

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

DIPARTIMENTO DI FISICA E ASTRONOMIA "G. GALILEI"

CORSO DI LAUREA IN ASTRONOMIA

TESI DI LAUREA TRIENNALE

**Meccanismi di formazione di stelle blue
stragglers**

LAUREANDA: CAMILLA PIANTA

RELATORE: GIOVANNI CARRARO

ANNO ACCADEMICO 2016-2017

Indice

1	Meccanismi di formazione	3
1.1	Collisioni	3
1.2	Trasferimento di massa	5
1.3	Evoluzione di sistemi tripli	7
1.4	Teorie alternative sulla formazione di blue stragglers in ammassi aperti	9
2	Ambienti caratteristici	10
2.1	Ammassi globulari	10
2.1.1	La costanza del numero di blue stragglers	12
2.1.2	La doppia sequenza di stelle blue stragglers in M30	15
2.1.3	La distribuzione radiale delle stelle blue stragglers	17
2.2	Ammassi aperti	19
2.2.1	Un ammasso aperto importante: NGC 188	20
2.2.2	Il modello N-body di NGC 188	21
2.3	Galassie nane	23
2.4	Blue stragglers di campo	24
3	Ruolo delle stelle blue stragglers nello spettro integrato di popolazioni stellari singole	25

Introduzione

Le stelle blue stragglers sono stelle “anomale” poiché più massive e luminose e, apparentemente, più giovani delle altre stelle appartenenti alla loro stessa popolazione. Esse si trovano infatti su un'estensione della sequenza principale nel diagramma colore-magnitudine, appena sopra il turn-off: si tratta di una regione che di solito viene abbandonata dalle stelle di corrispondenti massa ed età, in quanto già evolute. Proprio il fatto di essere “più blu” del turn-off della popolazione stellare in cui sono osservate e la loro insolita posizione, impossibile da spiegare attraverso la teoria dell'evoluzione stellare standard, all'interno del diagramma colore-magnitudine hanno valso a tali stelle l'appellativo di “blue stragglers”.

La prima scoperta delle blue stragglers risale al 1953, anno in cui Allan Sandage realizzò il diagramma colore-magnitudine dell'ammasso globulare M3.

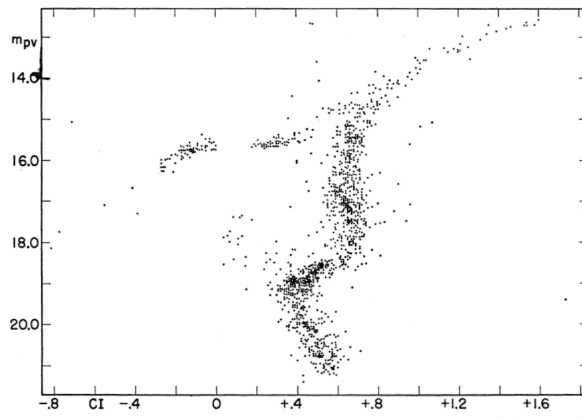


Figura 1: CMD dell'ammasso globulare M3 realizzato da Sandage

Il diagramma presentava tutte le principali fasi evolutive delle stelle previste dall'evoluzione stellare standard, fatta eccezione per un gruppo di stelle blu, particolarmente massive e brillanti, situate al di sopra del turn-off: tali stelle sembravano dunque più giovani delle altre stelle dell'ammasso, e tuttavia non dovevano appartenere ad una seconda popolazione stellare, come si poteva dedurre da una disamina delle velocità radiali, effettivamente consistenti con quelle delle stelle membri di M3.

Negli anni successivi stelle blue stragglers furono osservate anche in altri sistemi stellari, non solo in ammassi globulari, ma anche in ammassi aperti: da ricordare a tal proposito sono gli ammassi aperti vecchi NGC 7789, M67 e NGC 188. L'identificazione di stelle blue stragglers in tali ammassi fu, infatti, quasi immediata in quanto gli ammassi aperti vecchi, ossia di età compresa tra 5-10

Gyrs, hanno diagrammi colore-magnitudine solitamente molto simili a quelli degli ammassi globulari.

Attualmente si rileva la presenza di stelle blu stragglers sia in ammassi globulari e aperti, sia in galassie nane satelliti della Via Lattea, sia come stelle di campo: il fatto che esse vengano osservate in diversa proporzione e che la loro distribuzione vari a seconda dell'ambiente in cui si trovano suggerisce che esista una qualche relazione tra i meccanismi di formazione e di evoluzione di tali stelle e il loro habitat.

1 Meccanismi di formazione

Non esiste un unico meccanismo di formazione che spieghi le proprietà fisiche di tutte le blue stragglers osservate: i meccanismi di formazione di stelle blue stragglers sono molteplici e dipendono direttamente dalle caratteristiche ambientali. Si prendono quindi in considerazione i seguenti canali di formazione:

1. Collisione e conseguente fusione tra stelle
2. Trasferimento di massa ed eventualmente fusione di stelle che evolvono naturalmente in sistemi binari
3. Interazioni tra stelle in sistemi tripli

Si procederà ora ad un'analisi dettagliata di ciascun canale.

1.1 Collisioni

Le collisioni sono uno degli esiti più comuni dell'interazione tra stelle: esse, di conseguenza, avvengono prevalentemente in ambienti densi di stelle, come i nuclei degli ammassi globulari. Le collisioni possono verificarsi tra stelle che si trovino in qualunque fase evolutiva, sebbene siano più frequenti quelle tra stelle di massa media, come le stelle di sequenza principale, rispetto a quelli tra stelle di massa maggiore. Non a caso, le collisioni adatte alla formazione di stelle blue stragglers sono proprio quelle che coinvolgono stelle di sequenza principale in ammassi globulari.

Tuttavia, affinché le collisioni siano un meccanismo efficace nel dare luogo a stelle blue stragglers, è necessario che siano rispettate alcune fondamentali condizioni: in primis la velocità delle stelle coinvolte nel processo deve essere relativamente bassa per favorire la fusione in seguito all'urto, e in secondo luogo il tempo di vita dei prodotti di fusione deve essere abbastanza lungo, nonchè il numero di collisioni sufficientemente elevato, da rendere conto della quantità di stelle blue stragglers effettivamente osservata.

L'evoluzione dei prodotti della fusione tra stelle è un processo piuttosto complesso dal punto di vista fisico, dal momento che, nonostante la maggior parte del materiale stellare sia legata in un unico oggetto, questo non appare immediatamente come una vera e propria stella. Infatti, un prodotto di fusione non si trova in condizione di equilibrio idrostatico non appena avvenuta la collisione: l'energia cinetica da esso acquisita nell'impatto viene velocemente convertita in energia termica. Ciò provoca un'espansione dell'oggetto che viene poi alimentata dalla notevole quantità di momento angolare ad esso trasferita nella collisione: è quindi difficile che, in questa fase, il prodotto di fusione si contragga per innescare le reazioni nucleari necessarie a trasformarlo in una stella di sequenza principale. Solo in un secondo momento si verifica una perdita di momento angolare che favorisce la formazione di un disco stellare e la contrazione della neonata stella.

Il tempo di vita della stella di sequenza principale così formatasi dipende dalla quantità di idrogeno disponibile per alimentare le reazioni nucleari di fusione. Ora, poiché le stelle blue stragglers sono situate vicino al turn-off, si deduce che esse devono essere generate dalla collisione tra stelle di sequenza principale che si trovino anch'esse in prossimità di tale punto: suddette stelle, che stanno dunque per lasciare la sequenza principale, non dispongono di un'ingente quantità di idrogeno ancora non fuso all'interno del nucleo e, di conseguenza, la loro collisione, seguita da fusione, produrrà una stella povera di idrogeno. Da questo ragionamento si può facilmente concludere che il tempo di vita di una stella blue straggler originata per collisione tra due stelle di sequenza principale sarebbe molto breve se non intervenisse un efficiente meccanismo di mescolamento a rifornire costantemente il nucleo di nuovo idrogeno per mantenere le reazioni nucleari di fusione. Ciò permette quindi ad una stella blue straggler di aumentare il proprio tempo di permanenza nella sequenza principale, fatto che giustifica non solo la posizione osservata all'interno del diagramma colore-magnitudine, ma anche le caratteristiche di maggiore massa e luminosità di tali stelle rispetto alle normali stelle di sequenza principale.

