



**UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA**

Università degli studi di Padova

Dipartimento di Fisica e Astronomia “Galileo Galilei”

Corso di Laurea Triennale in Astronomia

**Calibrazione della scala delle distanze
tramite TRGB per la definizione della
costante di Hubble**

Relatore:

Prof. Paolo Cassata

Candidato:

Alberto Lo Conte

Matricola 1170039

ANNO ACCADEMICO 2021/2022

Abstract

Il problema che affronteremo in questa tesi è la tensione sul valore del parametro di Hubble misurato nella nostra epoca cosmica, ossia $H(t_0) = H_0$. Esiste una discrepanza fra il valore calcolato tramite *Early measurements* e tramite *Late measurements*. Le prime misurazioni nascono da un modello teorico, il Λ CDM, applicato ad un Universo primordiale (da qui l'aggettivo *Early*) e del quale viene predetta l'evoluzione fino alla nostra epoca, alla quale viene misurato H_0 . Le seconde sono misurazioni effettuate ai giorni nostri: tramite una scala di distanze si calibrano i parametri delle supernovae, le quali, disposte in un grafico di Hubble, forniscono il valore di H_0 . Per risolvere questa tensione si è agito su entrambi i tipi di misurazione: sono state sviluppate teorie e modelli volti a modificare la teoria del Λ CDM e al contempo sono state testate diverse scale di distanze per la calibrazione delle supernovae. Nonostante le varie proposte la tensione fra i due valori rimane, rendendo le misure incompatibili, fatta eccezione per la scala delle distanze che utilizza il *Tip of the Red Giant Branch* (TRGB) come calibratore locale delle distanze. Lo scopo di questa tesi è capire se utilizzando questo metodo per calibrare la distanza delle supernovae si può ottenere un valore di H_0 che riduce questa tensione.

Indice

Capitolo I: La nascita della tensione

- 1.1 Il parametro di Hubble e l'espansione accelerata dell'Universo
- 1.2 *Early Measurements*
- 1.3 *Late Measurements*

Capitolo II: Soluzioni proposte per risolvere la tensione

- 2.1 Soluzioni proposte per risolvere la tensione
- 2.2 Modifiche alle *Early Measurements*

Capitolo III: Calibrazione TRGB e supernovae

- 3.1 Calibrazione magnitudine assoluta TRGB
- 3.2 Calibrazione magnitudine assoluta supernovae
- 3.3 Confronto TRGB e Cefeidi
- 3.4 Correzione magnitudine apparente supernovae

Capitolo IV: Grafico di Hubble

- 4.1 Come ottenere un valore per H_0
- 4.2 Primo grafico di Hubble, singola correzione
- 4.3 Secondo grafico di Hubble, tripla correzione

Conclusioni

CAP I: La nascita della tensione

1.1 Il parametro di Hubble e l'espansione accelerata dell'Universo

Il moto di espansione dell'Universo fu scoperto per la prima volta da Hubble nel 1929. Osservando oggetti lontani scoprì una relazione fra la distanza a cui essi si trovavano il loro redshift, interpretato come effetto Doppler. Questa proporzionalità è espressa nella legge di Hubble:

$$V = Hd \tag{1}$$

V è la velocità di recessione, d è la distanza dell'oggetto e H è la costante di Hubble.

Secondo questa equazione, maggiore è la distanza di un oggetto, maggiore sarà la sua velocità di allontanamento: il fattore che lega queste due quantità è la costante di Hubble H , con unità di misura $H_0 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$. Si nota dall'unità di misura come questa costante sia quindi profondamente legata al concetto di distanza.

La velocità a cui si fa riferimento dipende solamente dal moto di espansione dell'Universo, e non dai moti peculiari propri degli oggetti. Se supponiamo tutta la materia dell'Universo distribuita omogeneamente, allora la possiamo immaginare come un fluido, che prende il nome di substrato cosmico. Il moto descritto nella legge di Hubble è dato dalla distensione di questo substrato, e non dai movimenti peculiari che gli oggetti hanno al suo interno. Per una trattazione più completa si potrebbe aggiungere all'equazione un termine legato alla velocità peculiare dell'oggetto, rendendo la formula:

$$V_{tot} = Hd + V_{pec} \tag{2}$$

Nelle osservazioni a distanza cosmologiche il secondo fattore può essere trascurato.

Una volta definita questa legge è immediato collegare quindi la costante di Hubble all'espansione dell'Universo. Un'altra equazione che possiamo scrivere per H usa il parametro di scala $a(t)$. Questo parametro stabilisce come si espanda o si contragga l'Universo ad un determinato tempo cosmico t . Se pensiamo ad un sistema di riferimento solidale con il substrato che associa quindi ad una misura di distanza d un valore r , ossia una distanza comovente, la relazione che lega queste due quantità è:

$$d(t) = \frac{a(t)}{a_0} r \quad (3)$$

Dove a_0 è $a(t_0)$ con t_0 tempo cosmico attuale. Possiamo sostituire questa equazione nella equazione (1) e ottenere:

$$H(t) = \frac{\dot{a}}{a(t)} \quad (4)$$

Poiché a è in funzione del tempo, la stessa dipendenza avrà H . Otteniamo quindi $H = H(t)$, e denotando con t_0 l'epoca cosmica nella quale viviamo, troveremo che l'espansione dell'Universo ai giorni nostri è legata alla costante $H(t_0) = H_0$. Possiamo identificare H_0 come una costante grazie al fatto che le variazioni sul valore del parametro di Hubble nel tempo sono apprezzabili su intervalli molto ampi.

Esiste un altro fattore legato alla derivata seconda del fattore di scala a : è chiamato q ed è definito come

$$q = \frac{-\ddot{a}}{a(t)H_0^2} \quad (5)$$

Questo parametro indica alla decelerazione, dato il segno meno, dell'espansione dell'Universo.

Il dibattito sul valore di questi due parametri H e q è tutt'ora acceso. Trovare il valore di queste due quantità ci aiuterebbe a identificare meglio il modello di Universo in cui viviamo. Un valore positivo per q significherebbe l'esistenza di una decelerazione nell'espansione e la conseguenza di ciò potrebbe essere un Universo destinato a espandersi infinitamente o destinato, ad una precisa epoca cosmica, a invertire il senso dell'espansione, cominciando un moto di contrazione che porterebbe ad un *Big Crunch*. Al contrario, un valore negativo di q significherebbe un'espansione accelerata, e quindi un futuro in cui l'Universo continuerebbe ad espandersi ad un ritmo sempre più sostenuto. In entrambe le situazioni, il parametro di Hubble ci darebbe informazioni utili a collocare la nostra epoca cosmica nelle linee temporali descritte sopra: a seconda del valore di q , H ci darebbe un'idea sull'anzianità del nostro Universo.

Nel '900, considerando un valore di q positivo, le proposte per il valore della costante di Hubble erano principalmente due: la prima proponeva un valore di $H_0 = 50 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$, supponendo quindi un Universo relativamente vecchio e in espansione lenta. La seconda invece portava H ad un valore di $100 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$, legandosi quindi ad un Universo più giovane e con un tasso di espansione molto maggiore.

Il *Supernova Cosmology Project*, nei primi anni del 2000 arrivò alla conclusione, grazie a delle osservazioni, che il valore di q era negativo e riuscirono ad ottenere un valore di circa $72 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ per la costante di Hubble (*Riess et al. 1998, Perlmutter et al 1999*)

Negli anni successivi sono nate varie proposte per spiegare questa accelerazione dell'espansione, la maggior parte delle quali trova una spiegazione nella materia o nell'energia oscura. Essendo difficile valutare quale teoria fosse più promettente, si è scelta come prima da sottoporre a test quantitativi la più semplice da calibrare e utilizzare. Prende il nome di Lambda Cold Dark Matter (Λ CDM), dove λ è la costante cosmologica, associata all'energia oscura, e la materia oscura viene trattata come fredda e non interagente con la materia barionica. La strada intrapresa per valutare la bontà dei risultati forniti da questa teoria prevede il confronto fra un Universo fittizio e l'Universo nel quale viviamo oggi. Dal primo, creato implementando al suo interno solo la Λ CDM e fatto evolvere fino alla nostra epoca cosmica sempre secondo la stessa teoria, si estraggono dati su alcuni parametri, che vengono poi confrontati con i valori degli stessi

parametri ottenuti tramite osservazioni nel nostro Universo. Uno di questi è la costante di Hubble.

