

Astrofisica

Marco Militello

Indice

1	Introduzione	3
1.1	Spettro elettromagnetico	3
1.2	Tecniche di osservazione	4
1.2.1	Metodo parallasse	4
1.3	Coordinate	4
1.3.1	Proiezioni	5
1.4	Visualizzazioni	5
1.5	Onde gravitazionali	5
1.6	Magnitudine	5
1.6.1	Magnitudine apparente m	6
1.6.2	Magnitudine assoluta M	6
1.7	Colore	6
1.8	Calcolo della massa	6
1.9	Spectroscopy bynarie	7
2	Struttura stellare	8
2.1	Diagramma di Hertzsprung-Russell	8
2.2	Classificazione delle stelle	8
2.3	Descrizione struttura stellare	8
2.4	Equazione di equilibrio idrostatico	9
2.5	Equazione di conservazione della massa	9
2.6	Teorema del viriale	9
3	Evoluzione stellare	11
4	Le galassie	12
4.1	Struttura di una galassia	12
4.2	Parametri nostra galassia	12
4.3	Materia oscura	12
5	Cosmologia	14
5.1	Scale delle distanze cosmologiche	14
5.2	Legge di Hubble	15

1 Introduzione

1.1 Spettro elettromagnetico

Spettro corpo nero:
$$\begin{cases} \nu_{max} = 10^{11} Hz \\ \lambda_{max} T = 3 \times 10^6 nm \cdot K \end{cases}$$

Osservazione di tutto lo spettro elettromagnetico: telescopi terrestri e telescopi spaziali a seconda della frequenza

Oltre all'intensità della stella possiamo anche vedere lo spettro \Rightarrow spettro quasi perfetto di corpo nero

$$U_\nu = \frac{8\pi\nu^3}{c^3} \frac{h\nu}{e^{\frac{h\nu}{k_B T}} - 1} \quad \text{densità di energia a una certa frequenza}$$

Densità di energia

$$u = \int_0^\infty d\nu U_\nu = aT^4$$

a: costante di radiazione e vale $7.6 \times 10^{-15} erg cm^{-3} K^{-4}$

Flusso per unità di frequenza misurato in $erg s^{-1} cm^{-2} Hz^{-1} \rightarrow f_\nu$

Densità di flusso (vettore di Pointing)

$$f = \int_0^\infty d\nu f_\nu = \sigma T^4$$

σ : costante di Stefan-Boltzman che vale $5.7 \times 10^{-5} erg s^{-1} cm^{-2} K^{-4}$

Potenza totale emessa da stella ad una certa frequenza assumendo stella come sfera perfetta misurata in $erg s^{-1} Hz^{-1}$

$$L_\nu = f_\nu(r_*) 4\pi r_*^2$$

Luminosità misurata in $erg s^{-1}$

$$L = f(r_*) 4\pi r_*^2$$

Le onde elettromagnetiche di tipo sferico vanno come

$$\sim \text{distanza}^2$$

$$f(d) = f(r_*) \left(\frac{r}{d}\right)^2 = f(r_*) \frac{4\pi r_*^2}{4\pi d^2} = \frac{L}{4\pi d^2}$$
$$L = 4\pi d^2 f(d)$$

se vedo oggetto ho sempre il flusso; conoscendo anche distanza da oggetto posso anche stimare la sua luminosità

1.2 Tecniche di osservazione

Risoluzione angolare $\rightarrow \theta \simeq 1.22 \frac{\lambda}{D}$ con λ lunghezza d'onda e D diametro del telescopio; per l'occhio si ha una risoluzione angolare di 60 arcsec: se la dimensione dell'oggetto da osservare è minore di 60 arcsec allora l'occhio lo vede come un punto; se la distanza tra due oggetti è minore di 60 arcsec allora li vediamo sovrapposti.

Gli effetti atmosferici peggiorano la visione: per esempio l'umidità, che deve essere bassa.

Tecniche interferometriche migliorano la risoluzione (esempio l'utilizzo di diversi telescopi).