Tuttavia, le collisioni non riguardano soltanto singole stelle: esse possono coinvolgere, invero, anche sistemi binari. Benchè i sistemi binari siano meno numerosi e diffusi delle stelle singole all'interno degli ammassi globulari, essi presentano una sezione d'urto maggiore rispetto a quella delle stelle singole: ciò comporta un aumento della probabilità di collisione. Infatti, in ambienti molto densamente popolati come i nuclei degli ammassi globulari i sistemi binari sono frequentemente colpiti da stelle singole.

Molteplici sono gli esiti dell'interazione tra una stella singola e un sistema binario:

1. L'avvicinamento della stella singola provoca la fusione delle due stelle binarie, ma la stella incidente non resta legata al prodotto della fusione in un nuovo sistema
2. L'avvicinamento della stella singola provoca la fusione delle due stelle binarie ed essa rimane poi legata al prodotto di fusione all'interno di un nuovo sistema binario
3. La stella singola entra a far parte del sistema binario al posto della componente meno massiva di questo, che viene espulsa
4. La stella singola rimane legata al sistema binario formando un sistema triplo
5. La stella singola e il sistema binario formano un sistema triplo avvolto in un involucro comune da essa prodotto

È possibile, infine, che si verifichino interazioni anche tra sistemi binari: come nel caso precedente, la probabilità di collisione è proporzionale alla sezione d'urto del sistema binario target. Ciononostante, a differenza delle interazioni tra sistemi binari e stelle singole, le collisioni tra sistemi binari producono tipicamente un sistema triplo e una stella isolata e sono diffuse in ambienti meno densamente popolati degli ammassi globulari, dove la presenza di sistemi binari isolati è più frequente a causa del minor numero di interazioni.

1.2 Trasferimento di massa

La formazione di stelle blue stragglers può essere il risultato della naturale evoluzione di sistemi binari isolati. Il destino di un sistema binario libero di evolvere dipende dalla distanza tra le due stelle che lo compongono: se tali stelle sono molto vicine tra loro, si verifica una perdita di momento angolare che le porta a spiraleggiare insieme fino a fondersi, mentre, se esse sono abbastanza lontane, può essere avviato il trasferimento di massa dalla stella più evoluta del sistema verso la stella compagna. Nel primo caso viene originata una stella blue straggler isolata e avente massa maggiore di quella delle stelle progenitrici; nel secondo, viceversa, la stella accresciuta all'interno del sistema binario diventa una blue straggler che rimane legata alla stella donatrice, trasformata in nana bianca alla fine del processo.

In particolare, per comprendere come avvenga il trasferimento di massa tra stelle binarie, è necessario effettuare una breve digressione sul meccanismo del Roche Lobe Overflow (RLOF). Il lobo di Roche è una regione di spazio che circonda una stella binaria e all'interno della quale si trova materiale orbitante gravitazionalmente legato ad essa. Quando una stella, evolvendo, si espande

oltre il proprio lobo di Roche, i suoi strati esterni, non più ad essa legati, finiscono per cadere sulla stella compagna, che viene allora accresciuta in massa: il processo di trasferimento di massa così avviato prende il nome di Roche Lobe Overflow. D'altra parte, la riduzione della massa della stella donatrice implica il restringimento del lobo di Roche stesso: in questo modo il trasferimento di massa viene naturalmente interrotto non appena la stella rientra nel proprio lobo di Roche.

Sia l'avviamento sia il risultato del RLOF dipendono fortemente dal tipo di stella che ha dato inizio al trasferimento di massa. A seconda della fase evolutiva in cui si trova la stella donatrice si distinguono i seguenti casi di RLOF:

1. Caso A → Si verifica quando entrambe le stelle del sistema binario si trovano nella fase di sequenza principale. L'esito del trasferimento di massa è una stella blue straggler che rimane legata alla stella donatrice in un sistema binario con breve periodo orbitale.
2. Caso B → Si verifica quando la stella donatrice è uscita dalla sequenza principale e si è innescata in essa la fusione nucleare dell'elio. Affinchè sia possibile la formazione di una stella blue straggler per trasferimento di massa, è necessario che il sistema non sia avvolto in un involucro comune poichè, in tal caso, parte della massa trasferita sarebbe impiegata nella realizzazione di questo e risulterebbe dunque persa al momento della sua espulsione. Se, quindi, tutta la massa trasferita viene utilizzata nell'accrescimento della stella meno evoluta del sistema, il risultato del RLOF sarà una stella blue straggler legata ad una stella nana bianca di elio, ossia ciò che resta della stella donatrice al termine del processo, all'interno del sistema binario originario.
3. Caso C → Si verifica quando la stella donatrice è molto evoluta, cioè si trova nella fase di AGB: si tratta quindi di una stella di grandi dimensioni e con un involucro convettivo ben sviluppato. In questo caso, il RLOF produce una stella blue straggler di massa appena superiore a quella del turn-off che rimane legata alla stella donatrice, divenuta una nana bianca di CO. Il sistema binario così costituito è tendenzialmente caratterizzato da un lungo periodo orbitale.

Va infine menzionato un ultimo caso di trasferimento di massa, che tuttavia non rientra nel RLOF: si tratta del trasferimento di massa mediante venti stellari. Qualora due stelle binarie siano sufficientemente distanti l'una dall'altra e una di esse sia una stella di AGB non in grado di riempire il proprio lobo di Roche, è possibile che venga innescato il trasferimento di massa da tale stella alla stella compagna a causa di venti stellari che strappano materiale dalla superficie della

prima e lo trasportano verso la seconda. Le stelle di AGB, invero, sono tipicamente affette dall'azione di forti venti stellari che le privano degli strati più esterni: il materiale superficiale così rimosso da tali stelle va di solito a costituire delle nebulose planetarie nello spazio circostante. Ciò che rimane di una stella di AGB spogliata del suo involucro è una nana bianca di CO: dunque, nell'eventualità in cui questa modalità di trasferimento di massa sia particolarmente efficiente, può accadere che venga originata una stella blue straggler avente come compagna una nana bianca di CO.

In generale il trasferimento di massa attraverso il meccanismo del RLOF può essere stabile o instabile, conservativo o non conservativo. Si definisce stabile il trasferimento di massa che avviene da parte di una stella donatrice che riempie il proprio lobo di Roche senza però oltrepassarlo, instabile quello in cui, viceversa, la stella donatrice eccede il proprio lobo di Roche: se ciò accade, la stella compagna viene accresciuta in modo veloce ed incontrollato a causa dell'ingente quantità di materiale presente al di là del lobo di Roche della stella donatrice. Si definisce conservativo, invece, il trasferimento di massa in cui non si verificano perdite di materiale e/o di momento angolare nel passaggio dall'una all'altra stella, non conservativo quello in cui, al contrario, si riscontra la presenza di una delle due o di entrambe le perdite. È importante sottolineare, poi, che tali caratteristiche del trasferimento di massa sono indipendenti dal caso considerato, ovvero possono essere associate a ciascuna delle modalità precedentemente discusse.

Tuttavia, ai fini della formazione di stelle blue stragglers, è fondamentale che il trasferimento di massa sia conservativo, in quanto tali stelle devono essere più massive non solo delle stelle binarie compagne, ma anche del turn-off: è necessario, quindi, che tutta la massa trasferita dalla stella donatrice sia impiegata nell'accrescimento della stella compagna, senza che vi siano perdite durante il processo. Si deduce allora che, a differenza dei casi A e B, il caso C è quasi sicuramente non conservativo poiché le stelle di AGB sono sovente soggette a venti stellari che provocano una perdita di massa aggiuntiva nel sistema: di conseguenza, la probabilità che una stella blue straggler sia generata attraverso tale modalità di trasferimento di massa è piuttosto bassa. Il fatto che il trasferimento di massa sia stabile o meno, invece, non ha particolare importanza per quanto concerne la formazione delle blue stragglers, dal momento che tale proprietà non compromette l'arrivo di nuovo materiale per l'accrescimento.

1.3 Evoluzione di sistemi tripli

Numerosi sono gli scenari che caratterizzano l'evoluzione di sistemi tripli e che possono portare alla formazione di stelle blue stragglers: possono avvenire col-

lisioni, trasferimento di massa o addirittura fusione di due dei tre membri del sistema.

I sistemi tripli presentano generalmente una configurazione gerarchica in cui un sistema binario interno, costituito da due stelle situate a distanza molto ravvicinata l'una dall'altra, e una terza stella orbitano intorno al comune centro di massa, formando così un sistema binario esterno.