1.2 *Early Measurements*

Il processo di creazione di un Universo immaginario, parallelo al nostro, richiede una teoria solida, capace di permettere previsioni, e una conoscenza della composizione iniziale dell'Universo da cui partire.

Un Universo primordiale regolato dalla teoria del Λ CDM sarebbe composto principalmente da materia oscura (70% circa), e il resto, da atomi, fotoni e neutrini. Una tale composizione produrrebbe delle fluttuazioni su particolari fenomeni come la CMB, oggetto dal quale si può dedurre la costante di Hubble. Ad oggi conosciamo la composizione dell'Universo dopo il Big Bang, subito prima della ricombinazione ($z \sim 1000$), principalmente dall'analisi della CMB: questo oggetto presenta una perfetta forma spettrale di corpo nero. Prima della ricombinazione, quando l'Universo era completamente opaco, gli urti fra particelle e fra particelle e fotoni erano talmente frequenti da creare un perfetto equilibrio fra materia e radiazione, che corrisponde ad un perfetto spettro di Planck. La ricombinazione può essere considerata come la *superficie di ultimo scattering* della CMB. Confrontando questi due ambienti attraverso le fluttuazioni sui parametri citate prima, possiamo calibrare i parametri del Λ CDM.

A questo punto, possiamo far evolvere l'Universo che abbiamo costruito fino alla nostra epoca cosmica, e osservarne le caratteristiche, tra le quali la costante di Hubble. I dati che otteniamo in questo modo rientrano nel nome di *Early Measurements*.

Un gruppo di ricercatori nel 2018 ha ultimato lo studio delle *Early Measurements* e nel loro articolo *Planck Collaboration et al. (2018)* ha riportato $H_0 = 67.4 \pm 0.5 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$. Questo è il valore del parametro di Hubble alla nostra epoca cosmica in un Universo regolato dal Λ CDM.

1.3 *Late Measurements*

Un altro gruppo di scienziati, tra cui il premio Nobel per la fisica Adam Riess, ha invece calcolato la costante di Hubble alla nostra epoca cosmica tramite osservazioni (*Riess et al 2016*). La costante di Hubble è legata alla distanza e alla velocità di recessione: conoscendo questi dati su un numero cospicuo di oggetti abbastanza lontani, sarebbe possibile fornire un valore per H ottenuto solamente tramite osservazioni.

I passi richiesti per ottenere un tale dato sono molteplici, e la maggior parte delle difficoltà si concentra nella misura delle distanze. Lo strumento più efficiente ed immediato che viene utilizzato per ottenere questi dati è la scala di distanze: essa consente, tramite calibrazioni successive di candele standard, di arrivare a conoscere con precisione a distanze anche molto elevate. È necessario riuscire ad ottenere dati sulla distanza di oggetti lontani, in modo da rendere trascurabili le loro velocità peculiari.

Vengono chiamati candele standard gli oggetti che presentano delle caratteristiche particolari, fondamentali per il calcolo della loro distanza. Di seguito sono descritte le due candele utilizzate in *Riess et al. (2016)* per calcolo della costante di Hubble.

Le Cefeidi sono stelle giovani, generalmente di massa superiore alle 5 masse solari, che vivono nei bracci di spirale delle galassie. La loro particolarità è la periodicità con la quale varia la loro luminosità. Nel 1912 H. Leavitt scoprì la relazione presente fra la magnitudine assoluta di questi oggetti e il periodo della pulsazione. Osservando le magnitudini apparenti, attraverso il modulo di distanza è possibile conoscere la distanza di questi oggetti.

Le Supernovae Ia sono oggetti che nascono dall'esplosione di una nana bianca. Il meccanismo non è ancora perfettamente chiaro, ma l'ipotesi più accreditata è che due nane bianche in un sistema binario scambino materiale fra di loro. In particolare, una delle due cede massa all'altra, che cresce fino a superare la massa critica di Chandrasekhar, momento nel quale viene innescata l'esplosione. Le supernovae Ia hanno magnitudini apparenti molto importanti e possono essere quindi viste a distanze estremamente elevate. Il comportamento caratteristico di questi oggetti una volta innescata l'esplosione è un aumento molto rapido della luminosità, che dopo aver raggiunto un picco è destinata a calare. La particolarità di questi oggetti è che la magnitudine

assoluta al picco di luminosità, corretta tramite relazioni che verranno spiegate più avanti, è la medesima per tutte le supernovae. Una volta osservata la magnitudine apparente al picco, è possibile, sempre tramite il modulo di distanza, conoscere la distanza dell'oggetto.

Le relazioni esistenti fra grandezze misurabili di questi oggetti richiedono di essere calibrate: è necessario come prima cosa sfruttare tecniche geometriche come la parallasse per ottenere la distanza di alcune Cefeidi e in tal modo calibrare la relazione periodo luminosità. La distanza massima a cui le tecniche geometriche possiamo funzionare sta intorno al Megaparsec. Una volta calibrata, possiamo spingerci più lontano e cercare galassie che ospitano sia Cefeidi e Supernovae, ad una distanza di circa 40Mpc. Tramite la relazione periodo luminosità già calibrata, troviamo la distanza della Cefeide, per estensione anche la distanza della supernova e quindi possiamo, osservata la sua magnitudine apparente, calibrare la magnitudine assoluta di picco di questi oggetti. A questo punto, possiamo conoscere ottenere la distanza di supernovae nell'intervallo fra il Gpc e un redshift di 0.1 circa. Quest'ultima classe di oggetti permette di spingersi anche a distanze molto maggiori, intorno ad un redshift di circa 2.

Con questi dati di distanza uniti ai dati sul redshift (ossia sulla velocità di recessione), è possibile trovare H.

Il risultato di queste *Late Measurements* è un valore del parametro di Hubble, riportato in *Riess et al. (2016)*. $H_0 = 73.24 \pm 1.74 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$

I valori del parametro di Hubble ottenuti da *Early e Late Measurements* non sono compatibili, trovandosi a più di tre sigma l'uno dall'altro.

CAP. II: Soluzioni proposte per risolvere la tensione

A fronte di questa inconsistenza sul valore del parametro di Hubble molte sono le proposte nate per risolvere questa tensione: alcune indagano gli errori sistematici che affliggono i due metodi di misura di H_0 , altre propongono cambiamenti più o meno radicali lungo il percorso di ottenimento sia delle *Early Measurements* che delle *Late Measurements*. Da un lato, la prima supposizione che sta a monte delle *Early Measurements* è che la teoria del Λ CDM sia la teoria più corretta per spiegare il comportamento della costante cosmologica e della materia oscura e come questo affligga l'espansione dell'Universo. Riguardo le *Late Measurements* possiamo discutere sulla bontà della scala delle distanze, o sulla validità delle leggi a cui ci affidiamo per calcolare le distanze.

2.1 Modifiche alle *Early Measurements*

È importante sottolineare, come scritto in *Di Valentino et al. (2021)*, che le misurazioni della CMB, oggetto dal quale si ottiene il valore della costante di Hubble, effettuate da *Planck Collaboration et al. 2018* sono estremamente precise. Il problema, quindi, risiede nel modello cosmologico che viene scelto.

Prima di presentare modifiche alla teoria del Λ CDM o suoi possibili sostituti, poniamo la nostra attenzione sugli errori sistematici che affliggono il valore di H dedotto dalla CMB. In particolare, l'errore sistematico più grande sarebbe legato ad un parametro chiamato A_{lens} . In *Di Valentino et al. (2021)* viene definito come parametro “non fisico”, che modifica gli effetti che il lensing gravitazionale ha sulla CMB. Un valore nullo per questo parametro azzerava l'effetto del lensing, mentre un valore unitario non corregge gli effetti del lensing previsti dal modello scelto. Poco si conosce di questo fattore correttivo e soprattutto diventa estremamente difficile definirlo quando $A_{lens} > 1$. Rimane comunque un parametro di cui tenere conto, in quanto includerlo nella trattazione riguardo il calcolo di H potrebbe avere come effetto l'aumento della costante di Hubble, alleviando quindi la tensione con le *Late Measurements*.

