

LAPORAN
KURVA ROTASI GALAKSI BIMASAKTI

Diajukan untuk memenuhi salah satu tugas mata kuliah AS3202 Fisika Galaksi



oleh:

Kelompok J

Fathia Rahmi Izzati	10319034
Tasya Nadzmus Soraya	10319035
Anneke Dian Islamiati	10319037

PROGRAM STUDI ASTRONOMI
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
INSTITUT TEKNOLOGI BANDUNG
2022

A. Pendahuluan

a. Latar Belakang

Komponen umum yang diamati pada medium antarbintang di galaksi kita adalah hidrogen. Pengamatan dari garis emisi hidrogen dalam keadaan netralnya dapat memberikan kita informasi mengenai temperatur dan kepadatan di medium antarbintang, serta sifat kinematis dari Galaksi Bimasakti.

Atom hidrogen paling mudah ditemukan pada garis spectral berukuran 21 cm. Garis spektral 21-cm merupakan pelacak yang umum digunakan karena keberadaan atom hidrogen netral selalu berada dalam lingkup emisi yang mudah diamati (Kaberla et.al, 2005).

Dari pengamatan hidrogen netral, kita dapat menurunkan kecepatan rotasi yang didapatkan dari pergeseran doppler pada radiasi dengan panjang gelombang 21 cm yang dipancarkan oleh awan hidrogen netral yang mengorbit dalam piringan galaksi. Hukum Kepler dapat memberikan informasi bahwa massa yang terkandung pada radius tertentu di dalam galaksi spiral dapat diturunkan dari kecepatan orbit pada radius tersebut. Akan tetapi, dari pengamatan ternyata kurva rotasi yang dihasilkan tidak mengikuti distribusi Keplerian. Terdapat cara lain untuk membentuk kurva rotasi galaksi salah satunya dengan mengamati distribusi massa di dalam galaksi yang dapat diturunkan dari pengamatan awan hidrogen. Dari variasi distribusi massa inilah yang akan membentuk kurva rotasi galaksi.

Maka dari itu, perlu dilakukan analisis data hidrogen netral untuk mendapatkan kurva rotasi galaksi dengan memanfaatkan data LAB dan GASS.

b. Tujuan

Pada tugas ini akan dilakukan analisis data pada hasil survey HI yang digunakan untuk membangun kurva rotasi Galaksi Bimasakti serta dengan memperhatikan parameter rotasi diferensial seperti konstanta Oort A dan B.

B. Dasar Teori

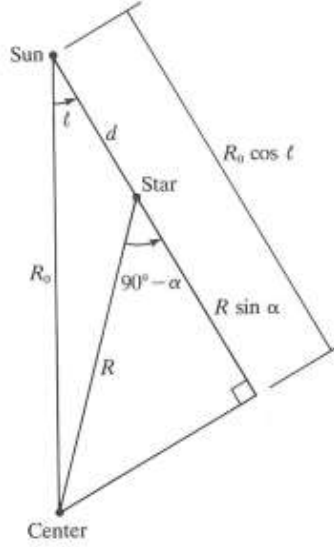
a. Kinematika Gerak Rotasi

Anggap materi di piringan galaksi berotasi melingkar di sekitar sumbu yang melalui pusat galaksi, tegak lurus terhadap bidang galaksi. Karena massa galaksi terkonsentrasi di pusat, dan karena materi di luar orbit bintang di bidang hampir sama sekali tidak ada gaya, maka awalnya dapat diasumsikan bintang bergerak dengan

orbit hampir Keplerian di sekitar pusat galaksi. Akan tetapi galaksi berotasi secara differensial, dengan bintang di bagian dalam kebanyakan periode orbitnya lebih kecil daripada bagian luar. Variasi kecepatan rotasi dalam rentang jarak galaktosentrik tidak bisa ditentukan dengan Keplerian.