Un fenomeno piuttosto comune nei sistemi tripli è l'effetto Kozai: se l'inclinazione dell'orbita del sistema binario interno è abbastanza grande, comparata a quella del sistema binario esterno, si verificano delle oscillazioni dell'eccentricità e dell'inclinazione dell'orbita del sistema binario interno. In particolare, l'effetto Kozai riveste un ruolo fondamentale nell'interazione tra i membri di un sistema triplo. Infatti, se l'inclinazione dell'orbita del sistema binario interno è elevata, allora anche l'eccentricità dell'orbita sarà tale: ciò induce delle interazioni mareali tra le due stelle, interazioni che provocano dissipazione di energia. Ora, questa situazione, ripetendosi più volte per effetto Kozai, determina l'avvicinamento delle due stelle del sistema binario interno fino all'innescò del trasferimento di massa da una all'altra. È quindi ragionevole pensare che le due binarie possano anche fondersi, come estremo esito di tale processo.

Si deduce, pertanto, che l'effetto Kozai può favorire la formazione di stelle blue stragglers all'interno di un sistema triplo attraverso i meccanismi di trasferimento di massa e di fusione: nel primo caso il sistema triplo sopravvive poiché la neonata stella blue straggler rimane parte del sistema binario interno, mentre nel secondo ciò non accade in quanto la stella blue straggler, che ingloba le due stelle del sistema binario interno, va a costituire un unico sistema binario, solitamente caratterizzato da breve periodo orbitale, con la terza stella del sistema triplo originario.

Tuttavia, perdite di materiale stellare durante il trasferimento di massa tra le due stelle del sistema binario interno, unitamente all'evoluzione di queste, possono essere causa non solo di una destabilizzazione del sistema triplo, ma anche del verificarsi di interazioni mareali e di collisioni: di conseguenza, dalla collisione di due stelle all'interno di un sistema triplo può avere origine una stella blue straggler che rimane legata alla terza stella in un nuovo sistema binario.

Infine, è interessante sottolineare l'importanza dei sistemi tripli nella formazione di sistemi binari, contenenti stelle blue stragglers e aventi breve periodo orbitale, nel caso A del trasferimento di massa: poiché sarebbe difficile ottenere un tale sistema dalla semplice evoluzione di due stelle binarie nella fase di sequenza principale, si ritiene che tale meccanismo di trasferimento di massa sia efficace soltanto se mediato dalla presenza di una terza stella facente parte, insieme alle stelle suddette, di un sistema triplo.

1.4 Teorie alternative sulla formazione di blue stragglers in ammassi aperti

I meccanismi appena trattati risultano i più probabili canali di formazione di stelle blue stragglers. Ciononostante, altre teorie, in realtà di dubbia veridicità, sono state proposte per spiegare la presenza di blue stragglers in ammassi aperti:

1. Le blue stragglers potrebbero essere il risultato di un secondo, e quindi più recente, episodio di formazione stellare. Se così fosse, l'ammasso a cui esse appartengono avrebbe dovuto trattenere parte del gas proveniente dal primo episodio di formazione stellare: tale gas si sarebbe allora spostato verso il centro dell'ammasso al fine di raggiungere il valore di densità necessario a produrre una nuova generazione di stelle. Tuttavia, in questo ragionamento non si tiene conto in primis del fatto che gli ammassi aperti non possiedono un pozzo gravitazionale sufficiente a dar luogo a più episodi di formazione stellare, e poi del fatto che, essendo le blue stragglers molto più massive delle normali stelle di sequenza principale, i due episodi di formazione stellare avrebbero dovuto essere molto distanti nel tempo.
2. Le blue stragglers potrebbero essere stelle di sequenza principale ormai evolute, in quanto simili alle stelle di ramo orizzontale.
3. Le blue stragglers potrebbero essere stelle di sequenza principale la cui permanenza in tale fase è stata allungata mediante overshooting: ciò implicherebbe, dunque, che tali stelle siano state in grado di ritenere una maggior quantità di idrogeno delle normali stelle di sequenza principale in modo da aumentare non solo la durata delle reazioni nucleari di fusione, ma anche l'estensione del loro nucleo. Tuttavia, non esistono processi fisici che permettano ad una stella di sequenza principale di avere età maggiore di quella del turn-off.
4. Le blue stragglers potrebbero essere stelle isolate catturate dal potenziale gravitazionale dell'ammasso: qualora un ammasso aperto passi in prossimità del disco galattico, potrebbe catturare delle stelle isolate particolarmente massive che rimarrebbero poi legate all'ammasso.

Le recenti osservazioni di stelle blue stragglers in ammassi aperti, soprattutto grazie al miglioramento della strumentazione e delle tecnologie da Terra e dallo spazio, hanno permesso di confutare con quasi assoluta certezza tali teorie.

2 Ambienti caratteristici

La presenza di stelle blue stragglers è stata rilevata in ambienti molto diversi tra loro: dagli ammassi globulari e aperti alle galassie nane, senza dimenticare l'esistenza di oggetti isolati nell'alone galattico. Si vuole pertanto analizzare la popolazione di blue stragglers, nonché identificare i corretti meccanismi responsabili della formazione di tali stelle, in ciascun ambiente sopra citato.

2.1 Ammassi globulari

Gli ammassi globulari sono sistemi stellari contenenti decine, se non centinaia, di migliaia di stelle; si tratta inoltre di strutture vecchie e isolate, di forma approssimativamente sferica, situate nell'alone o nel nucleo delle galassie. La ricerca astronomica ha recentemente portato alla luce una caratteristica inattesa degli ammassi globulari: essi ospitano popolazioni stellari multiple, ossia diverse generazioni di stelle, probabilmente esito di differenti episodi di formazione stellare.

Gli ammassi globulari sono sistemi collisionali, in quanto le interazioni tra due corpi sono in essi molto frequenti: non sorprende, invero, che si verifichino numerose interazioni all'interno di ambienti così densi di stelle. Le interazioni, in particolare quelle forti come le collisioni, svolgono un ruolo fondamentale nell'evoluzione stellare e, di riflesso, nell'evoluzione degli ammassi globulari stessi: si definisce a tal proposito tempo di rilassamento il tempo impiegato da una stella a recuperare il suo status cinematico in seguito ad un'interazione. È proprio il tempo di rilassamento, pertanto, a scandire l'evoluzione dinamica di tali sistemi stellari.

Stante tale presupposto, le più importanti conseguenze del rilassamento, a livello di evoluzione dinamica degli ammassi globulari, sono:

1. Evaporazione o perdita di massa → si tratta di un fenomeno solitamente provocato dall'interazione tra stelle, in quanto il rilassamento favorisce il mutuo scambio di energia, ma che può essere accelerato da shock mareali che si verificano quando un ammasso globulare passa vicino al centro della galassia ospite. A causa delle interazioni, infatti, le orbite delle stelle possono essere modificate, divenendo da circolari ad ellittiche: ciò comporta un aumento delle dimensioni dell'ammasso e, di conseguenza, fa sì che alcune stelle superino il cosiddetto raggio mareale. Il raggio mareale definisce il "perimetro" di un ammasso: ergo, tutte le stelle che si trovino al di là di tale confine non risultano più ad esso legate e vengono perse. Anche l'evoluzione stellare, tuttavia, può contribuire a questo processo poiché le stelle più massive sono quelle aventi il minor tempo di vita all'interno

di una popolazione stellare singola: la loro prematura morte, pertanto, induce un'ulteriore perdita di massa nell'ammasso che le contiene.

2. Confinamento di massa \rightarrow il rilassamento cerca di uguagliare l'energia cinetica di stelle di massa diversa: essendo l'energia cinetica data da $E = \frac{1}{2}mv^2$, si deduce che stelle di massa maggiore dovranno avere velocità minore. Si determina in questo modo una separazione delle stelle in due gruppi distinti a seconda del valore della loro massa: le stelle più massive si dirigeranno verso il centro dell'ammasso in cui si trovano per rimanere lì confinate, mentre quelle meno massive saranno spinte verso le regioni più esterne e potranno più facilmente lasciare l'ammasso.
3. Collasso del nucleo \rightarrow il collasso del nucleo di un ammasso globulare è l'estremo esito del confinamento di massa: infatti, se il rilassamento continua ad agire in modo tale da pareggiare l'energia cinetica delle diverse stelle, quelle già confinate nelle regioni centrali scenderanno ancor più in profondità fino a provocare il collasso del nucleo dell'ammasso.