In *Di Valentino et al. (2021)* vengono elencati tutti i modelli proposti in alternativa al Λ CDM o volti a correggerlo, qui ci limitiamo a descrivere brevemente i più importanti.

Un modello nuovo, alternativo al Λ CDM, è l'EDE, *Early dark energy*. In questa teoria la protagonista è l'energia oscura descritta da un campo scalare che, durante la prima fase evolutiva del nostro Universo, avrebbe interagito con i neutrini, liberando grandi quantità di energia e quindi modificando anche il valore della costante di Hubble.

Poulin et al. (2019) associa a questo campo scalare un potenziale che presenta una componente oscillatoria. Questo campo si comporterebbe come costante nelle prime epoche cosmiche per poi cominciare ad oscillare ad un preciso redshift critico, dopo il quale assumerebbe i comportamenti di un fluido.

Altri gruppi di scienziati scrivono di particelle chiamate “assioni”, molto leggere e longeve, capaci di spiegare l'esistenza della materia oscura. Su queste particelle si basa il nuovo potenziale legato al campo scalare descrivente la EDE.

Molti altri potenziali dipendenti da campi scalari sono stati teorizzati, partendo da ipotesi diverse.

Esistono modelli, chiamati *Late Dark Energy*, che prevedono per l'energia oscura un'equazione di stato dipendente dal tempo $w_{DE}(z)$. L'equazione di stato dell'energia oscura è direttamente legata al suo parametro di densità Ω_{DE} , che quindi diventerebbe lui stesso dipendente dal tempo. Dalla prima equazione di Freedman si nota come un cambiamento nella densità influirebbe direttamente sul valore della costante di Hubble:

$$H^2(z) = H_0^2[\Omega_r(1+z)^4 + \Omega_m(1+z)^3 + \Omega_{DE}f(z) + \Omega_k(1+z)^2] \quad (6)$$

Dove $f(z) \propto w_{DE}(z)$, Ω_r , Ω_m , Ω_{DE} , Ω_k sono parametri di densità per, rispettivamente, radiazione, materia (cold dark matter e barionica), energia oscura e curvatura. Quest parametri rispettano la relazione $\Omega_r + \Omega_m + \Omega_{DE} + \Omega_k = 1$.

I modelli creati partendo da questa idea vanno a definire l'equazione che regola $w_{DE}(z)$ e quella che regola $f(z)$.

Altri modelli suppongono una materia oscura decadente in radiazione oscura: questo processo porterebbe ad un aumento dei gradi di libertà e quindi ad una riduzione della tensione sul valore della costante di Hubble.

Riportiamo un'immagine che mostra alcuni dei modelli proposti per le *Early Measurements* e i loro risultati sulla valore di H_0 .

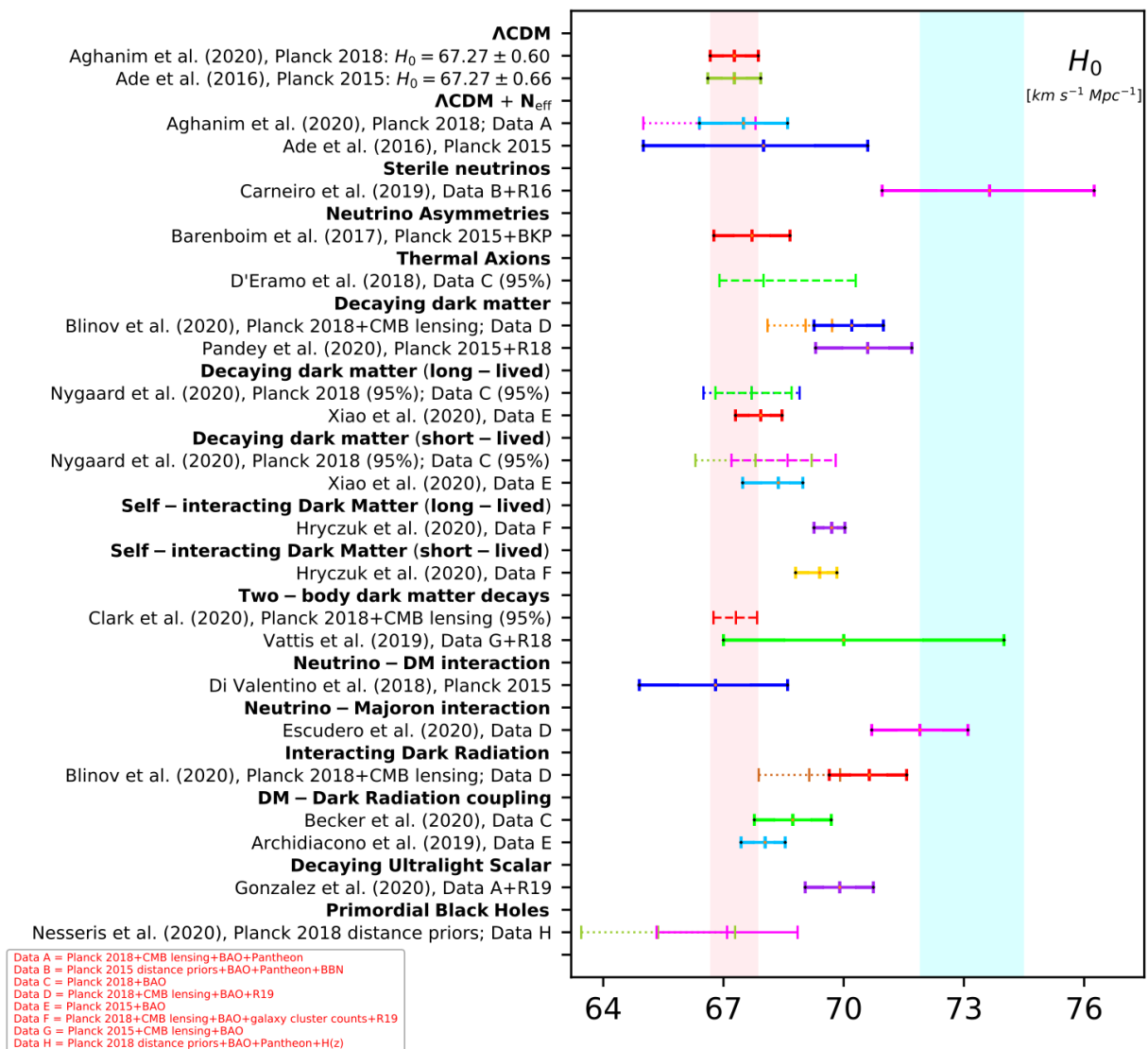


Fig.1: in grassetto alcune delle proposte alternative al Λ CDM; al di sotto troviamo gli articoli di riferimento, mentre a destra il valore della costante di Hubble trovata, con annessa l'incertezza. La banda rossa indica il valore trovato con Λ CDM, mentre la banda blu indica il valore trovato in *Riess et al. (2016)*

2.2 Modifiche alle *Late Measurements*

La possibilità che la terra sia posizionata nel mezzo di una zona a bassa densità del nostro universo è un'ipotesi che risolverebbe la tensione sul valore della costante di Hubble. Se tale teoria fosse vera, la costante di Hubble avrebbe un valore minore all'esterno di questa bolla a bassa densità nella quale vivremmo. Simulazioni a N-corpi hanno dimostrato come non sia possibile tale realtà. Inoltre, questa bolla produrrebbe una variazione di pendenza nel diagramma di Hubble oltre un certo redshift, che non si osserva.

La strada per il calcolo della costante di Hubble alla nostra epoca cosmica, così come è stata descritta sopra, è stata seguita da più gruppi di ricercatori. Alcuni iniziando con gli stessi dati di partenza di *Riess et al (2016)* altri rifacendo tutto dal principio e ricalibrando ogni relazione. Il risultato però è sempre estremamente vicino al valore di $H_0 \sim 73 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$.

Le Cefeidi non sono l'unico oggetto dotato di correlazioni fra grandezze osservabili utili al calcolo della distanza. Alcuni gruppi di ricercatori hanno scelto altri oggetti al posto delle Cefeidi per la calibrazione delle Supernovae nella scala di distanze.