Jika pengamat melihat $l=0^\circ$ atau $l=180^\circ$ tidak akan diamati kecepatan radial sistematis yang diakibatkan oleh rotasi galaksi, karena untuk semua bintang di arah ini bergerak tegak lurus terhadap arah pandang. Serupa dengan arah $l=90^\circ$ dan $l=270^\circ$ tidak akan diamati kecepatan radial untuk bintang dekat karena di arah ini bintang bergerak di sekitar pusat galaksi dengan kecepatan orbit melingkar yang sama dengan Matahari dan oleh karena itu tidak akan menunjukkan resesi. Di arah $l=45^\circ$ kecepatan radial yang diamati akan bernilai positif karena bintang dalam arah ini bergerak menjauhi Matahari sepanjang garis pandang lebih cepat daripada Matahari mendekati bintang. Sedangkan pada $l=135^\circ$ akan terjadi sebaliknya, kecepatan radial yang diamati akan bernilai negative. Argumen serupa bisa dibuat untuk kuadran lain dan bisa disimpulkan bahwa kecepatan radial untuk bintang dalam galaksi yang berotasi secara differensial seharusnya bergantung pada bujur galaksi.

Untuk kecepatan tangensial yang digunakan untuk mencari gerak diri, terdapat dua kontribusi utama untuk efek yang diamati. Pertama, bagian gerak diri yang diamati akan diproduksi oleh gerak bintang relatif di jarak yang berbeda dari pusat galaksi yang dihasilkan dari rotasi piringan galaksi. Kemudian terdapat rotasi differensial yang menimbulkan gerak diri di bujur galaksi yang positif atau nol. Dalam efek diferensial ini terdapat kontribusi tambahan yang dihasilkan oleh rotasi galaksi yang seluruhnya relative terhadap kerangka yang tetap. Berikut beberapa persamaan dalam kurva rotasi galaksi,



Gambar 1. Hubungan geometris diantara besaran untuk rumus rotasi differensial.

Dari gambar diketahui ekspresi umum untuk kecepatan radial adalah

$$v_R = \Theta \cos \alpha - \Theta_0 \sin \ell \dots 1)$$

Dari hukum sinus

$$\frac{\sin \ell}{R} = \frac{\sin(90^\circ + \alpha)}{R_0} = \frac{\cos \alpha}{R_0} \dots 2)$$

Oleh karena itu,

$$v_R = \left(\frac{\Theta R_0}{R} \right) \sin \ell - \Theta_0 \sin \ell \dots 3)$$

atau

$$v_R = (\omega - \omega_0) R_0 \sin \ell \dots 4)$$

Persamaan 3 dan 4 adalah umum dan hanya diasumsikan rotasi galaksi benar-benar melingkar. Kemudian tinjau kecepatan tangensial

$$v_T = \Theta \sin \alpha - \Theta_0 \cos \ell \dots 5)$$

Dimana v_T diukur positif dalam arah pertambahan ℓ . Dari gambar 2 terlihat bahwa

$$R \sin \alpha = R_0 \cos \ell - d \dots 6)$$

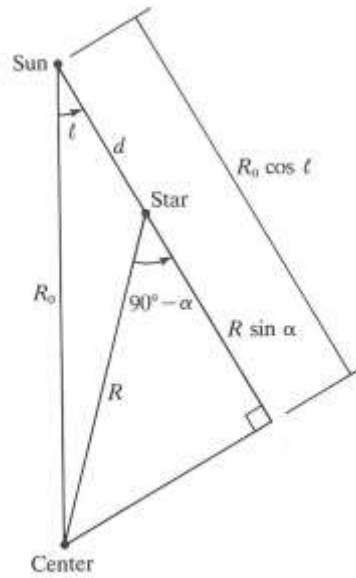
Sehingga

$$v_T = \left(\frac{\Theta}{R}\right) (R_0 \cos \ell - d) - \Theta_0 \cos \ell \dots 7)$$

Atau

$$v_T = (\omega - \omega_0)R_0 \cos \ell - \omega d \dots 8)$$

Persamaan 7 dan 8 valid untuk umum untuk rotasi yang benar-benar melingkar.