Per contrastare il rilassamento ed evitare gli effetti ad esso dovuti sono necessari dei meccanismi di riscaldamento interno che apportino nuova energia cinetica al sistema collassante: tale energia viene di solito generata attraverso interazioni tra sistemi binari di tipo hard e singole stelle. Un sistema binario viene definito "hard" se possiede un'energia di legame maggiore dell'energia cinetica media dell'ammasso in cui si trova. Ora, se un tale sistema binario interagisce con una stella singola in un ammasso globulare, il nuovo sistema binario risultante (non per forza avente le stesse componenti di quello originario) sarà caratterizzato da un'energia di legame maggiore di quella del sistema binario originario (esso sarà cioè "harder"): si ottiene in tal modo una nuova fonte di energia immediatamente disponibile per l'ammasso.

In questo complesso quadro di evoluzione dinamica, le stelle blue stragglers si configurano come un importante strumento per indagare lo status dell'ammasso globulare in cui sono contenute: esse rappresentano, infatti, un ponte tra l'evoluzione stellare standard e le dinamiche interne degli ammassi.

Data la morfologia degli ammassi globulari, i meccanismi di formazione di stelle blue stragglers da prendere in considerazione sono il trasferimento di massa in sistemi binari e la fusione di stelle indotta da collisioni. Infatti, in ambienti così ricchi di stelle come i nuclei degli ammassi globulari, le collisioni non solo tra stelle singole, ma anche tra stelle singole e sistemi binari avvengono frequentemente; inoltre, proprio tali interazioni sono determinanti sia nella distruzione sia nella creazione di sistemi binari e favoriscono, di conseguenza, la formazione di configurazioni tali da permettere l'innescarsi del trasferimento di massa.

A conferma del fatto che questi siano i meccanismi responsabili della generazione di stelle blue stragglers in ammassi globulari intervengono le osservazioni: esse sono essenziali, poi, per comprendere dove, all'interno di tali sistemi stellari, tali meccanismi predominino.

Lo scenario osservativo e interpretativo delle blue stragglers è cambiato in modo significativo negli ultimi anni: infatti, fino agli anni '90 tali stelle venivano cercate solo nelle regioni più esterne degli ammassi globulari e negli ammassi aperti, fatto che aveva contribuito ad alimentare la falsa credenza che gli ambienti poco densamente popolati fossero il loro habitat naturale. Ma, a partire dagli anni '90, l'avvento di telescopi con ampia risoluzione spaziale come HST ha permesso di scoprire stelle blue stragglers anche in ambienti molto più densi, in primis nelle regioni centrali degli ammassi globulari. A tal proposito, proprio HST ha segnato il punto di svolta nello studio delle blue stragglers, in quanto ha dato la possibilità di effettuare analisi fotometriche e spettroscopiche nell'ultravioletto, tipica banda di emissione delle stelle calde, e quindi blu. La gran mole di dati così ricavata è stata utilizzata per la realizzazione dei primi cataloghi di stelle blue stragglers.

Attualmente, i cataloghi di stelle blue stragglers in ammassi globulari sono molto cospicui e vengono impiegati per la ricerca di correlazioni tra la frequenza specifica, ossia il numero, di tali stelle e alcune proprietà fisiche degli ammassi, come la luminosità, la massa e la densità centrale. Peraltro, tale indagine si rivela cruciale nella comprensione di come i meccanismi di formazione di stelle blue stragglers dipendano dai parametri fisici caratteristici degli ammassi.

2.1.1 La costanza del numero di blue stragglers

La frequenza specifica consente di valutare l'incidenza delle stelle blue stragglers all'interno della popolazione originaria ed è definita come il rapporto tra la densità spaziale di stelle blue stragglers e la densità spaziale di stelle di ramo orizzontale:

$$F_{HB}^{BSS} = \frac{N_{BSS}}{N_{HB}}$$

In particolare, si sceglie la densità spaziale delle stelle di ramo orizzontale come riferimento in quanto esse sono, al pari delle blue stragglers, stelle calde e blu che risultano brillanti nell'ultravioletto: dunque, esse sono ben rappresentative della popolazione di appartenenza in tale regione dello spettro elettromagnetico.

Utilizzando la frequenza specifica così descritta, è possibile esaminare i vari canali di formazione di stelle blue stragglers studiando la correlazione tra essi e determinati parametri fisici degli ammassi globulari.

Si supponga, per esempio, di valutare la frequenza specifica di blue stragglers in funzione della magnitudine assoluta, e dunque della massa totale, dell'am-

masso globulare di appartenenza: ci si aspetta allora che tali grandezze siano tra loro legate da una qualche dipendenza. Tuttavia, l'andamento del numero di blue stragglers in funzione della massa dell'ammasso in cui si trovano è costante, ossia rappresentato da una distribuzione piatta che indicherebbe quindi che le due quantità esaminate sono scorrelate. Tale risultato è perciò del tutto inatteso, poiché viene naturale supporre che il numero di blue stragglers osservato aumenti in modo direttamente proporzionale alla massa dell'ammasso d'origine: la presenza di una maggior quantità di stelle dovrebbe infatti favorire non solo le interazioni tra queste ma anche la diffusione di sistemi binari.

Per spiegare la costanza del numero di blue stragglers, fenomeno che va sotto il nome di anti-correlazione $F_{HB}^{BSS} - M_V$, è stata proposta una teoria che combina la presenza di sistemi binari e le interazioni dinamiche interne. Essa può essere semplicemente riassunta nella domanda: l'ambiente degli ammassi globulari riduce il numero di possibili progenitori di stelle blue stragglers?

Il nocciolo della questione è che le interazioni dinamiche modificano il numero di sistemi binari presenti negli ammassi globulari. Infatti, le collisioni possono non solo causare la fusione delle stelle binarie, rimuovendo quindi i sistemi in cui esse si trovano, ma anche distruggere i sistemi binari stessi. Inoltre, attraverso le interazioni tra sistemi binari e stelle singole, possono avvenire scambi di stelle: uno degli esiti più frequenti di tali interazioni, invero, è l'espulsione della stella meno massiva tra le due binarie, sostituita dalla stella interagente, solitamente più massiva, all'interno del sistema binario originario.

Ora, ci si aspetterebbe che, all'aumentare della massa dell'ammasso, venga incrementato anche il numero di collisioni che coinvolgono sistemi binari perché, essendo la dimensione (e quindi la sezione d'urto) dei sistemi binari maggiore di quella delle stelle singole, la probabilità che essi siano colpiti in ambienti densi di stelle è molto elevata. Tuttavia, il fatto che, negli scambi tra stelle in seguito ad interazioni, venga trattenuta all'interno del sistema binario la stella più massiva riduce il numero di sistemi binari che possano contribuire alla formazione di stelle blue stragglers. Infatti, qualora si verificasse la fusione, indotta da ulteriori collisioni, tra le due binarie, si otterrebbe una stella di massa molto maggiore di una blue straggler; inoltre, anche l'avvio del trasferimento di massa sarebbe in tal caso ostacolato, poiché entrambe le stelle del nuovo sistema binario avrebbero massa al contempo simile tra loro e superiore a quella del turn-off, cioè si troverebbero in una fase evolutiva post-sequenza-principale.

Ergo, si deduce che maggiore è la massa dell'ammasso, più il numero di blue stragglers prodotte in sistemi binari all'interno degli ammassi globulari diminuisce. Viceversa, il numero di blue stragglers generate per collisione dovrebbe in tal caso aumentare: i due effetti risulterebbero allora compensarsi, dando luogo alla distribuzione piatta osservata.

Questo ragionamento suggerisce quindi che l'evoluzione di sistemi binari isolati, attraverso trasferimento di massa, sia il principale canale di formazione di stelle blue stragglers in ambienti poco densi e che, al contrario, il meccanismo delle collisioni prevalga in ambienti più densamente popolati.

Assumendo che tale argomentazione sia corretta, risulta dunque possibile conciliare le previsioni teoriche con le osservazioni: la costanza del numero di blue stragglers in funzione della massa dell'ammasso globulare d'appartenenza sembra essere dovuta all'equilibrio che si viene a creare tra i due canali di formazione suddetti.