In "*Kourkch et al (2020)*" e "*Schombert, McGaugh, Lelli (2020)*" viene usata la relazione di Tully Fisher, che lega la luminosità di una galassia a spirale alla sua velocità di rotazione, per calibrare la scala delle distanze. I valori ottenuti per il parametro di Hubble sono rispettivamente $H_0 = 76.0 \pm 2.6 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ e $H_0 = 75.1 \pm 2.8 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$, decisamente maggiori del valore ottenuto tramite Λ CDM.

Un metodo alternativo alla Cefeidi prevede l'utilizzo del *Tip Of The Red Giant Branch* (TRGB). Le stelle di massa ridotta, inferiore a 1.4 masse solari, una volta terminate le reazioni con l'idrogeno all'interno del nucleo, si trovano in una fase in cui presentano un nucleo di elio non attivo e una shell di idrogeno che continua a bruciare. In questa parte del loro ciclo vitale, si dice appartengano al TRGB. Il nucleo, a causa della massa totale ridotta, entra in uno stato di degenerazione poco dopo l'uscita della stella dalla sequenza principale. In tale condizione, la pressione esercitata dal nucleo, necessaria a bilanciare l'autogravità e mantenere l'equilibrio idrostatico, non dipende più dalla temperatura e la contrazione del nucleo si ferma. Per stelle di massa maggiore esiste un periodo di contrazione del nucleo prima di raggiungere lo stato

degenerato. Mentre la shell che brucia idrogeno raggiunge l'esaurimento del combustibile, l'elio prodotto dalle reazioni va a unirsi a quello già presente nel nucleo. La luminosità comincia ad aumentare, il che significa una maggiore efficienza nel bruciare l'idrogeno e quindi un aumento di temperatura della shell, che si rispecchia in un aumento di temperatura del nucleo. Una volta che questo raggiunge i 10^7 gradi Kelvin, inizia la combustione dell'elio con quello che viene chiamato un Helium flash. Con questo flash, che è essenzialmente un Thermonuclear Runaway, le stelle diventano giganti rosse, ed entrano nella parte del grafico chiamata Red Giant Branch

La particolarità che ci permette di sfruttare questo processo per conoscere la distanza di questi oggetti è che esiste un limite superiore alla luminosità che può essere raggiunta dalle stelle. Possiamo quindi trovare la magnitudine assoluta di picco calibrando questo metodo su un campione di stelle che appartengono al TRGB e quindi usarle come candele standard utile a calibrare i parametri delle supernovae.

Il metodo del TRGB presenta una serie di vantaggi notevoli: le stelle appartenenti a questa categoria sono abbastanza brillanti da poter essere individuate facilmente ($M_I \sim -4.0 \text{ mag}$) e sono presenti negli aloni di ogni galassia osservabile. Inoltre, la luminosità è legata alla metallicità e alla massa della stella considerata, ma solo in minima parte. Come ultimo vantaggio osserviamo una maggiore facilità a ottenere dati osservativi dal TRGB e dalle Cefeidi, meno frequenti e più difficili da studiare in galassie molto inclinate.

Freedman et al. (2019) si adopera nel trovare un valore della costante di Hubble usando una scala di distanze dove, al posto delle Cefeidi, inserisce il TRGB. Il risultato è $H_0 = 69.8 \pm 0.8 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$, notevolmente vicino a quello ottenuto tramite *Early Measurements*.

Come per le *Early Measurements* lasciamo una tabella con i principali metodi di calcolo di H_0 , con annesso il valore che si ottiene.

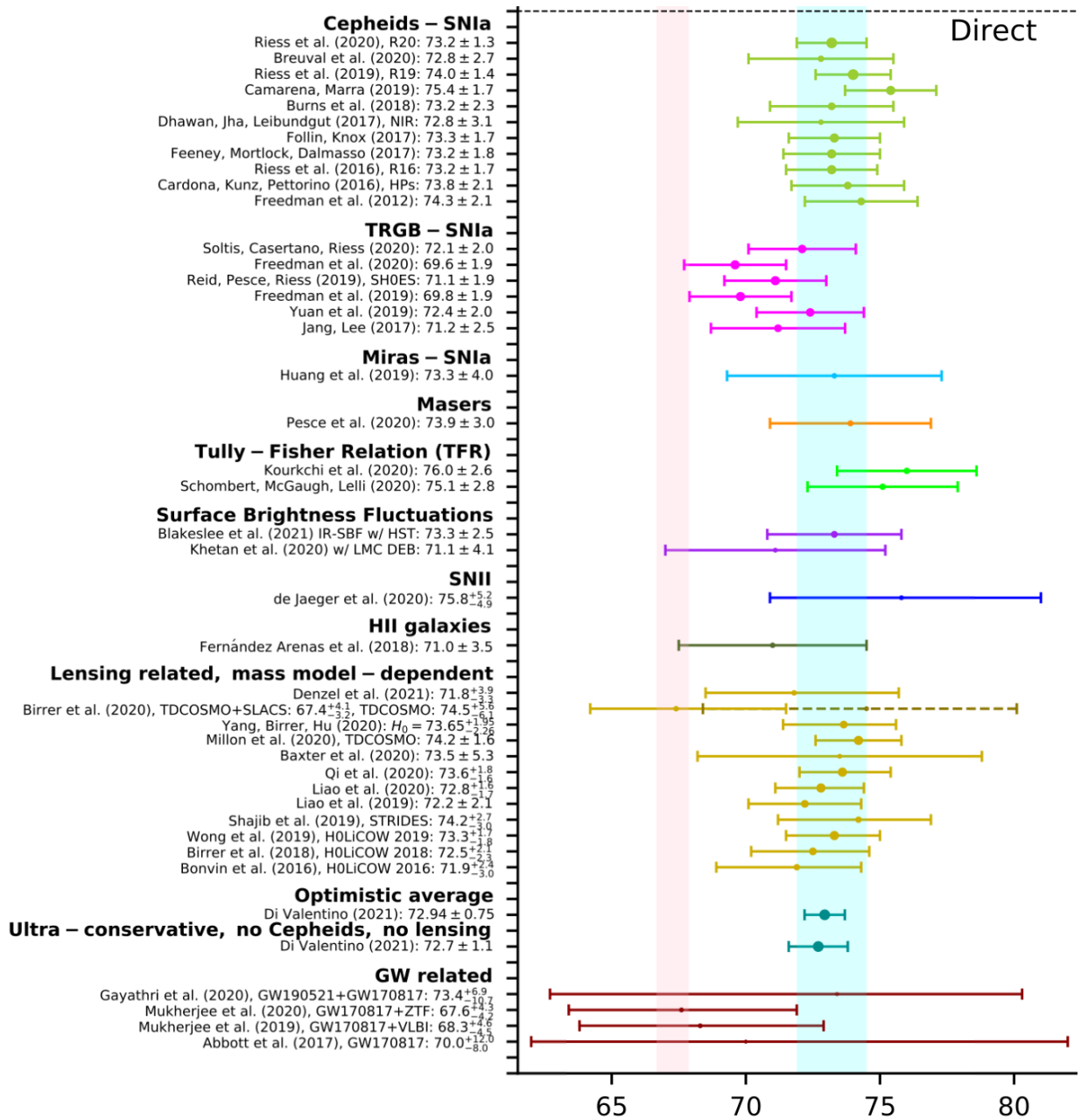


Fig.2: in grassetto i vari modi di calcolare H_0 ; al di sotto di ognuno si trovano gli articoli di riferimento, mentre a destra il valore che si ottiene con annesso errore. La banda rossa corrisponde al valore ottenuto tramite Λ CDM, mentre la banda blu corrisponde al valore trovato in *Riess et al. (2016)*.

Cap. III: Calibrazione TRGB e supernovae

In questa tesi vogliamo rivolgere la nostra attenzione alla calibrazione della scala delle distanze tramite TRGB, essendo l'unica candela standard in grado di fornire dati sulle distanze tali da ridurre notevolmente la tensione sul valore di Hubble. Ripercorreremo il procedimento descritto in *Freedman et al. (2019)* per la misura della costante di Hubble, partendo dagli stessi dati: useremo la calibrazione del TRGB e i calibratori delle supernovae riportati nell'articolo e i dati sulle supernovae catalogati nel *Carnegie Supernovae Project (Krisciunas et al. 2017, Burns et al. 2018)*.