Oltre a misurare la posizione degli oggetti si può misurare il flusso, lo spettro e la polarizzazione

1.2.1 Metodo parallasse

Metodo per stimare la distanza di un oggetto sfruttando il moto apparente di questo oggetto nel cielo; necessita la conoscenza della distanza tra noi e il sole come punto di riferimento

In astrofisica come unità di misura per le distanze si usa il parsec: distanza tale per cui l'angolo α del moto apparente è di un arcosecondo

$$1pc \simeq 3.1 \times 10^{18} cm \simeq 3.3ly$$

La stella più vicina a noi è Proxima Centauri che dista $d \simeq 1.3pc \rightarrow \alpha \sim 0.768arcsec$

A causa del potere risolutivo con metodo parallasse posso stimare distanze oggetti fino ad una distanza di $\sim 100pc$

$$L = 4\pi r_*^2 f(r_*) \quad \underbrace{=}_{\text{per corpo nero}} \quad 4\pi r_*^2 \sigma T^4$$

La temperatura la ottengo facendo un fit dei dati con la curva del corpo nero; dato che conosco la luminosità posso calcolare il raggio della stella. La temperatura che posso stimare è la temperatura superficiale della stella, perchè i fotoni che ci arrivano sono quelli della superficie

1.3 Coordinate

- Celesti: per astronomia amatoriale, non professionale; da equatore celeste divido la volta celeste in 2 emisferi
 - Nord $\begin{cases} \text{Declinazione: da } 0^\circ \text{ a } 90^\circ \text{ (asse di rotazione terrestre)} \\ \text{Ascensione retta: da } 0 \text{ a } 24 \text{ ore} \end{cases}$
 - Sud $\begin{cases} \text{Declinazione: da } 0^\circ \text{ a } -90^\circ \text{ (asse di rotazione terrestre)} \\ \text{Ascensione retta: da } 0 \text{ a } 24 \text{ ore} \end{cases}$
- Galattiche: da piano della galassia in cui ci troviamo.
 - Latitudine: da -90° a $90^\circ \rightarrow 0^\circ$ piano della galassia
 - Longitudine: da 0° a $360^\circ \rightarrow$ senso antiorario

Centro galattico è il centro della galassia

1.3.1 Proiezioni

- Proiezione azimutale equidistante: centro latitudine corrisponde a 90° , mentre l'esterno corrisponde a 0° ; si hanno minime distorsioni, ma visualizzo solo metà volta celeste
- Proiezione di Hammer-Aitoff: rappresentazione completa della volta celeste, ma si hanno forti distorsioni ai poli. Il piano della galassia è il piano centrale orizzontale. Solitamente in astrofisica si usa questa rappresentazione

1.4 Visualizzazioni

- Ottico: a causa delle polveri il centro della galassia è molto oscurato. L'assorbimento galattico è descritto dalla funzione

$$I = I_0 e^{-\alpha r}$$

dove r è la distanza tra noi e l'oggetto osservato, mentre α è proporzionale a λ^{-1}

- Infrarosso: l'assorbimento galattico è minore, quindi si vede molto meglio il centro della galassia (si rimuove parte delle polveri). Si possono trovare alcune bande infrarosso anche sulla terra. Anche noi emettiamo infrarosso, quindi rischio di avere rumore termico nelle mie misure: posso tenere il telescopio a basse temperature per diminuire il problema.

Dall'infrarosso in poi si usano falsi colori: associo colore in base all'intensità della radiazione.

- Microonde: porta a scoperta della radiazione di fondo cosmica
- Radio: porta a due scoperte
 1. Stella di neutroni, grazie ad un segnale periodico; pulsar non si vedono nell'ottico
 2. Quasar
- Raggi-x: si vedono solo in orbita, non a terra. Portano prima prova dell'esistenza dei buchi neri: si capta emissione di materia che cadeva nel buco nero. Il buco nero invece non emette radiazione.
- Raggi- γ : porta scoperta dei gamma-ray bursts.

Neutrini: particelle che interagiscono per interazione debole (anche il sole li emette). Esplosione supernova è una sorgente di neutrini; l'unica prova diretta di un'esplosione di una supernova è SN1987A

1.5 Onde gravitazionali

Sono state captate da interferometri a terra nel 2015, ma predette già dalla relatività generale. Le distorsioni dello spazio-tempo si propagano come un'onda.

Le sorgenti più luminose sono le binarie, 2 oggetti compatti che ruotano.