Per confermare la correttezza di tale ipotesi è utile separare il contributo dei sistemi binari primordiali da quello dato dalle collisioni alla produzione di stelle blue stragglers e valutarne l'andamento in funzione della magnitudine totale dell'ammasso globulare in esame. Si ottiene allora il seguente grafico:

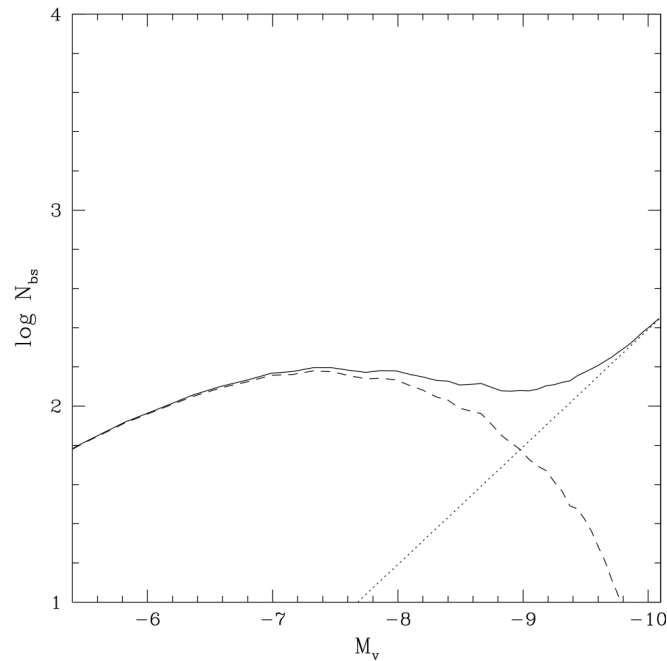


Figura 2: Contributi dei diversi canali di formazione di stelle blue stragglers

La linea tratteggiata mostra il contributo dei sistemi binari primordiali, mentre quella punteggiata indica il contributo delle collisioni al numero di blue stragglers osservato: le due curve, combinate insieme, producono la distribuzione piatta descritta dalla linea solida. Si nota allora che nelle regioni più esterne dell'ammasso (quelle meno brillanti, ossia con magnitudine assoluta meno negativa) l'evoluzione di sistemi binari primordiali è l'unico canale di formazione

di stelle blue stragglers, in quanto la curva tratteggiata e quella continua si sovrappongono. Al contrario, nelle regioni più interne dell'ammasso (quelle più luminose, ossia caratterizzate da magnitudine più negativa) sono presenti entrambi i meccanismi di formazione: le collisioni crescono linearmente a mano a mano che ci si avvicina al centro dell'ammasso poiché la densità di stelle aumenta, mentre il contributo dei sistemi binari primordiali crolla a zero a causa del predominio delle interazioni. Le due curve appena descritte riescono comunque a riprodurre la distribuzione piatta di blue stragglers osservata proprio per la condizione di equilibrio che si viene a creare tra i due canali: ciò comprova, pertanto, la validità della teoria proposta per giustificare la costanza del numero di blue stragglers.

2.1.2 La doppia sequenza di stelle blue stragglers in M30

La costanza del numero di blue stragglers osservato ha dimostrato che i meccanismi di formazione delle collisioni e dell'evoluzione di sistemi binari primordiali mediante trasferimento di massa possono coesistere all'interno del medesimo ammasso globulare. Una prova ancor più diretta di tale fenomeno è fornita dalla cosiddetta doppia sequenza di blue stragglers presente nell'ammasso globulare M30.

La scoperta della doppia sequenza di blue stragglers in M30 risale al 2009, anno in cui fu realizzato per la prima volta il diagramma colore-magnitudine di tale ammasso globulare:

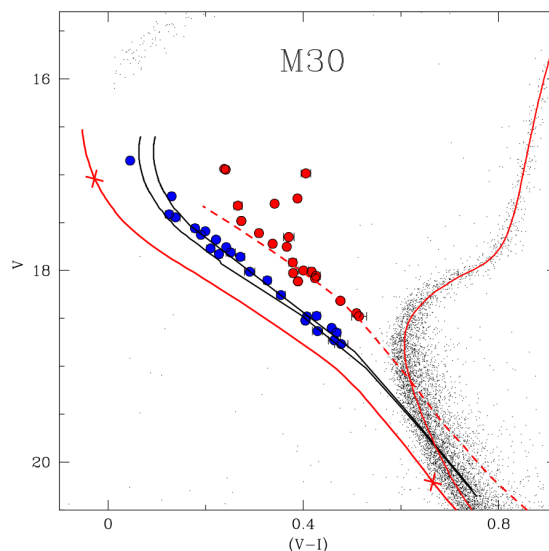


Figura 3: CMD dell'ammasso globulare M30

Nel diagramma sono facilmente riconoscibili due sequenze distinte di stelle blue stragglers: una blu, contenente 21 stelle, e una rossa, composta invece da 24 stelle. Le due sequenze presentano colore diverso e, di conseguenza, stelle blue stragglers con caratteristiche diverse: ergo, differenti devono essere anche i meccanismi di formazione alla base delle due sequenze. L'ipotesi più probabile in tal senso è, infatti, che la sequenza blu abbia origine di tipo collisionale, mentre la sequenza rossa sembrerebbe derivare dall'evoluzione di sistemi binari primordiali in cui è tuttora in corso il trasferimento di massa tra stelle compagne.

Ora, secondo la teoria dell'evoluzione stellare standard, le blue stragglers in entrambe le sequenze dovranno evolvere e passare alla fase di RGB, andando a riempire lo spazio vuoto tra le sequenze stesse: quindi il fatto che, al momento attuale, le due sequenze siano nettamente separate l'una dall'altra fa supporre che entrambe le popolazioni di stelle blue stragglers siano state generate da un evento breve e recente verificatosi all'interno di M30, non da un processo continuativo e di lunga durata. Se così non fosse, invero, si potrebbero osservare delle blue stragglers evolute nel gap tra le due sequenze.

Dunque, le due sequenze di blue stragglers in M30 devono aver avuto origine dallo stesso evento dinamico: si ritiene che si tratti del collasso del nucleo dell'ammasso globulare, come effettivamente dimostrato dalle osservazioni. L'aumento della densità centrale in M30 avrebbe infatti provocato un incremento significativo delle interazioni gravitazionali, favorendo quindi non solo il verificarsi delle collisioni tra stelle, ma anche l'innescò del trasferimento di massa in sistemi binari primordiali, attratti verso il centro dell'ammasso e surriscaldati dalla loro crescente vicinanza.

Da quest'ultima considerazione si deduce allora che le stelle blue stragglers possono essere direttamente collegate all'evoluzione dinamica degli ammassi globulari e fornire importanti informazioni sullo status di tali sistemi al momento attuale. La doppia sequenza di blue stragglers osservata nel diagramma colore-magnitudine di M30, pertanto, costituisce non un'anomalia circostanziale dovuta al concomitare di diversi meccanismi nella formazione di tali stelle, bensì un mezzo utile per ricostruire la storia di un ammasso globulare in generale. È probabile, infatti, che la doppia sequenza di blue stragglers possa essere una caratteristica tipica degli ammassi il cui nucleo ha subito collasso gravitazionale: tuttavia, risulta molto difficile osservare le due sequenze distinte per via della loro sovrapposizione, dovuta all'evoluzione delle blue stragglers in esse contenute.

2.1.3 La distribuzione radiale delle stelle blue stragglers

La distribuzione radiale delle blue stragglers costituisce un altro utile strumento non solo per l'analisi dei meccanismi relativi alla loro formazione, ma anche per lo studio dei processi fisici che hanno segnato l'evoluzione dinamica degli ammassi globulari che le contengono.

M3, in particolare, è stato il primo ammasso globulare per cui tale distribuzione è stata determinata:

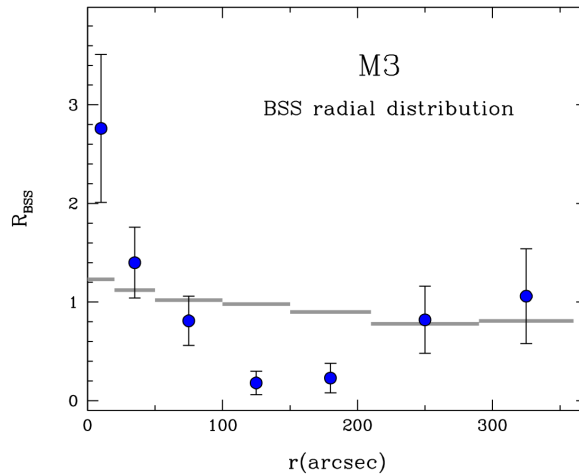


Figura 4: Distribuzione delle stelle blue stragglers nell'ammasso globulare M3

Come si può vedere nel grafico sopra riportato, la distribuzione di stelle blue stragglers in M3 è bimodale, cioè presenta due picchi ben definiti: uno in prossimità del centro dell'ammasso e l'altro nelle regioni più esterne, separati da un gap nelle regioni centrali che definisce quindi un minimo nella distribuzione. La spiegazione di tale andamento è da ricercarsi nell'azione dell'attrito dinamico, che influenza in modo diretto l'evoluzione degli ammassi globulari.