3.1 Calibrazione magnitudine assoluta TRGB

Come scritto in precedenza, prima di poter usare le stelle appartenenti al TRGB come candela standard è necessaria una calibrazione della magnitudine assoluta di questi oggetti. Per fare ciò, viene usata la grande Nube di Magellano (LMC), per la quale è possibile calcolare in due modi il modulo di distanza. Il primo è ottenuto con un metodo parzialmente geometrico *Freedman et al. 2019*), mentre il secondo è totalmente geometrico (*Pietrzynsky 2019*). I valori dei due moduli di distanza sono uguali, ma il secondo è associato ad un errore minore: combinando insieme queste due misure si ottiene il modulo di distanza finale $\mu_{LMC} = 18.447 \pm 0.004 (stat) \pm 0.020 (sys) mag$.

Una volta ottenuto il modulo di distanza bisogna misurare la magnitudine apparente del TRGB, che risulta $m_I = 14.595 \pm 0.021 (stat) \pm 0.1 (sys)$.

Dopo le correzioni da applicare riguardanti l'estinzione il valore che si ottiene è

$$M_I = -4.049 \pm 0.022 (stat) \pm 0.039 (sys) mag$$

Come scritto in *Freedman et al. (2019)*, il valore adottato sarà $M_I = -4.05 \text{ mag}$: consistente con la letteratura precedente e con il valore presente in *Mould et al. (2019)*, ottenuto tramite parallassi su stelle appartenenti al TRGB nella Via Lattea.

3.2 Calibrazione magnitudine assoluta delle Supernovae

Calibrato il TRGB, il passo successivo consiste nello sfruttare tale classe di oggetti per calibrare le supernovae Ia. In particolare, dobbiamo ottenere la magnitudine assoluta di picco delle supernovae, che ha la proprietà di essere uguale per ogni oggetto appartenente a tale classe.

Risulta necessario quindi trovare delle galassie di cui sia possibile misurare il modulo di distanza tramite TRGB e che abbiano ospitato una supernova. Riportiamo a riguardo la “Table 3” presente in *Freedman et al. (2019)*, che riporta tutti i calibratori che verranno usati in questo studio. 18 di queste galassie hanno un modulo di distanza calcolato tramite TRGB, 19 tramite Cefeidi e 10 nel totale hanno entrambe le calibrazioni. Sulla tabella vengono riportati, in ordine: il nome della supernovae, il nome della galassia ospitante, il modulo di distanza di tale galassia calcolato con il TRGB e il relativo errore, la magnitudine di picco corretta (si veda più avanti per la definizione di questa correzione) in banda B della supernova con relativo errore, il modulo di distanza calcolato con le Cefeidi con l’errore associato, la magnitudine di picco corretta della supernova in banda B ma come riportata nell’articolo *Riess et al. (2016)*, la velocità di recessione calcolata con strumenti presenti nel NED.

Grazie a questi dati, usando la definizione di modulo di distanza possiamo trovare la magnitudine assoluta di picco delle supernovae, e così avremo la calibrazione necessaria per sfruttare questi oggetti nel calcolo delle distanze:

$$\mu_{TRGB/CEPH} = m - M_{TRGB/CEPH} \quad (7)$$

Applicando questa relazione a tutti gli oggetti per cui è disponibile un modulo di distanza calcolato tramite TRGB abbiamo trovato $M_{TRGB} = -19.237 \pm 0.131 \text{ mag}$, e, allo stesso modo,

$M_{CEPH} = -19.198 \pm 0.155 \text{ mag}$. L'errore associato è dato dalla deviazione standard. Adotteremo come valore per la magnitudine assoluta delle supernovae quello ottenuto tramite TRGB (M_{TRGB}).

3.3 Confronto TRGB e Cefeidi

Possiamo confrontare TRGB e Cefeidi all'interno di un grafico di Hubble, riportato in Fig.1

In entrambi i grafici disegnati troviamo sull'asse x la distanza, espressa in Mpc, ottenuta tramite la formula del modulo di distanza, mentre sull'asse y la velocità di recessione. La retta disegnata è la legge di Hubble (1), dove è stato preso $H_0 = 70 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$.

Le barre di errore disegnate rappresentano la velocità peculiare degli oggetti considerati, che è un fattore correttivo da aggiungere al dato sulla velocità. Bisogna anche considerare gli errori sulla distanza, che sorgono direttamente dagli errori sul modulo di distanza. In *Freedman et al. (2019)* è stata condotta un'analisi per cercare i migliori valori da associare agli errori per ottenere in entrambi i grafici la migliore consistenza possibile fra dati e retta: risulta $\sigma_{pec} = \pm 130 \text{ km/s}$, $\sigma_{TRGB} = \pm 0.10 \text{ mag}$, $\sigma_{ceph} = \pm 0.14 \text{ mag}$. Viene quindi confermata la maggiore precisione del TRGB rispetto alla Cefeidi.

Tabella 1

SN	Galassia	u_{TRGB}	σ_{TRGB}	TRGB	m'^{CSP}_B	$\sigma_{m'}$	u_{CEPH}	σ_{CEPH}	m^{SC}_B	σ_m	V_{NED}
1980N	N1316	31.46	0.04	CCHP	12.08	0.06	...	...	...	...	1306
1981B	N4536	30.96	0.05	CCHP	11.64	0.04	30.91	0.05	11.62	0.12	1050
1981D	N1316	31.46	0.04	CCHP	11.99	0.17	...	...	...	...	1306
1989B	N3627	30.22	0.04	CCHP	11.16	0.07	...	...	...	...	689
1990N	N4639	...	...	...	12.62	0.05	31.53	0.07	12.42	0.12	1050
1994D	N4526	31.00	0.07	CCHP	11.76	0.04	...	...	...	...	1050
1994ae	N3370	32.27	0.05	JL	12.94	0.05	32.07	0.05	12.92	0.12	1552
1995al	N3021	32.22	0.05	JL	13.02	0.05	32.50	0.09	12.97	0.12	1886
1998aq	N3982	...	...	...	12.46	0.05	31.74	0.07	12.24	0.12	1368
1998bu	N3368	30.31	0.04	CCHP	11.01	0.06	...	...	...	...	689
2001el	N1448	31.32	0.06	CCHP	12.30	0.04	31.31	0.04	12.20	0.12	1047
2002fk	N1309	32.50	0.07	JL	13.33	0.04	32.52	0.06	13.20	0.12	1864
2003du	U9391	...	...	...	13.47	0.09	32.92	0.06	13.47	0.11	2422
2005cf	N5917	...	...	...	12.96	0.07	32.26	0.1	13.01	0.12	2244
2006dd	N1316	31.46	0.04	CCHP	12.38	0.03	...	...	...	...	1306
2007af	N5584	31.82	0.1	JL	12.72	0.05	31.79	0.05	12.70	0.12	1983
2007on	N1404	31.42	0.05	CCHP	12.39	0.07	...	...	...	...	1306
2007sr	N4038	31.68	0.05	JL	12.30	0.15	31.29	0.11	12.24	0.11	1702
2009ig	N1015	...	...	...	13.29	0.05	32.50	0.08	13.46	0.12	2534
2011by	N3972	...	...	12.63	12.63	0.05	31.59	0.07	12.49	0.12	1368
2011fe	M101	29.08	0.04	CCHP	9.82	0.03	29.14	0.04	9.75	0.12	455
2011iv	N1404	31.42	0.05	CCHP	12.03	0.06	...	...	...	...	1306
2012cg	N4424	31.00	0.06	CCHP	11.72	0.06	31.08	0.29	11.55	0.11	1050
2012fr	N1365	31.36	0.05	CCHP	12.09	0.03	31.31	0.06	11.92	0.12	1302
2012ht	N3447	...	...	...	12.66	0.12	31.91	0.04	12.70	0.12	1447
2013dy	N7250	...	...	12.23	12.23	0.07	31.50	0.08	12.31	0.12	1410
2015F	N2442	...	...	...	12.40	0.03	31.51	0.05	12.28	0.14	1271