1.6 Magnitudine

Unità di misura che è stata introdotta dagli antichi greci

- 0: stella più luminosa che vedo a occhio nudo
- 5: stella più debole visibile a occhio nudo

Si può legare magnitudine a logaritmo del flusso

1.6.1 Magnitudine apparente m

Da un punto di vista fisico è uguale al flusso

$$m = cost - 2.5 \log_{10} f$$

devo scegliere come definire la costante

$$\begin{cases} \text{Scelgo costante in modo che m di Vega sia } 0 \rightarrow m = -2.5 \log_{10} \left(\frac{f}{f_{Vega}} \right) \\ \text{Sistema AB} \rightarrow m = -2.5 \log_{10} \left(\frac{f}{f_0} \right) \text{ con } f_0 \text{ costante per ogni frequenza} \end{cases}$$

1.6.2 Magnitudine assoluta M

Da un punto di vista fisico è analogo luminosità. 'E la distanza che dovrebbe avere un oggetto se si trovasse ad una distanza di 10 parsec

$$M = m - 5 \log_{10} \left(\frac{d}{10 pc} \right)$$

$$M = M_{sole} - 2.5 \log_{10} \left(\frac{L}{L_{sole}} \right) \quad M_{sole} \simeq 4.75 \quad L_{sole} \simeq 3.8 \times 10^{33} erg s^{-1} \simeq 3.8 \times 10^{26} W$$

Le bande di frequenza vengono segnate usando come pedice una lettera

1.7 Colore

Calcolo della differenza tra magnitudine apparente di una frequenza e un'altra; fisicamente mi dice se oggetto picca più su una frequenza o su un'altra. E' legata alla temperatura

1.8 Calcolo della massa

Per poterla stimare con questo metodo ho bisogno di un sistema binario (2 stelle che orbitano una intorno all'altra). Il piano dell'orbita lo poniamo per semplicità ortogonale a piano vista \rightarrow percorrono circonferenza nel cielo.

Per definizione centro di massa

$$r_1 M_1 = r_2 M_2$$

Chiamo la separazione tra le 2 stelle $a = r_1 + r_2$

Applico legge di Keplero

$$w^2 = \frac{G(M_1 + M_2)}{a^3}$$

Tramite separazione angolare θ che posso calcolare perchè vedo le 2 stelle

$$\begin{cases} r_1 = \theta_1 d \\ r_2 = \theta_2 d \end{cases} \rightarrow \frac{r_1}{r_2} = \frac{\theta_1}{\theta_2} = \frac{M_2}{M_1}$$

Se riesco a misurare la distanza tra me e sistema con leggi Keplero posso ottenere massa totale del sistema
 \Rightarrow ho un sistema con 2 equazioni e 2 incognite

1.9 Spectroscopy bynarie

Deduco presenze di binarie da studio dello spettro perchè risoluzione non mi permette di vedere le due stelle separate (esempio da effetto Doppler dello spettro di assorbimento)

2 Struttura stellare

Stelle con masse inferiori hanno luminosità inferiore

$$L = 4\pi R^2 \sigma T^4$$

Esempio: $L_{sole} \simeq 4 \times 10^{33} \text{ erg} \cdot \text{s}^{-1}$

2.1 Diagramma di Hertzsprung-Russell

Anche detto diagramma magnitudine-colore. Si usa per stelle di cui conosco la distanza.

Asse x: colore B-V; più mi trovo verso sinistra, più picco sul blu. Temperatura cresce verso sinistra

Asse y: magnitudine assoluta nel V; valori più bassi hanno luminosità più alta

La maggior parte delle stelle si trova sulla diagonale principale → SEQUENZA PRINCIPALE (racchiude le stelle che bruciano H in He). Qui si trova anche il sole, più o meno al centro. La maggior parte della loro vita le stelle la passano sulla sequenza principale (sole ~ 10 miliardi di anni)

Diagonale minore: RAMO DELLE GIGANTI. Si trovano stelle che hanno raggi decisamente più grandi di quelle che si trovano sulla sequenza principale. Vediamo meno stelle sul ramo delle giganti, perchè le stelle passano molto meno tempo in questa fase, e quindi è statisticamente più difficile osservarle

In basso a sinistra si trovano le NANE BIANCHE: sono l'unico oggetto compatto visibile su diagramma H-R; hanno raggi decisamente più piccoli di quelle sulla sequenza principale

La massa (indicata con unità di massa solare) andando verso l'alto a sinistra. Sulla sequenza principale massa più grande indica raggi più grandi. La vita lungo sequenza principale diminuisce andando verso alto a sinistra: questo perchè la luminosità è proporzionale a M^α con $\alpha > 1$, quindi maggiore è la massa, maggiore è la luminosità, quindi muore prima

2.2 Classificazione delle stelle

La classificazione delle stelle avviene in base a spettro di assorbimento: si associano lettere a spettro di assorbimento (OBAFGKM). La "O" è associata ha temperature alte ~ 40000K, mentre la "M" è associata a temperature minori ~ 2400K. Ad esempio il sole è di tipo "G". Esiste sottoclassificazione per le temperature: si indica con un numero. Per indicare la posizione della stella nel diagramma si usa un numero romano (V indica che la stella si trova nella sequenza principale)