Supponendo, infatti, che tutte le blue stragglers osservate abbiano avuto origine collisionale, si può pensare che il rinculo dovuto alle interazioni forti abbia spinto alcune di tali stelle nelle regioni esterne di M3. A questo punto la sorte delle stelle bruscamente allontanate dal centro dell'ammasso dipende dall'intensità del rinculo: se il rinculo non è abbastanza energetico, le blue stragglers tendono a ritornare rapidamente verso le regioni centrali per effetto del confinamento di massa, mentre, se esso ha energia sufficiente a contrastare tale fenomeno, le blue stragglers dovrebbero essere in grado di spingersi a distanze maggiori, quindi la loro ricaduta verso il centro risulterebbe molto più lenta.

Tuttavia, simulazioni Monte Carlo della dinamica di M3, nell'ipotesi di attività del solo canale di formazione collisionale, hanno mostrato che, in realtà,

le blue stragglers finite nelle regioni esterne in seguito a rinculo dovrebbero o ricadere verso il centro dell'ammasso o abbandonare quest'ultimo definitivamente: ergo, non si potrebbe in tal modo giustificare la presenza del secondo picco osservato nella distribuzione radiale.

Si deduce, pertanto, che la distribuzione radiale bimodale non può essere spiegata con una popolazione di blue stragglers di tipo puramente collisionale: bisogna allora assumere che una frazione di tali stelle abbia avuto origine mediante trasferimento di massa in sistemi binari che, trovandosi nelle regioni più esterne di M3, hanno potuto evolvere liberamente in quanto non soggetti ad interazioni.

Ora, poichè recenti osservazioni hanno evidenziato che la maggior parte degli ammassi globulari presenta una distribuzione bimodale di stelle blue stragglers, si ricava che è proprio l'attrito dinamico caratteristico di tali ambienti ad essere responsabile dell'andamento osservato, attraverso il confinamento di massa di cui le blue stragglers, essendo stelle massive, avvertono inevitabilmente l'effetto. In particolare, il fatto che una stella blue straggler subisca il confinamento di massa dipende dalla sua distanza dal centro dell'ammasso globulare cui appartiene: si definisce a tal proposito un raggio critico R_{min} entro il quale le stelle blue stragglers vengono confinate e al di là del quale esse non si muovono, invece, dalla posizione originaria. In questo senso, quindi, R_{min} corrisponde al minimo della distribuzione radiale bimodale, in quanto non è possibile che una stella blue straggler risieda in tale ubicazione.

Dal momento che l'efficacia del confinamento di massa diminuisce all'aumentare della distanza radiale dal centro dell'ammasso, è chiaro che saranno confinati prima gli oggetti più massivi che si trovano nelle regioni centrali. Col passare del tempo, però, tale effetto verrà esteso a regioni sempre più lontane dal centro dell'ammasso, lasciando quindi un gap, ossia un'area completamente priva di stelle, il cui confine si trova a distanza R_{min} . Si deduce allora che tale minimo nella distribuzione radiale tenderà a spostarsi progressivamente verso l'esterno al procedere del confinamento di massa, fino a che saranno raggiunte le blue stragglers derivanti dall'evoluzione di sistemi binari isolati. Se ciò accade, tali stelle saranno costrette a spostarsi verso le regioni centrali, determinando così la scomparsa del secondo picco della distribuzione: per ammassi globulari molto evoluti, pertanto, la distribuzione radiale delle blue stragglers non è bimodale, bensì caratterizzata da un unico picco centrale.

Da tali considerazioni si può quindi trarre una tanto importante quanto manifesta conclusione: la distribuzione radiale di stelle blue stragglers in ammassi globulari si rivela essere un vero e proprio indicatore dell'età di tali sistemi stellari. Infatti, più l'attività dinamica di un ammasso è significativa e più questo si trova in uno stato evolutivo avanzato, ovvero maggiore è la sua età.

A seconda della forma della distribuzione radiale delle blue stragglers si possono allora individuare tre famiglie di ammassi di età progressivamente maggiore:

1. Distribuzione radiale piatta → tipica degli ammassi globulari poco evoluti, in cui l'azione del confinamento di massa è trascurabile.
2. Distribuzione radiale bimodale → tipica degli ammassi globulari mediamente evoluti, in cui il confinamento di massa ha isolato parte della popolazione di blue stragglers osservata.
3. Distribuzione radiale con un unico picco centrale → tipica degli ammassi globulari molto evoluti, in cui il confinamento di massa ha isolato tutte le stelle blue stragglers in essi presenti.

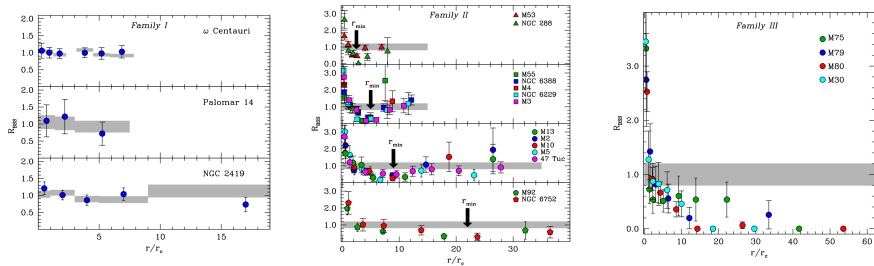


Figura 5: Da sinistra a destra: distribuzione radiale piatta, bimodale e con un unico picco centrale

Come nota conclusiva di tale sezione, è bene sottolineare che la suddivisione appena descritta prescinde dai meccanismi di origine delle stelle blue stragglers osservate: quindi, nel caso specifico della distribuzione bimodale, non c'è necessità di assumere che i canali di formazione contribuenti ai due picchi siano diversi. Ciò significa che la distribuzione radiale di stelle blue stragglers costituisce uno strumento di analisi dell'evoluzione dinamica di un sistema stellare universale, ossia applicabile anche in altri ambienti, come gli ammassi aperti e le galassie nane.

2.2 Ammassi aperti

Gli ammassi aperti sono sistemi stellari meno densamente popolati degli ammassi globulari: le stelle al loro interno risentono meno della reciproca attrazione gravitazionale e sono quindi meno legate, cosa che spiega la caratteristica forma irregolare di tali ammassi. Essi sono anche chiamati ammassi galattici in quanto situati esclusivamente nel disco galattico: ergo, si tratta di strutture giovani e

tuttora in formazione, contenenti stelle calde e luminose (soprattutto di tipo O e di tipo B).

Sebbene differiscano notevolmente dagli ammassi globulari, anche gli ammassi aperti risultano essere ambienti adatti ad ospitare stelle blue stragglers. Tuttavia, il ruolo dei due diversi meccanismi che danno origine a tali stelle viene radicalmente ridimensionato: a causa della minore densità di massa degli ammassi aperti rispetto agli ammassi globulari, prevale il canale di formazione dell'evoluzione di sistemi binari primordiali mediante trasferimento di massa, anziché quello collisionale. Infatti, minore è la quantità di stelle contenuta in un ammasso e minore è la probabilità che queste interagiscano tra loro dando luogo a collisioni.

2.2.1 Un ammasso aperto importante: NGC 188

Il primo ammasso aperto in cui siano state osservate stelle blue stragglers è stato M67 (Johnson e Sandage, 1955); segue poi NGC 188, uno degli ammassi aperti più vecchi (7 Gyrs) e ricchi della Via Lattea: esso contiene 20 blue stragglers.

In particolare, NGC 188 è stato uno degli ammassi aperti più studiato in termini di blue stragglers. Tale indagine ha fornito i seguenti risultati:

1. Delle 20 blue stragglers osservate, 16 sono state identificate con certezza come binarie spettroscopiche, mentre le restanti 4 sono presumibilmente stelle isolate in quanto aventi velocità radiale non variabile nel tempo.
2. È stato possibile osservare le stelle compagne di 14 delle 16 blue stragglers binarie e misurarne la massa; la distribuzione del numero di stelle compagne in funzione della loro massa ha evidenziato un picco a $0.5M_{\odot}$: tale valore ha un particolare significato, in quanto rappresenta la massa tipica di stelle nane bianche di CO in seguito al trasferimento di massa da parte di una stella donatrice di AGB.