Gambar 2. Konstruksi geometris yang digunakan dalam penurunan persamaan (6)

b. Formula Oort

Pengamatan optik bintang di piringan galaksi umumnya dibatasi oleh absorpsi antarbintang pada jarak yang relative kecil dari Matahari. Terdapat persamaan untuk menganalisis langsung karakteristik rotasi galaksi differensial di sekitar Matahari

$$v_R = A d \sin 2\ell \dots 9)$$

Dengan A adalah konstanta Oort A. dari persamaan 9 menunjukkan karena adanya rotasi galaksi differensial, kecepatan radial bintang di piringan galaksi akan menunjukkan variasi gelombang sinus ganda terhadap bujur galaksi dengan amplitude yang bertambah secara linear terhadap jarak. Kemudian persamaan untuk kecepatan tangensial sebagai berikut.

$$v_T = d(A \cos 2\ell + B) \dots 10)$$

$$\mu_\ell = \frac{A \cos 2\ell + B}{4.74}$$

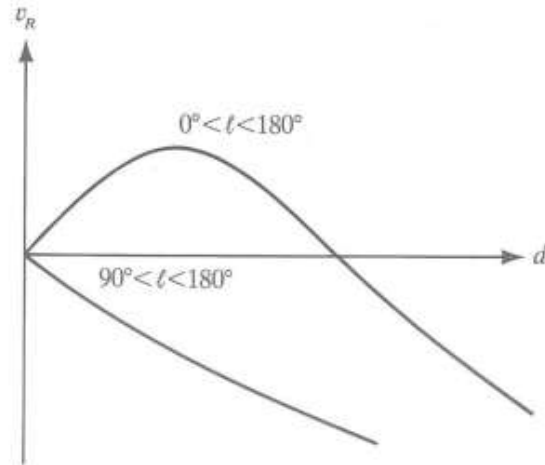
Dengan B adalah konstanta Oort B. Konstanta A dan B bisa digunakan untuk mendeskripsikan kinematika rotasi galaksi karena bisa digunakan untuk mengevaluasi ω_0 dan $\left(\frac{d\Theta}{dR}\right)_{R_0}$. Pada 1928, dari analisis gerak diri, Oort menemukan nilai untuk $A = 19 \text{ km s}^{-1} \text{ kpc}^{-1}$ dan $B = -24 \text{ km s}^{-1} \text{ kpc}^{-1}$. Pada 1964, IAU mengadopsi nilai yang diturunkan oleh Schmidt yaitu $A = 15 \text{ km s}^{-1} \text{ kpc}^{-1}$; $B = -10 \text{ km s}^{-1} \text{ kpc}^{-1}$; $R_0 = 10 \text{ kpc}$; $\Theta_0 = 250 \text{ km/s}$. Dari beberapa perhitungan lainnya didapat nilai $A = 16.9 \text{ km s}^{-1} \text{ kpc}^{-1}$; $B = -11 \pm 3 \text{ km s}^{-1} \text{ kpc}^{-1}$

c. Garis Emisi 21-cm oleh Atom Hidrogen

Hidrogen adalah komponen utama yang diamati dari medium antarbintang di Galaksi kita. Kebanyakan medium antarbintang mengandung atom hydrogen netral di “keadaan dasar” nya. Ketika sebuah electron dalam atom hidrogen reorientasi spinnya, atom tersebut akan memancarkan foton 21-cm. Garis 21-cm adalah pelacak yang sangat berguna karena keberadaan HI pada arah langit tidak pernah ditemukan tanpa emisi yang cukup mudah diamati. serta karena dalam sebagian besar keadaan, medium antarbintang transparan pada panjang gelombang 21 cm sehingga bisa mengungkap hal-hal mengenai seluruh Galaksi jauh lebih baik dari panjang gelombang optik. Sebagai komponen dominan dari medium antarbintang (interstellar medium/ISM), berdasarkan angka HI memungkinkan untuk melacak berbagai proses Galaksi termasuk dampak bintang masif pada ISM; interaksi piringan Galaksi dan halo; siklus hidup ISM; dan pembentukan awan dingin.

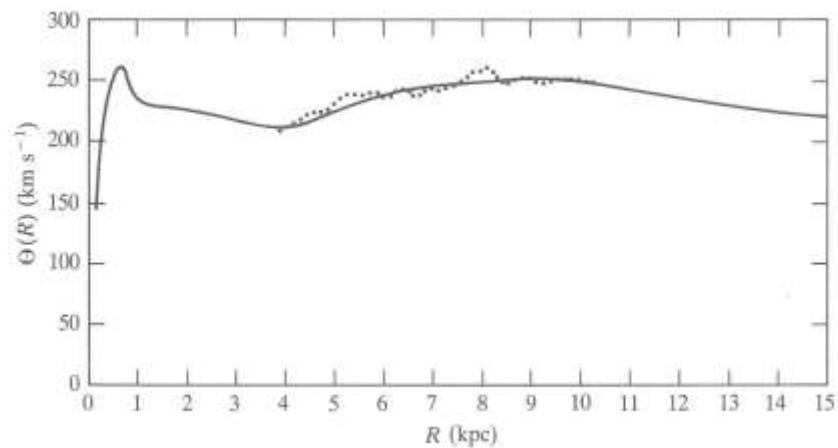
d. Kurva Rotasi dari Pengamatan Garis 21-cm

