maximum likelihood su griglie di modelli stellari per la stima, attraverso il confronto teoria-osservazione, di parametri stellari (massa, raggio, età, ecc..) per stelle di campo, singole od in sistemi binari e del valore di età ed arrossamento in ammassi stellari giovani. La robustezza delle stime effettuate è valutata tramite simulazioni Monte Carlo su dati sintetici. La pipeline SCEPtER (Stellar Characteristics Pisa Estimation gRid) è disponibile liberamente al link <http://CRAN.R-project.org/package=SCEPtER>.

La disponibilità di dati asterosismologici globali di alta qualità per stelle di campo dalle osservazioni da satellite, unita ad affidabili determinazioni di temperatura effettiva, $[Fe/H]$ e/o distanze stellari e moti propri, come forniti, ad es. dalle surveys Gaia e Gaia-ESO, sta rivoluzionando l'analisi delle stelle di campo. Abbiamo quindi inizialmente valutato quantitativamente, con modelli stellari sintetici, le incertezze statistiche e sistematiche insite nella determinazione di massa e raggio delle stelle di campo, quando, come in molti casi reali, sono disponibili le osservabili asterosismologiche globali “large frequency spacing, $\Delta\nu$ ” e “frequency of maximum oscillation power, $\nu_{\max}$ ”, assieme a temperatura effettiva e $[Fe/H]$. Inizialmente sono state prese in considerazione stelle di piccola massa in combustione di H centrale. Abbiamo stimato le incertezze statistiche (deviazione standard circa 4% per la stima di massa e 2% per quella del raggio) derivanti dai tipici errori osservativi al momento del lavoro per le quantità osservative classiche ed asterosismologiche, dando anche indicazioni di quali osservabili influenzano maggiormente la precisione dei risultati. Lo sforzo computazionale per tali analisi è notevole, perché solo la griglia con valori degli inputs fisici standard, al variare di massa,

[Fe/H] ed abbondanza di elio, ha richiesto il calcolo di 712 modelli stellari. Sono stati inoltre stimati gli errori sistematici dovuti alle incertezze sui valori di opacità, sezione d'urto della reazione $^{14}\text{N}+\text{p}$, efficienza di diffusione microscopica, efficienza della convezione esterna e sul valore dell'abbondanza originale di elio, dimostrando che l'effetto cumulativo di queste fonti di incertezza può produrre bias non trascurabili nelle stime dei parametri stellari. I confronti con i risultati ottenuti da noi e da vari autori per la stima di massa e raggio di uno stesso campione di stelle, utilizzando diversi codici di evoluzione stellare e diverse tecniche per la stima delle quantità stellari, ha mostrato, come già suggerito dai risultati precedenti, che le differenze tra le stime di vari autori sono generalmente maggiori degli errori statistici (37).

L'analisi teorica è stata poi estesa, con gli stessi metodi, alla stima delle incertezze statistiche e sistematiche per la determinazione di età delle stelle di campo, sia di sequenza principale che in fase di subgigante e gigante rossa, valutando anche l'effetto della perdita di massa in questa fase ed alla stima di età con dati asterosismologici globali di stelle di gigante rossa in ammasso aperto (11, 12, 17, 31). Con lo stesso metodo ci siamo anche interessati alla valutazione delle incertezze della stima dell'efficienza della convezione esterna (parametro della mixing length) per stelle di campo, ricavando che tale stima appare statisticamente poco affidabile (8, 9). E' stato anche recentemente valutato il miglioramento della precisione dei risultati dovuto all'utilizzo di un terzo parametro asterosismologico globale (small frequency separation) che sta iniziando ad essere disponibile osservativamente (5).

Il metodo precedentemente descritto è stato anche applicato (in collaborazione con G. Valle, M. Dell'Omodarme e P.G. Prada Moroni) alla valutazione delle incertezze statistiche e sistematiche della stima dei parametri (età, estensione del nucleo convettivo, efficienza della convezione esterna ecc..) di stelle in sistemi binari spettrofotometrici, per cui valori di masse e raggi possono essere noti con grande precisione (in questo caso le osservabili sono massa, raggio, metallicità, temperatura efficace). In particolare sono stati inizialmente analizzati, tramite dati osservativi sintetici ricavati dai nostri modelli, sistemi binari con stelle di massa intermedia (fino ad $1.6 M_{\odot}$), le cui caratteristiche e tempi evolutivi dipendono anche dall'estensione del nucleo convettivo in fase di combustione di idrogeno centrale (e quindi dall'efficienza dell'overshooting, non ancora nota con precisione). Come fonti di incertezza sistematica abbiamo preso in considerazione quelle sull'abbondanza iniziale di elio, sull'efficienza della convezione esterna e sulla diffusione microscopica. I risultati mostrano che per sistemi con entrambe le componenti in sequenza principale, assumendo errori osservativi dell'1% in massa e dello 0.5% in raggio (valori tipici di osservazioni molto precise) si riscontrano sia grandi errori statistici che importanti bias nel valore stimato per l'efficienza dell'overshooting e quindi poi per l'età del sistema. La calibrazione del parametro di overshooting sotto le condizioni descritte appare quindi poco affidabile. La situazione appare migliore in sistemi con stelle in fasi evolutive più avanzate, dalla fase di esaurimento dell'H centrale a quella di combustione di elio centrale (23,14). Queste analisi hanno portato anche allo sviluppo di un test statistico per la determinazione dell'attesa differenza di età, ottenuta dal confronto teoria-osservazione, per le due componenti di un sistema binario in realtà coeve, dovuta solo agli errori osservativi. Il metodo migliora le tecniche attualmente adottate per valutare la coevità delle componenti di un sistema binario (22).