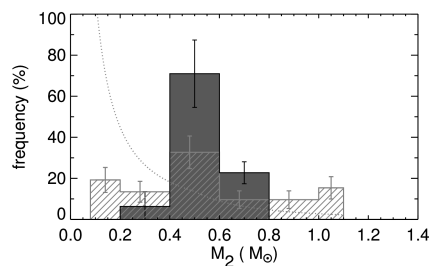


Figura 6: Distribuzione del numero di stelle compagne di blue stragglers in sistemi binari in funzione della loro massa

3. I sistemi binari composti da una blue straggler e da una stella nana bianca di CO sono caratterizzati da un lungo periodo orbitale: 13 hanno periodo orbitale di 1000 giorni, mentre uno soltanto periodo orbitale di 100 giorni. I rimanenti 2 sistemi binari presentano invece periodo orbitale molto breve, inferiore ai 10 giorni.
4. Dalla misura delle velocità di rotazione di tutte le stelle di NGC 188 è emerso che le blue stragglers ruotano più velocemente delle normali stelle di sequenza principale, caratteristica comune nelle stelle che hanno subito trasferimento di massa.
5. La distribuzione radiale delle blue stragglers in NGC 188 è bimodale come atteso per un sistema stellare mediamente evoluto: NGC 188 presenta dunque traccia dell'azione del confinamento di massa.
6. Nell'alone di NGC 188 è stato identificato un sistema binario (ID 7782) contenente due blue stragglers: tale configurazione si spiega solo ipotizzando che ci siano state delle interazioni in seguito a cui si è verificato lo scambio tra la stella meno massiva del sistema binario originario e la stella con esso interagente. Ciò è confermato dal fatto che le due blue stragglers binarie presentano diversa temperatura superficiale: esse si dovrebbero trovare, pertanto, in fasi evolutive differenti. Infatti, nessun meccanismo fisico sarebbe in grado di giustificare la simultanea formazione di due blue stragglers all'interno di un unico sistema binario.

Sembra quindi che le blue stragglers in NGC 188 derivino dalla naturale evoluzione di sistemi binari primordiali in cui ha avuto luogo il trasferimento di massa dalla stella più evoluta alla stella compagna. Tuttavia, ciò non significa che nell'ammasso aperto non siano avvenute interazioni tra stelle, come mostrato dal sistema binario anomalo ID 7782: si tratta, però, di eventi rari, data la bassa densità di massa di NGC 188.

Infine, anche nel caso degli ammassi aperti le blue stragglers possono fungere da traccianti dell'età: la distribuzione bimodale di tali stelle è un chiaro segno della piena attività del processo di confinamento di massa all'interno di NGC 188, che si configura, di conseguenza, come ammasso aperto di media età.

2.2.2 Il modello N-body di NGC 188

I modelli N-body permettono di simulare la dinamica di un sistema stellare una volta selezionati determinati parametri fisici di riferimento: essi costituiscono, quindi, un utile strumento per confrontare le aspettative teoriche con i risultati ottenuti attraverso le osservazioni.

In particolare, il modello N-body di NGC 188 è stato realizzato nel modo seguente. Sono state implementate 20 simulazioni dell'evoluzione di NGC 188 partendo da popolazioni stellari originarie differenti: sono stati cioè scelti in ciascun caso parametri iniziali diversi sia per le singole stelle sia per i sistemi binari e i vari modelli così ricavati sono stati poi combinati tra loro (quest'ultima operazione viene effettuata qualora si vogliono analizzare piccoli gruppi di stelle, in modo da ridurre gli effetti stocastici) per ottenere un unico modello complessivo.

Il modello N-body di NGC 188 risulta compatibile con le caratteristiche dell'ammasso, in quanto i parametri fisici simulati corrispondono in generale a quelli reali: dunque esso può essere considerato una buona descrizione dell'ambiente natio delle stelle blue stragglers che si vogliono studiare.

Utilizzando il modello N-body di NGC 188 è infatti possibile predire quali siano stati i meccanismi di formazione di tali stelle. Si trova allora che:

1. Le blue stragglers in sistemi binari con lungo periodo orbitale sono probabilmente state generate mediante il caso C del trasferimento di massa, poiché le loro stelle compagne sono nane bianche di CO discendenti da stelle donatrici di AGB, in ottimo accordo con le osservazioni. Tuttavia, il modello sottostima il numero di blue stragglers formatesi attraverso questo meccanismo: tale deficit di blue stragglers dimostra quindi che il modello è incompleto. A tal proposito, è possibile che l'insufficienza del modello sia dovuta ad un'assegnazione non abbastanza accurata dei parametri iniziali ai sistemi binari.
2. Le blue stragglers in sistemi binari con periodo orbitale inferiore a 10 giorni sono state plausibilmente originate da collisioni e successivamente entrate a far parte del sistema binario che attualmente le ospita. È dunque questo il caso del sistema binario contenente due blue stragglers ID 7782.
3. Il modello produce 5 blue stragglers in sistemi binari con stelle compagne non identificabili e associa loro i meccanismi di formazione collisionale e di fusione in ugual misura. Si ipotizza allora che tali blue stragglers corrispondano alle 4 stelle isolate osservate e che la loro origine derivi proprio da interazioni con altre stelle.

In conclusione, si evince che il modello N-body di NGC 188, nonostante necessiti ancora di alcune modifiche strutturali, riesce a riprodurre nel complesso lo scenario osservato e conferma che la maggior parte delle stelle blue stragglers presenti nell'ammasso aperto ha avuto origine per trasferimento di massa all'interno di sistemi binari primordiali.

2.3 Galassie nane

Per galassia nana si intende una galassia di piccole dimensioni e composta da un numero di stelle variabile da 100 milioni ad alcuni miliardi, poche se confrontate con quelle presenti negli ammassi globulari: si tratta quindi di sistemi stellari meno densi di stelle e quindi meno luminosi degli ammassi, sebbene abbiano dimensioni maggiori. Inoltre, il fatto che le galassie nane siano oggetti molto più distanti rispetto agli ammassi globulari galattici, contribuisce a diminuire ulteriormente la loro luminosità.

In analogia con gli ammassi globulari, anche le galassie nane di tipo sferoidale contengono stelle blue stragglers che, nel diagramma colore-magnitudine, si dispongono in un gruppo a sé stante, situato a sinistra della sequenza principale. Tuttavia, a causa della debole luminosità di tali ambienti, per i motivi sopra elencati, risulta molto spesso difficoltoso distinguere le blue stragglers da vere e proprie stelle di sequenza principale particolarmente giovani e blu: è dunque necessario stabilire un criterio identificativo che permetta di riconoscere le blue stragglers a partire dal diagramma colore-magnitudine.

Uno dei metodi più efficaci in tal senso consiste nella selezione, all'interno del diagramma colore-magnitudine delle galassie nane, di un intervallo di luminosità e di colore rappresentativo delle blue stragglers: facendo riferimento al diagramma colore-magnitudine degli ammassi globulari, in cui la funzione di luminosità di tali stelle decresce da $M_V \approx 1.9$ a $M_V \approx 4$, che è la magnitudine assoluta tipica del turn-off, si stima che la sequenza di blue stragglers termini a $\Delta M_v \approx 0.6$ al di sotto di questo.

Ciononostante, questo criterio non sempre può essere applicato nei diagrammi colore-magnitudine delle galassie nane: un caso lampante di tale inattuabilità è quello di Fornax.

Questa galassia nana mostra traccia di un recente episodio di formazione stellare che ha provocato un aumento del numero di stelle di sequenza principale. Ora, il fatto che nuove stelle entrino a far parte della sequenza principale appartenendo ad una popolazione diversa da quella originaria implica l'introduzione di un secondo turn-off: ciò rende impossibile, pertanto, determinare con certezza la magnitudine del vecchio turn-off della sequenza principale, su cui il criterio identificativo delle blue stragglers si basa. La contaminazione da parte di stelle di sequenza principale giovani, quindi, costituisce un notevole ostacolo nella ricerca di stelle blue stragglers in galassie nane.

Stanti tali difficoltà di tipo osservativo, definire un campione omogeneo e affidabile di galassie nane in termini di identificazione di blue stragglers risulta un'operazione nient'affatto banale: infatti, attualmente sono soltanto 12 le galassie nane selezionate come ideali ambienti di studio di tali stelle.