2.3 Descrizione struttura stellare

Sulla sequenza principale le stelle fanno fusione nucleare per convertire H in He. Per il sole l'efficienza di questo processo è di circa lo 0.7%

$$\text{Composizione massa del sole} \begin{cases} 71\% H \\ 27\% He \\ 2\% \text{ C, N, O, Fe: metalli (così indico tutti gli elementi più pesanti dell'elio)} \end{cases}$$

Assunzioni: 1. Le stelle hanno simmetria sferica: grandezze dipendono solo da r, non da θ, ϕ, t . Le stelle non ruotano 1. No campo magnetico

2.4 Equazione di equilibrio idrostatico

Equazione per descrivere la pressione in funzione del raggio

Forza gravitazionale è uguale alla forza dovuta al gradiente di pressione che bilancia la forza gravitazionale

$$-\frac{GM(r)dm}{r^2} = dPA$$

Considerando che $dm = \rho(r)Adr$ dove ρ è la densità si ottiene

$$-\frac{GM(r)\rho(r)Adr}{r^2} = dPA$$

che ci porta a scrivere la prima equazione di evoluzione stellare, che però non può essere risolta da sola, perchè non ho espressione di $M(r), \rho(r)$

$$\frac{dP}{dr} - \frac{GM(r)\rho(r)}{r^2}$$

2.5 Equazione di conservazione della massa

Equazione per descrivere la massa in funzione del raggio

Considerando che

$$dM = \rho(r)4\pi r^2 dr$$

posso scrivere la seconda equazione di struttura stellare

$$\frac{dM}{dr} = \rho(r)4\pi r^2$$

2.6 Teorema del viriale

$$\int_0^{r_*} dr 4\pi r^3 \frac{dP}{dr} = - \int_0^{r_*} dr 4\pi r^3 \frac{GM(r)\rho(r)}{r^2}$$

$$\int_0^{r_*} dr 4\pi r^3 \frac{dP}{dr} = -3 \int_0^{r_*} dr 4\pi r^2 P(r)$$

$$- \int_0^{r_*} dr 4\pi r^3 \frac{GM(r)\rho(r)}{r^2} = - \int_0^{r_*} dr \frac{GM(r)dM}{r dr} = - \int_0^{M_*} \frac{GM(r)dM}{r} = E_{\text{grav}}$$

Allora

$$-3 \int_0^{r_*} dr 4\pi r^2 P(r) = E_{\text{gr}}$$

assumendo che la stella sia fatta di gas perfetto e che Γ sia costante, considerando la densità di energia interna (e)

$$P = (\Gamma - 1)e$$

si ottiene

$$-3(\Gamma - 1)E_{\text{termica}} = E_{gr}$$

- gas monoatomico classico, senza effetti quantistici

$$P = nK_B T \Rightarrow e = \frac{3}{2}nK_B T = \frac{P}{(\Gamma - 1)}$$

si ottiene

$$\Gamma - 1 = \frac{2}{3} \Rightarrow \Gamma = \frac{5}{3}$$

sostituendo nel teorema del viriale

$$-2E_{TH} = E_{GR}$$

L'energia totale è data dell'energia gravitazionale + energia termica

$$E_{TOT} = E_{TH} + E_{GR} = -E_{TH} < 0$$

allora stella è sistema legato: se viene perturbata la stella oscilla attorno al suo punto di equilibrio.

Conseguenza: le reazioni nucleari sono stabili \rightarrow se energia termica aumenta per perturbazione allora la pressione fa espandere la stella; allora diminuisce l'energia gravitazionale che fa diminuire energia termica, quindi si torna ad equilibrio \Rightarrow equilibrio stabile (torna a situazione iniziale)

- gas stella di tipo relativistico \rightarrow pressione stella è dovuta principalmente a radiazione (fotoni)

$$p = \frac{1}{3}e \Rightarrow \Gamma = \frac{4}{3}$$

si ottiene quindi

$$-E_{TH} = E_{GR}$$

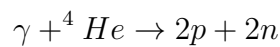
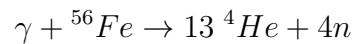
di conseguenza l'energia totale è nulla: ciò significa che sistema è marginalmente legato \rightarrow la minima perturbazione fa esplodere la stella

3 Evoluzione stellare

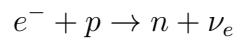
$M = 15M_{sole}$:

- brucia H in He; $10^7 yr$ sulla sequenza principale
- $He \rightarrow C, O, Ne \Rightarrow$ passa $10^6 yr$ a bruciare He: passa nel ramo delle giganti
- $C \rightarrow Ne, Mg, Na \Rightarrow 10^3 yr$
- $Ne \rightarrow O, Mg \Rightarrow 0.7 yr$
- $O \rightarrow Si, Ar, Ca \Rightarrow 2.6 yr$
- $Si \rightarrow Fe, Ni \Rightarrow 18 days$

1. FOTODISINTEGRAZIONE



2. NEUTRONIZZAZIONE (inverse β decay)



$$\rho \sim 10^{11} gcm^{-3} \Rightarrow n_e = n_p = \frac{1}{10} n_n$$

- $8 < M < 20M_{sole} \Rightarrow$ stella di neutroni
- $M > 20M_{sole} \Rightarrow$ buco nero

In entrambi i casi si ha prima un'esplosione di supernova; se la massa della stella però troppo massiva si può avere direttamente un buco nero senza avere l'esplosione di supernova. Durante queste esplosioni avviene rilascio degli stati più esterni, esplosione è quindi fondamentale anche per la nostra vita.

4 Le galassie

Le galassie sono formate da $10^7 - 10^{11}$ stelle. Inizialmente sono state classificate da Hubble in base alla forma

- Ellittiche
- Spirali

L'idea di Hubble era che le galassie nascono come ellittiche (EARLY TYPE GALAXY) e poi si evolvono come spirali (LATE TYPE GALAXY). In realtà sono più giovani le galassie spirali rispetto a quelle ellittiche. Per stabilire l'età di una galassia si guarda le stelle che la compongono: nell'ellittiche si vedono molte stelle di tipo rosso, mentre non vediamo quelle di tipo blu; dato che quando si forma una galassia si formano tutti i tipi di stelle, ciò significa che le stelle più massive sono già morte e non c'è idrogeno disponibile per formarne di nuove.

Esistono anche un altro tipo di galassie: le galassie peculiari/irregolari; si crede che siano il risultato dell'interazione o della collisione di due galassie

4.1 Struttura di una galassia

- Bulge/sferoide: parte centrale più luminosa che tipicamente ospita stelle più vecchie (picca molto verso il rosso); dato che è così luminosa contiene la maggior parte della materia visibile
- Nucleo galattico: contiene un buco nero supermassivo; la nostra galassia ne ospita uno di circa 10^6 masse solari
- Disco: dove si trovano anche le spirali
- Alone stellare: formato da alcune stelle che si trovano fuori dal piano della galassia
- Globular cluster: ammassi di stelle fuori dal piano della galassia unite assieme dalla forza gravitazionale
- Raggi cosmici: elettroni, protoni e nuclei ad energie $E \sim 10^8 - 10^{15} eV$
- Materia oscura: alone oscuro che non emette radiazione elettromagnetica

4.2 Parametri nostra galassia

La Via Lattea ha una massa di circa 10^{11} masse solari. Il sole si trova ad una distanza di circa $8.6 kpc$ dal centro, ed orbita ad una velocità di circa $240 \frac{km}{s}$, con un periodo orbita, quindi, di circa 10^8 anni; si trova ad un'altezza rispetto al piano della galassia di circa $25 pc$

E' possibile calcolare la densità di stelle in una galassia

$$\rho(r, z) = \rho_0 e^{-\frac{r}{r_d}} e^{-\frac{|z|}{h_d}}$$

si ottiene una densità media di 1 stella ogni parsec cubo

4.3 Materia oscura

E' stata scoperta guardando le curve di rotazione delle galassie a spirale: per studiare la velocità di rotazione attorno al centro studio il blue-shift e il red-shift. Nelle regioni più esterne le curve di rotazione sono tendenzialmente piatte: molto strano. Posso pensare di studiare la velocità delle stelle del disco ipotizzando che tutta la massa sia nel centro, dato che vedo il centro molto più luminoso. Con le leggi di Keplero ottengo che

$$v_{rot} \sim r^{-\frac{1}{2}}$$

Per avere quindi una velocità di rotazione costante devo quindi avere della massa extra che noi non vediamo: alone di materia oscura che genera forza gravitazione che tiene legate le stelle; ne percepiamo quindi gli effetti gravitazionali, ma non la vediamo

5 Cosmologia

Paradosso di Olbers: perchè il cielo è scuro di notte?