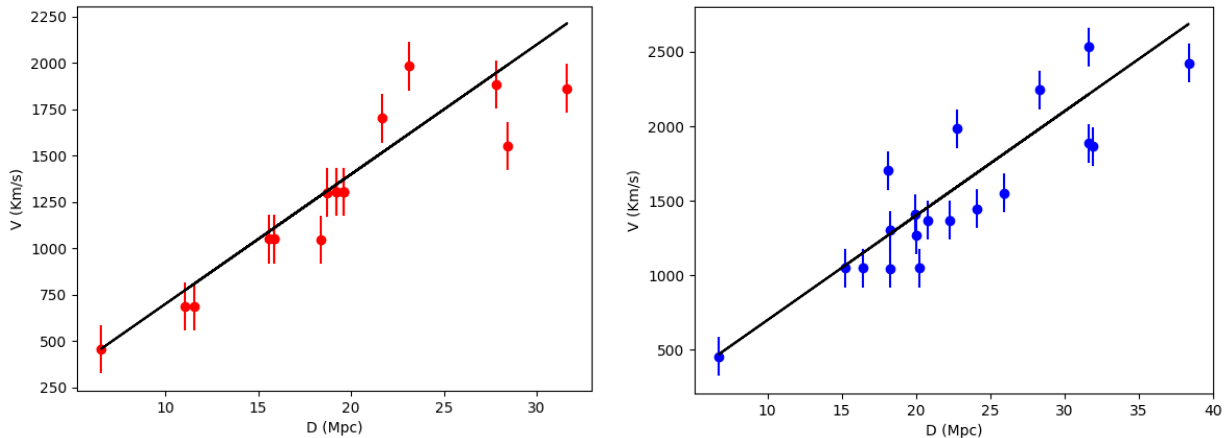


Fig.1: a destra sono disposti gli oggetti per cui è possibile una calibrazione tramite Cefeidi, a sinistra quelli per cui è possibile una calibrazione tramite TRGB. Gli oggetti e i dati nel grafico sono tutti presenti nella Tabella 1. La linea nera rappresenta la legge di Hubble (1) che lega la distanza alla velocità, a fine indicativo è stato preso $H_0 = 70 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$.

3.4 Correzione della magnitudine apparente delle supernovae

Per quanto le supernovae Ia siano degli ottimi indicatori di distanza, non sono candele standard perfette: prima di poter usare i dati sulla magnitudine apparente di questi oggetti è necessario applicare delle correzioni. In *Freedman et al. (2019)* sono riportate tra principali correzioni: la prima riguardante l'abbondanza di Nichel sintetizzato nell'esplosione, la seconda riguarda la relazione fra magnitudine di picco e metallicità dell'oggetto, che può essere interpretata come correzione per la massa della galassia ospitante, e infine la terza riguarda l'estinzione dovuta alla polvere lungo la linea di vista. L'abbondanza di Nichel è legata direttamente alla luminosità di picco della supernova e alla velocità con cui questa si dissolve. Una maggiore abbondanza provoca un picco di luminosità più elevato e una velocità ridotta nella dissolvenza. Possiamo quindi definire una relazione fra la magnitudine di picco e il tempo necessario per osservare il cambio di pendenza che avviene nella curva di luce della supernova. La correzione per questo effetto è fondamentale se vogliamo sfruttare la particolarità delle supernovae che le rende delle candele standard, ovvero l'uguaglianza della magnitudine assoluta di picco.

In *Freedman et al. (2019)* viene riportata una formula che corregge la magnitudine apparente in banda B per tutte e tre queste correzioni:

$$m_B = m_B^{raw} - P^1(s_{BV} - 1) - P^2(s_{BV} - 1)^2 - R_B E(B - V) - \alpha_m(\log_{10}M - M_0) \quad (8)$$

P^1 e P^2 sono i coefficienti dei fattori $(s_{BV} - 1)$, e insieme danno la correzione per l'abbondanza di Nichel; R_B e $E(B - V)$ sono dedotti dal colore della supernova e correggono la magnitudine per la polvere; α_m è l'inclinazione della retta che lega luminosità di picco e massa della galassia ospitante la supernova M_* (si veda *Burns et al. (2018)* per la derivazione).

Le magnitudini riportate in Tabella 1 sono già corrette per tutti e tre i fattori e in questa tesi abbiamo usufruito di tali dati per la calibrazione della magnitudine assoluta della supernovae tramite TRGB e Cefeidi. Ci soffermiamo brevemente sulla correzione legata all'abbondanza di Nichel.

Correzione per abbondanza di Nichel

Nell'articolo *Phillips 1993* è definita la relazione fra la magnitudine assoluta di picco (M) e la differenza di magnitudini osservata fra il picco e i 15 giorni successivi (Δm_{15}), ossia quando la curva di luce passa dalla forma iniziale ad una retta:

$$M = a + b * \Delta m_{15} \quad (9)$$

Dove a e b sono due costanti il cui valore cambia a seconda della banda in cui si effettuano le osservazioni. Per la banda B, che è quella in cui lavoreremo, avremo $a = -21.726$ e $b = 2.698$.

Questo metodo di correzione della magnitudine apparente è in realtà stato superato: tramite osservazioni si è osservato come il parametro Δm_{15} , nel caso in cui superi il valore di circa 1.7 mag , sia meno sensibile all'evoluzione della curva di luce. In tali casi, il cambio di inclinazione della curva di luce da quello iniziale a quello lineare avviene prima dei 15 giorni. Si è cominciato ad usare quindi il parametro s_{BV} , che viene chiamato parametro di *color-stretch*. Si vedrà più avanti come in questa tesi applicheremo, a insiemi differenti di dati, sia la correzione definita in equazione (8), che quella definita in equazione (9).

Cap IV: Grafico di Hubble

Con la calibrazione della magnitudine assoluta di picco delle supernovae ottenuta tramite TRGB, possiamo osservare galassie più lontane e sfruttare questi dati per il calcolo della costante di Hubble.

Per avere i dati sulle magnitudini apparenti della supernovae abbiamo consultato due articoli appartenenti al progetto denominato CSP (*Krisciunas et al. 2007, Burns et al 2018*): il primo è un catalogo di supernovae, mentre il secondo riguarda il calcolo della costante di Hubble nella nostra epoca cosmica. Precisiamo che questo secondo articolo viene consultato solo per i dati sulle supernovae, la strada per il calcolo della costante di Hubble che viene seguita in questa tesi è definita in *Freedman et al. (2019)*.

4.1 Come ottenere un valore per H_0

Al fine di costruire il grafico di Hubble, come definito in *Freedman et al. (2019)*, usiamo una parametrizzazione della distanza di luminosità tramite H_0 , q_0 e j_0 , che rispettivamente sono la costante di Hubble, il parametro di accelerazione dell'espansione già visto nel cap. I e il fattore di *jerk*, legato alla derivata terza del fattore di scala ($j = -\ddot{a}a^2/\dot{a}^3$); tutti questi parametri sono dipendenti dal tempo, lo zero inserito come pedice indica che ne prendiamo il valore alla nostra epoca cosmica.

$$d_L(z, H_0, q_0, j_0) = \frac{cz}{H_0} \left\{ 1 + \frac{1}{2}(1 - q_0)z - \frac{1}{6}(1 - q_0 - 3q_0^2 + j_0)z^2 \right\} \quad (10)$$

Da questa parametrizzazione possiamo passare all'equazione per il modulo di distanza, assumendo un Universo piatto come in *Planck Collaboration (2018)*: questa scelta comporta $\Omega_k = 0$, $q_0 = \Omega_m/2 - \Omega_{DE} = -0.53$ e $j_0 = 1$

$$\mu(z, H_0, q_0) = 5 \log_{10} \left\{ \frac{cz}{H_0} \left(1 + \frac{1-q_0}{2} z \right) \right\} + 25 \quad (11)$$

Trattando H_0 come parametro libero e applicando questa equazione alle supernovae scelte dai cataloghi potremmo ottenere un valore per la costante di Hubble.