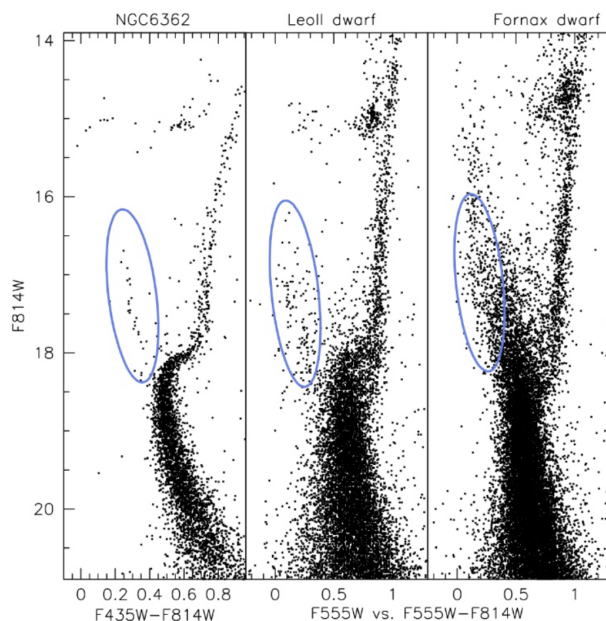


Figura 7: Da sinistra a destra i pannelli mostrano i CMDs delle galassie nane NGC 6362, Leo II e Fornax. L'ellisse delimita approssimativamente la regione delle blue stragglers in NGC 6362 e in Leo II, mentre in Fornax non risulta possibile determinare con certezza tale area a causa della contaminazione da parte delle stelle di sequenza principale.

Per questo campione di galassie nane è stato possibile stimare il valor medio del parametro collisionale, che si attesta a $\log \Gamma_{DGs} \approx -11.5$: poiché il parametro di collisione per gli ammassi globulari vale tipicamente $\log \Gamma_{GCs} \approx -7.5$, una misura ben maggiore di quella precedente, si può concludere che le collisioni non sono il principale meccanismo di formazione di stelle blue stragglers nelle galassie nane.

Viceversa, essendo le galassie nane ambienti poco densi di stelle, è probabile che sia soprattutto l'evoluzione di sistemi binari primordiali a contribuire alla produzione delle blu stragglers in esse osservate.

2.4 Blue stragglers di campo

Sorprendentemente, nell'alone della Via Lattea sono presenti migliaia di blue stragglers, la cui origine sembra essere legata a quella dell'alone stesso: si tratta quindi di un'origine in situ. Inoltre, le blue stragglers d'alone sono solitamente chiamate blue stragglers di campo, in quanto non si trovano all'interno di sistemi stellari come gli ammassi o le galassie nane.

L'identificazione di tali blue stragglers si basa su metodi che permettano di distinguerle in primis dalle altre stelle d'alone, e poi dalle stelle di disco.

Nel primo caso si utilizza il sistema fotometrico UBV poiché le quantità (U-B) e (B-V) sono, rispettivamente, buoni indicatori della metallicità e della temperatura delle stelle di alone: in questo modo è possibile costruire un diagramma colore-colore per isolare i candidati blue stragglers dalle altre stelle di alone. Esistono però procedure più specifiche in tal senso: per separare nettamente le blue stragglers dalle stelle di BHB nell'alone, si sfrutta la larghezza delle righe di CaII, K e della serie di Balmer nello spettro stellare come indicatori di abbondanza chimica e di gravità superficiale, mentre, per distinguere le blue stragglers dalle stelle di sequenza principale nell'alone, è utile determinarne l'età, in quanto queste ultime, sebbene siano loro simili, risultano in realtà più vecchie.

Nel secondo caso, invece, è opportuno misurare la metallicità dei candidati blue stragglers d'alone, poiché le stelle d'alone hanno tipicamente metallicità minore di quelle di disco.

Per quanto concerne i meccanismi di formazione delle blue stragglers d'alone, si ritiene con quasi assoluta certezza che tali stelle derivino dall'evoluzione di sistemi binari primordiali, conformemente all'ipotesi di origine in situ sopra citata. Questa conclusione certo non stupisce: infatti, l'alone galattico è molto simile, in quanto a densità di stelle, alle galassie nane, il cui principale canale di produzione di stelle blue stragglers è proprio il trasferimento di massa all'interno di sistemi binari isolati. In particolare, non si esclude l'eventualità di formazione di blue stragglers in sistemi binari con breve periodo orbitale in seguito all'interazione tra membri di sistemi tripli situati anch'essi nell'alone.

3 Ruolo delle stelle blue stragglers nello spettro integrato di popolazioni stellari singole

In sintesi di popolazioni, per spettro integrato di una popolazione stellare singola (ISED) si intende la somma degli spettri delle singole componenti brillanti della popolazione.

L'ISED viene solitamente associata agli ammassi e le blue stragglers, essendo le stelle blu più luminose all'interno del diagramma colore-magnitudine di un ammasso, forniscono uno dei principali contributi alla luminosità totale di una popolazione stellare singola.

Tuttavia, l'evoluzione stellare standard, cioè riguardante le singole stelle, non riesce a spiegare la presenza di blue stragglers all'interno di una popolazione stellare singola, in quanto la loro origine è legata all'interazione tra stelle.

Per questa ragione i modelli teorici standard per le popolazioni stellari singole non includono l'apporto delle blue stragglers alla luminosità totale: di conseguenza, l'ISED realizzata utilizzando i dati osservativi, che non omettono tale fondamentale contributo, sarà significativamente diversa da quella teorica.

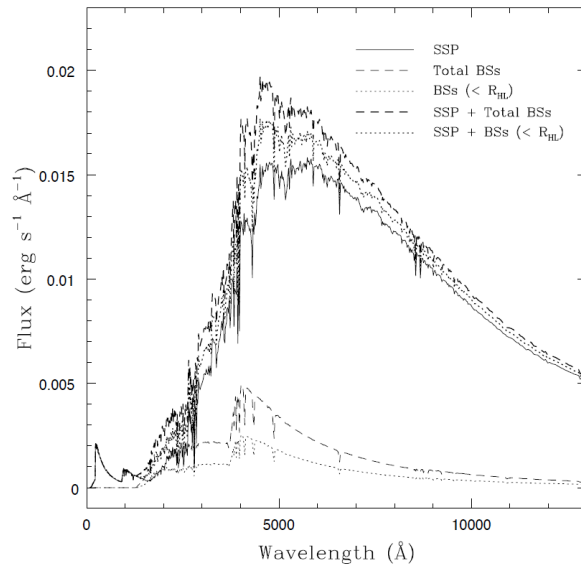


Figura 8: In figura sono mostrate le ISEDs di un ammasso tenendo conto in modo diverso del contributo delle BSSs: è evidente il cambiamento del profilo della distribuzione da un caso all'altro.

L'incompletezza dei modelli teorici per le popolazioni stellari singole costituisce, purtroppo, un problema di non facile risoluzione: infatti, poiché negli ammassi coesistono meccanismi di formazione di blue stragglers diversi, è difficile stimare con precisione l'incidenza di ciascun canale e creare un modello ad hoc che tenga conto di tali differenze.

Ancora molto lavoro resta da fare, quindi, per migliorare la comprensione dei meccanismi di formazione di tali stelle e il loro ruolo all'interno delle popolazioni stellari singole. È certo, però, che la scoperta delle blue stragglers, sebbene recente, ha segnato un punto di svolta nello scenario non solo dell'evoluzione stellare, ma anche della dinamica degli ammassi, in quanto ormai è impossibile negare che il contributo di tali stelle sia essenziale.

Bibliografia

- Cannon R. in *Blue straggler stars: early observations that failed to solve the problem*
- Dalessandro E., Ferraro F., Lanzoni B., Lovisi L. & Mucciarelli A. in *Blue Stragglers in globular clusters: a powerful tool to probe the internal dynamical evolution of stellar systems*
- Davies M. in *Formation channels for blue straggler stars*
- Deng L. & Xin Y. in *Blue stragglers in clusters and integrated spectral properties of stellar populations*
- Geller A. & Mathieu R. in *The blue stragglers of the open cluster NGC 188*
- Ivanova N. in *Binary evolution: Roche Lobe Overflow and blue stragglers*
- Knigge C. in *Blue stragglers in globular clusters: observations, statistics and physics*
- McMillan S. in *Dynamical processes in globular clusters*
- Momany Y. in *The blue straggler population in dwarf galaxies*
- Perets H. in *The multiple origin of blue straggler stars: theory vs. observations*
- Preston G. in *Field blue stragglers and related mass transfer issues*

in Boffin H., Carraro G., Beccari G. (a cura di), *Ecology Of Blue Straggler Stars*, s.l., Springer, 2014.