Asumsi dasar yang dibuat dalam penurunan kurva rotasi umum galaksi kita dari pengamatan 21-cm adalah awan gas bergerak di bidang galaksi pada orbit yang benar-benar melingkar di sekitar pusat galaksi. Dalam kasus ini kecepatan radialnya bisa dinyatakan dalam persamaan 4.



Gambar 3. Kurva Kecepatan radial

Jika diasumsikan bahwa $\omega(R)$ adalah fungsi yang monoton turun terhadap R dari persamaan 1 terlihat bahwa kecepatan radial maksimum (mutlak) akan terjadi di titik tangential dimana $R = R_{min} - R_0 \sin \ell$. Dengan mengamati kecepatan radial maksimum di sepanjang garis pandang pada beberapa bujur galaktik di kuadran $0^\circ \leq \ell \leq 90^\circ$ dan $270^\circ \leq \ell \leq 360^\circ$ akan didapatkan nilai $\omega(R)$ dan $\Theta(R)$ untuk $R \leq R_0$. Di dua kuadran lainnya, tidak ada perbedaan maksimum dalam kurva kecepatan radial sehingga tidak bisa menyimpulkan $\Theta(R)$ untuk $R > R_0$ dari data radio.



Gambar 4. Kurva rotasi $\Theta(R)$ untuk bagian dalam galaksi kita yang diturunkan dari pengamatan 21-cm oleh W.W. Shane dan G.P. Bieger-Smith.

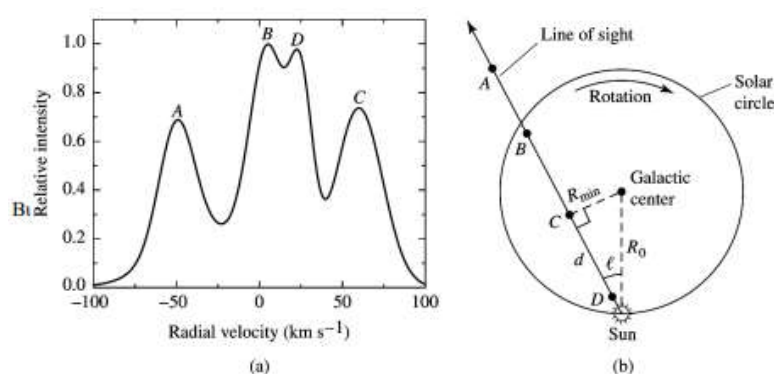
Dari gambar 4 menunjukkan bahwa kurva yang didapat tidaklah mulus tetapi terdapat fluktuasi sekitar $\pm 10 \text{ km s}^{-1}$ terhadap rata-rata pada kurva. Terdapat setidaknya tiga penjelasan untuk ketidakteraturan ini: (1) variasi lokal aktual pada $\omega(R)$ melingkar, (2) celah dalam distribusi pengamatan hydrogen, atau (3) gerak aliran local dari materi relative terhadap gerak melingkar aslinya.

Kemudian, hipotesis pertama dari kurva adalah kurva kecepatan melingkar benar dari galaksi kita tidak mungkin memiliki fluktuasi dari jenis pengamatan yang diturunkan dari kurva rotasi 21-cm karena fluktuasi seperti itu akan menyebabkan distribusi massa galaksi tidak masuk akal. Hipotesis kedua jika ada daerah dimana tidak ada hidrogen di titik tangen maka jelas tidak akan mendapat radiasi dari titik itu, dan oleh karena itu secara sistematis mengabaikan $\omega(R)$ maksimum di sepanjang garis pandang. Dalam hipotesis ini, kurva rotasi benar dibuat dengan titik pengamatan tertinggi. Dari beberapa penelitian, penjelasan ini tidak benar. Kesimpulan yang masuk akal adalah terdapat ketidakteraturan local di medan kecepatan gas, yang memiliki amplitude dengan orde 10 km/s. terdapat bukti yang bisa menunjukkan bahwa *bump* di kurva rotasi dihasilkan oleh gerakan aliran sistematis dari gas yang berdekatan di lengan spiral mayor.