Due sono le trattazioni che verranno portate avanti. *Krisciunas et al. (2007)* fornisce una lunga lista di supernovae, ed è il catalogo a cui *Freedman et al. (2019)* fa riferimento. La nostra prima trattazione sulla costante di Hubble sfrutta questo catalogo, applicando però alle magnitudini apparenti delle supernovae solo la correzione dettata dall'equazione di Phillips (equazione (9)). Il motivo di tale scelta è legato alla difficoltà nel trovare tutti i dati necessari ad una correzione completa effettuata grazie all'equazione (8). La seconda trattazione fa riferimento all'articolo *Burns et al (2018)*: all'interno troviamo una lista di supernovae che conta meno oggetti, ma che presenta tutti i fattori correttivi di cui abbiamo bisogno per una correzione completa delle magnitudini apparenti riportate.

Creeremo due grafici di Hubble, e quindi otterremo due valori per la costante omonima.

4.2 Primo grafico di Hubble, singola correzione

Per il nostro studio, abbiamo scelto una parte delle supernovae presenti in *Krisciunas et al. (2007)*, quelle che riportavano il dato relativo alla differenza di magnitudini dopo 15 giorni dal picco e che mostravano una curva di luce “completa”. Quando ci riferiamo ad una curva di luce “completa” indichiamo l'aver un picco ben definito: per alcune supernovae la curva di luce è strettamente decrescente, e ciò non assicura che il punto di partenza della curva, ossia il dato di magnitudine apparente più alto, sia effettivamente il picco. Il nostro set di dati finali conterà quindi 62 supernovae.

Per correggere i dati sulle magnitudini apparenti recuperati dal catalogo, sfruttiamo la formula trovata in *Phillips (1993)* (Eq. (9)).

Con i dati in nostro possesso possiamo creare un grafico di Hubble, in cui poter disegnare la funzione relativa all'equazione (11). Sull'asse x inseriamo in scala logaritmica la velocità di recessione delle supernovae considerate espressa come redshift z per velocità della luce c . La scelta della scala logaritmica deriva dal fatto che la stessa equazione (11) è logaritmica, e quindi

in tal modo risulterà una retta nel grafico. Sull'asse y invece grafichiamo il modulo di distanza, espresso in magnitudini, dato dalla differenza fra la magnitudine di picco corretta e la magnitudine assoluta delle supernovae calibrata tramite TRGB.

Il risultato può essere osservato in Fig. 2:

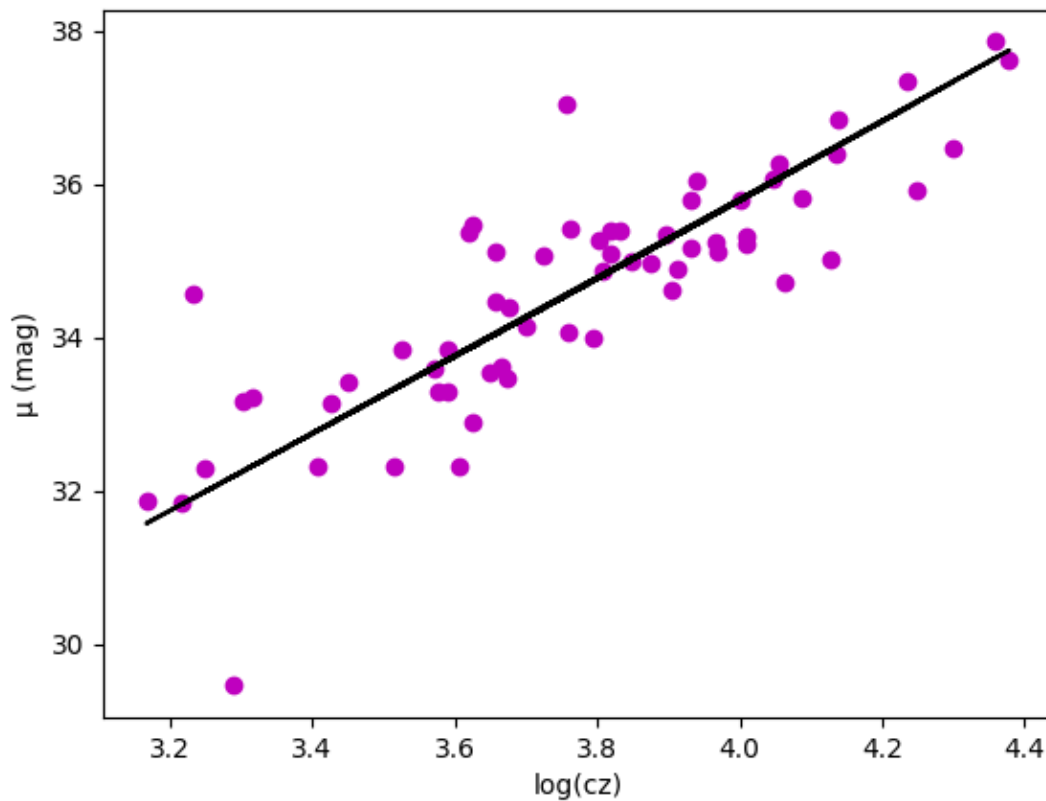


Fig. 2: i punti in viola sono le supernovae prese dal catalogo *Krisciunas et al. (2017)*. La retta disegnata è un'interpolazione dei punti e la funzione che la rappresenta è l'equazione (11).

Si nota come la dispersione dei punti sia importante, e ciò affetta direttamente il valore della costante di Hubble restituito: $H_0 = 71.57 \pm 13.35 \text{ Km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$. Nonostante sia vicino al valore ottenuto in *Freedman et al. (2017)*, dove $H_0 = 69.8 \pm 0.8 \text{ (stat)} \pm 1.7 \text{ (syst)} \text{ Km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$, l'errore associato è estremamente elevato.

La causa principale della dispersione dei punti nel grafico, e quindi dell'elevato errore su H_0 , è quasi sicuramente la correzione insufficiente applicata alle magnitudini apparenti delle supernovae scelte. Come già scritto, il fattore Δm_{15} può non essere un perfetto strumento per individuare il cambio di pendenza della curva di luce di una supernova, ed è per questo che in *Freedman et al. (2019)* viene usato il parametro s_{BV} , che dovrebbe essere un migliore indicatore di tale cambio. Alle magnitudini apparenti degli oggetti presenti nel grafico non è stata applicata nessuna correzione riguardo l'estinzione operata dalla polvere e riguardo la metallicità dell'oggetto. Una correzione completa, come viene definita in *Freedman et al. (2019)*, potrebbe sicuramente ridurre l'errore associato ad H_0 e fornire un valore della costante più vicino a quello atteso.

4.3 Secondo grafico di Hubble: tripla correzione

Il secondo grafico di Hubble verrà creato prendendo dati da *Krisciunas et al. (2017)* e da *Burns et al. (2018)*: una volta individuate le supernovae presenti in entrambi gli articoli, prenderemo dal primo le magnitudini apparenti di questi oggetti e dal secondo i dati utili necessari alla correzione da inserire nell'equazione (). Non prenderemo le magnitudini fornite in *Burns et al. (2018)* in quanto sono già corrette. In particolare, i dati che ci interessano in *Burns et al. (2018)* sono riportati nelle tabelle "Table 2" e "Table 3".

Dalla prima tabella citata prenderemo i dati necessari alla correzione che applicheremo alle magnitudini apparenti per abbondanza di Nichel, tramite il parametro s_{BV} , per colore, tramite il termine $E(B - V)$, e per estinzione dovuta alla polvere, grazie al parametro $R_B = R_V + 1$ (per tale definizione si veda *Burns et al. 2018*). Per mancanza di tempo e dati non correggiamo i dati sulle magnitudini per la metallicità degli oggetti.

Dalla seconda tabella citata prenderemo $P^1 = -0.82 \pm 0.1$ e $P^2 = 3.69 \pm 0.26$, che sono i dati ottimali per oggetti con $E(B - V) < 0.5$. Tutti gli oggetti usati in questo grafico hanno tale caratteristica, a meno di SN2005A.

La formula finale che useremo risulta quindi:

$$m_B = m_B^{raw} - P^1(s_{BV} - 1) - P^2(s_{BV} - 1)^2 - R_B E(B - V) \quad (11)$$

Ora che abbiamo le magnitudini corrette, costruiamo un grafico di Hubble con i medesimi dati del grafico in Fig. 2 sugli assi cartesiani e disegniamo la retta definita dall'equazione (11) usando H_0 come parametro libero.