Appare comunque che solo osservazioni ad un altissimo livello di precisione (soprattutto sulla massa) di stelle in sistemi binari possano portare a miglioramenti nella calibrazione dei parametri stellari. L'occasione si è presentata nel 2016 con la pubblicazione dei dati di massa per le stelle del sistema binario spettrofotometrico non interagente TZ Fornacis con l'eccezionale precisione dello 0.05%. Inoltre la stima delle massa delle due stelle del sistema è praticamente la stessa (circa $2 M_{\odot}$), così da poter supporre che l'incognita efficienza di overshooting sia la stessa per entrambe, e le due stelle sono evolute oltre la sequenza principale. Il sistema costituisce quindi un caso tipico per lo studio della possibilità di deduzione di parametri stellari in sistemi binari osservati con estrema precisione e per cui sussistano situazioni particolarmente favorevoli. Per tale sistema abbiamo ricavato contemporaneamente il valore di età, efficienza dell'overshooting ed abbondanza originale di elio,

dimostrando anche che trascurare il fatto che l'abbondanza originale di elio del sistema non è nota con precisione può portare a forti bias nelle stime di età ed overshooting. Le incertezze statistiche derivanti da errori osservativi sono state stimate con un metodo Monte Carlo. Per tener conto degli effetti dovuti alle incertezze degli input fisici utilizzati nei modelli sul recupero dei parametri stellari tramite la pipeline SCEPtER, abbiamo utilizzato griglie di modelli calcolati sia con il nostro codice evolutivo che con il codice MESA, disponibile liberamente sul web, ottenendo un'accordo generale relativamente buono tra i risultati. Comunque, anche con osservazioni di questa precisione in una situazione particolarmente favorevole, i parametri stellari non possono essere ottenuti in maniera univoca; abbiamo infatti trovato almeno due distinte classi di soluzioni, anche se una con maggiore probabilità dell'altra. Abbiamo anche verificato che assumere artificialmente un'incertezza sulla massa dell'1% porterebbe a severi bias nella stima dei parametri. Rimane quindi confermato che la stima dell'efficienza dell'overshooting in sistemi binari è un compito molto arduo, che richiede precisioni osservative difficilmente raggiunte, assieme ad una situazione generale particolarmente favorevole (20).

3) Modelli galattici per conteggi stellari

All'inizio degli anni 2000 ho sviluppato un modello galattico per conteggi stellari, basato su plausibili assunzioni sulla distribuzione spaziale delle varie popolazioni galattiche e sul nostro set di tracce evolutive, per predire conteggi e diagrammi colore-magnitudine sintetici per stelle di campo, nelle varie bande e nelle varie direzioni della Galassia. Il vantaggio principale del modello era che permetteva di valutare la fase evolutiva delle varie stelle e di introdurre la popolazione di nane bianche in maniera evolutivamente consistente (83,80). Il modello è stato poi migliorato durante la tesi di dottorato di Michele Cignoni, di cui sono stata supervisore, assieme al prof. Shore dell'Università di Pisa. Abbiamo quindi costruito un codice che si basa sulla generazione di un grande numero di SFHs (star formation histories) ottenute adottando combinazioni diverse di star formation rate ($SFR(t)$), arricchimento chimico $Z(t)$, funzione di massa iniziale (IMF), e frazione di stelle binarie. L'obiettivo finale di tali studi è di ottenere informazioni sull'andamento temporale del tasso di formazione stellare della nostra Galassia e sull'arricchimento chimico, tramite il confronto tra diagrammi colore magnitudine osservati e teorici. Il trattamento statistico, necessario per quantificare il confronto teoria-osservazioni, è effettuato tramite la minimizzazione (maximum likelihood basato su distribuzione di probabilità Poissoniana) delle differenze del numero di stelle in un set di regioni del diagramma colore magnitudine scelte per campionare stelle di età diversa o in fasi evolutive specifiche. Le incertezze sui parametri che meglio riproducono le osservazioni sono assegnate tramite un metodo Monte Carlo. Utilizzando il codice sviluppato è stata analizzata la formazione di disco locale da dati del satellite Hipparcos entro 80 pc. Innanzitutto abbiamo svolto un'analisi preliminare con dati sintetici per analizzare precisione ed accuratezza del metodo, anche per determinare l'effetto sui risultati di una non precisa conoscenza dell'IMF, della relazione età-metallicità e della frazione di binarie non risolte. I risultati mostrano che, per il nostro campione osservativo, la SFH stimata non dipende in maniera critica dalle assunzioni sull'IMF e la frazione di binarie, mentre è molto sensibile all'andamento adottato per la relazione età-metallicità.

Il metodo è stato poi applicato al campione osservativo trovando risultati per la storia di formazione stellare in generale accordo anche con alcuni lavori più recenti (68). In anni più recenti ho effettuato altre analisi di campi stellari, con il codice aggiornato e reso più completo dal prof. Cignoni, in collaborazione principale con lui e con membri di survey osservative, utilizzando anche i nostri modelli di Pre-Sequenza Principale (34, 52, 54, 55, 58). Ho inoltre studiato, con un codice sviluppato in collaborazione con una laureanda e con G. Raimondo di INAF-Osservatorio Astronomico d'Abruzzo, le proprietà fotometriche integrate di ammassi stellari non risolti nelle singole stelle (67).