Se universo avesse età infinita e fosse infinito allora il cielo notturno dovrebbe essere estremamente illuminato, perchè ad ogni distanza si trova una stella che prima o poi vedo: ovunque guardo trovo una stella

Ipotizzo che il flusso delle stelle sia tutto uguale e che tutte le stelle siano come il sole

$$f_{obs} = \frac{f_* 4\pi R_*^2}{4\pi D_*^2} = f_* \frac{d\Omega}{\pi}$$

Integrando su tutto l'angolo solido ottengo il flusso totale

$$f_{tot} = \frac{f_*}{\pi} 4\pi$$

Dovremmo quindi essere immersi nella radiazione di corpo nero alla temperatura di 5000 K, il che significherebbe che non dovremmo esistere

Considerando che la densità media della galassia è di 10^{-2} Mpc^{-3} e che ogni galassia è formata da circa 10^{10} stelle si ottiene una number density di stelle pari a

$$n_* = 10^8 \text{ Mpc}^{-3}$$

Calcolando

$$l = \frac{1}{n_* \sigma}$$

dove σ è la sezione d'urto pari a

$$\pi R_*^2$$

si ottiene che il libero cammino medio è pari a circa $10^{26} ly$

Il paradosso si risolve quindi in 2 possibili modi 1. l'universo è eterno, ma ha una dimensione inferiore ai 10^{26} anni luce 2. l'universo è infinito, ma ha un'età inferiore ai 10^{26} anni

Perchè il cielo notturno sia scuro è sufficiente che l'universo sia finito o che abbia un'età finita; non è necessario che sia vere entrambe per risolvere il paradosso, ma è possibile

5.1 Scale delle distanze cosmologiche

Grafico per definire fino a che distanza posso usare un certo metodo

- Metodo parallasse:

$$L = 4\pi d^2 f$$

Questo metodo è valido fino ad una distanza di circa $10^{-1} kpc$

- Main sequence fitting: guardo lo spettro di una stella che è abbastanza lontano da me sulla sequenza principale

Assumo che valga lo stesso andamento delle stelle sulla sequenza principale che ho potuto studiare. Per esempio se vedo una stella di tipo B, gli associo la stella luminosità che associo alle stelle di tipo B che ho studiato sulla sequenza principale

Posso così ricavare la distanza dato che conosco il flusso, visto che vedo la stella

$$d_L = \sqrt{\frac{L}{4\pi f}}$$

Questo metodo è valido fino a una distanza di circa $10 kpc$

- Cefeidi: stelle che sono già sul ramo delle giganti, che presentano periodicità nel flusso.

Per cefeidi vicine a noi che riusciamo a studiare con altri metodi si trova che la luminosità dipende dal periodo; assumo che questa relazione valga per tutte le cefeidi, non solo per quelle vicine a noi.

Questo metodo è valido fino a una distanza di circa $10^4 kpc$

- Tully-fisher: metodo valido fino a una distanza di circa $10^5 kpc$
- Supernovae di tipo Ia: andamento del flusso rispetto al tempo è tempo.

Per supernovae che riesco a studiare con altri metodi ricavo che

$$M(B) = -21.7 + 2.7\Delta m_s$$

assumo che questa relazione valga sempre

Questo metodo è valido anche fino a una distanza di $10^6 kpc$

5.2 Legge di Hubble

Misuro la velocità delle galassie, per esempio studiando il redshift, e vedo che le galassie si stanno tutte allontanando da noi con una relazione ben precisa

$$v = H_0 D$$

dove H_0 è la costante di Hubble che oggi vale

$$H_0 = 70 \pm 5 km s^{-1} Mpc^{-1}$$

L'universo non è quindi stazionario, ma si sta espandendo; in realtà le galassie non si stanno allontanando solo da noi, ma si stanno allontanando anche le une dalle altre, di conseguenza:

1. l'universo si sta espandendo
2. non c'è un centro dell'universo, non c'è alcun sistema privilegiato; l'universo è isotropo dato che tutte le galassie si stanno allontanando le une dalle altre
3. nel passato la densità dell'universo doveva essere maggiore perchè la distanza tra gli oggetti era minore
4. esiste quindi in momento in cui la distanza tra le galassie era nulla: l'universo ha un'età finita che posso stimare tramite la costante di Hubble

$$t_0 = \frac{1}{H_0} \simeq 14 Gyr$$

Su scale maggiori dei 100 Mpc non si ha alcuna struttura dell'universo: si trova che l'universo è isotropo e omogeneo