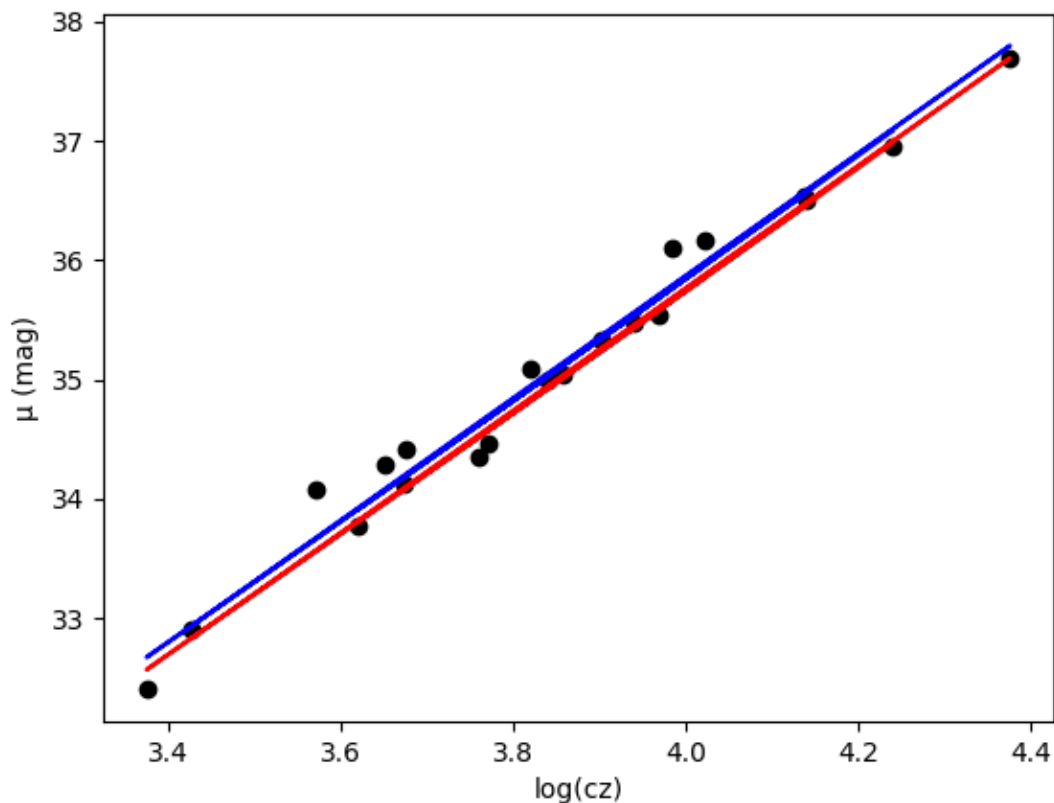


Fig. 2: grafico di Hubble. I punti neri sono le supernovae prese da *Burns et al. (2018)*. In blu è rappresentata la retta definita dall'equazione (11) e ottenuta tramite interpolazione con i punti, per la quale il miglior valore per la costante di Hubble risulta $H_0 = 73 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$. In rosso è rappresentata una retta definita dalla stessa funzione ma con un valore di H fissato a $73 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$.

Graficando, in blu, la retta definita dalla funzione (11) e cercando il valore migliore per H_0 tale da interpolare al meglio i dati otteniamo $H_0 = 69.59 \pm 1.81 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$. Notiamo come la dispersione dei punti nel grafico sia molto minore rispetto al grafico in Fig.1, e questo ha effetto anche sull'errore associato alla costante di Hubble. A titolo illustrativo abbiamo grafico anche una retta, in rosso, sempre definita dall'equazione (11), ma con un valore di H fissato a $73 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$, ossia il valore ottenuto in *Riess et al. (2016)*.

Conclusioni

Individuare $H_0 = 69.6 \pm 1.8 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ come il miglior valore, ottenuto in questa tesi, per il parametro di Hubble misurato alla nostra epoca cosmica. Per arrivare a questo risultato abbiamo seguito molto attentamente *Freedman et al. (2019)*, che riporta un valore della costante di Hubble $H_0 = 69.8 \pm 0.8 \text{ (stat)} \pm 1.7 \text{ (syst)} \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$, consistente con il valore ottenuto in questa tesi. La calibrazione della magnitudine assoluta del TRGB è ricavata direttamente da quell' articolo, come anche i calibratori per le supernovae riportati nella Tabella 1 e il metodo per ottenere il valore della costante di Hubble.

La maggiore differenza fra questa tesi e *Freedman et al. (2019)* sta nella trattazione riguardo la correzione delle magnitudini apparenti riportate nel *Krisciunas et al. (2017)*.

Il grafico in Fig. 2, nonostante offra un valore della costante di Hubble accettabile, soffre di una dispersione estremamente elevata, probabilmente causata dalla mancanza di correzioni per colore ed estinzione e dalla minore efficienza del parametro Δm_{15} rispetto al parametro s_{BV} nella correzione per abbondanza di Nichel.

Il grafico in Fig. 3 è migliore sia come dispersione di punti, sia per il valore fornito per la costante di Hubble: è più vicino al valore ottenuto in *Freedman et al. (2019)*, nonostante le magnitudini apparenti degli oggetti non siano state corrette per metallicità.

Possiamo quindi dedurre che la correzione più importante è quella riguardante l'abbondanza di Nichel prodotto nell'esplosione della supernova, che modificata la luminosità di picco e il tempo richiesto alla curva di luce per cambiare pendenza. Di ordine inferiore sono le correzioni per colore, assorbimento e metallicità.

Il valore ottenuto in *Riess et al. (2016)*, dove vengono sfruttate le Cefeidi per calibrare la scala delle distanze, è $H_0 = 73.24 \pm 1.74 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$. Questo risultato si discosta da quello ottenuto in questa tesi, e così anche da quello ottenuto in *Freedman et al. (2017)*, dove la scala delle distanze è stata calibrata tramite TRGB. È importante sottolineare, come scritto in *Freedman et al. (2017)*, che TRGB e Cefeidi sono due modi indipendenti di misura delle distanze: le stelle giganti rosse si trovano negli aloni delle galassie, in zone povere di metalli, mentre le Cefeidi nei dischi, in zone ricche di gas. Abbiamo già sottolineato come, nei grafici di

Hubble, la dispersione dei punti intorno alla retta dettata dall'equazione (1) sia maggiore nel caso gli oggetti considerati siano delle Cefeidi.

Consideriamo ora il valore $H_0 = 67.4 \pm 0.5 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$, ottenuto come *Early Measurements*. Si nota come questo sia notevolmente più vicino al valore della costante di Hubble ottenuto tramite scala di distanze calibrata con TRGB rispetto a quello ottenuto in *Riess et al. (2016)*. L'errore associato ai valori di H_0 trovati tramite *Late Measurements* rimane comunque più elevato di quello associato ad H_0 trovato tramite *Early Measurements*.

In futuro, la nuova missione che vedrà come protagonista *Gaia*, attesa per il 2022, permetterà di migliorare la precisione nelle misure di distanza calcolate tramite parallasse di stelle appartenenti al TRGB e delle Cefeidi.

Bibliografia

- Riess, Adam G.; Filippenko, Alexei V.; Challis, Peter; 1998; AJ, 116, 3
- Burns, Christopher R.; Parent, E.; Phillips, M. M.; 2018; AJ, 869, 1
- Di Valentino, E.; Meno, O.; Pan, S.; 2021; Classical and Quantum Gravity, 38, 15
- Freedman, Wendy L.; Madore, Barry F.; Hatt, D.; 2019; AJ, 882, 1
- Krisciunas K.; Contreras, C.; Burns, Christopher R.; 2017; AJ, 154, 5
- Perlmutter, S.; Aldering, G.; Goldhaber, G.; 1999; ApJ, 517, 565
- Planck Collaboration: N. Aghanim, Y. Akrami, M. Ashdown; 2018; A&A, 641
- Riess, Adam G.; Macri, Lucas M.; Hoffmann, Samantha L.; 2016; AJ, 826, 56