Kecepatan rotasi yang diamati di piringan inti dekat dengan kecepatan melingkar yang diturunkan dari distribusi massa di inti galaksi yang diperoleh dari pengamatan inframerah. Hasil principal yang bisa diperoleh dari kurva rotasi galaksi adalah perkiraan gaya gravitasi di bidang galaksi.

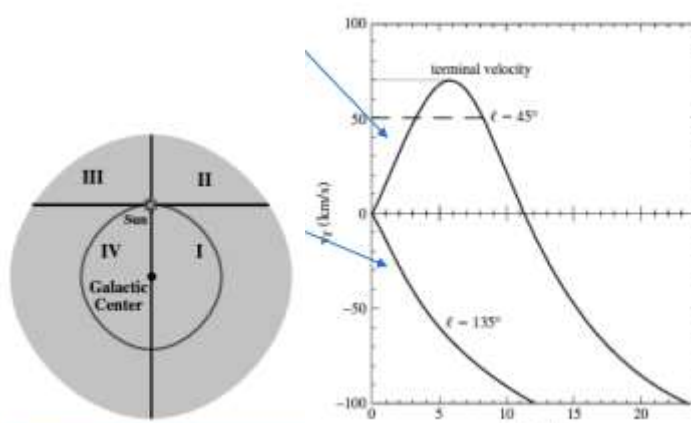
C. Metode

Salah satu metode yang paling efektif untuk mengukur kurva rotasi galaksi adalah dari pergeseran Doppler awan garis emisi HI. Garis hidrogen netral pada panjang gelombang 21 cm ini berguna karena tidak mudah dihamburkan atau diserap oleh debu antarbintang. Lokasi dan kecepatan awan HI tidak dapat ditentukan secara langsung. Namun, kurva rotasi Galaksi masih dapat diukur dengan metode yang disebut *tangent point*. Prinsip utama dari teknik ini adalah menentukan kecepatan radial maksimum melalui awan gas yang terletak di sepanjang garis pandang yang paling dekat dengan pusat galaksi. Setelah kecepatan radial maksimum dan kecepatan LSR diketahui maka dapat ditentukan jarak ke objek galaksi dengan menggunakan persamaan gerak galaksi seperti yang ditunjukkan oleh gambar dibawah.



Gambar 5. Persamaan gerak galaksi

Bagi galaksi menjadi empat kuadran berdasarkan nilai bujur untuk memetakan kecepatan radial di seluruh Galaksi.



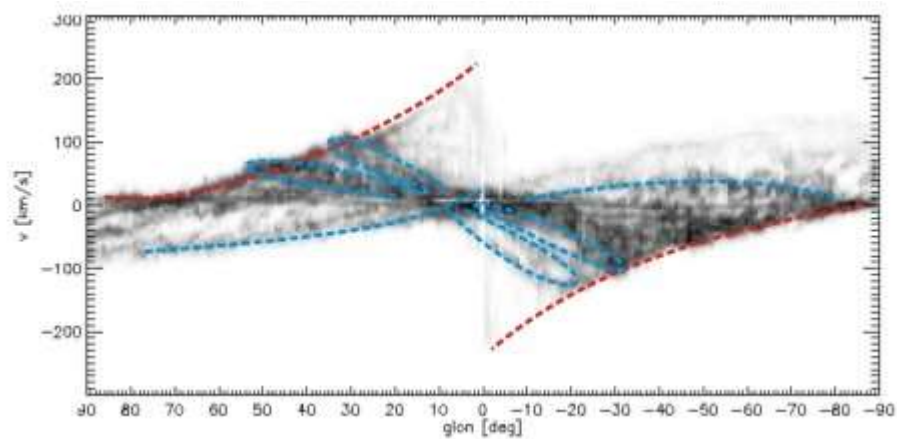
Gambar 6. Proses pemetaan v_r

Dari Gambar 6, dapat disimpulkan bahwa pada Kuadran I ($0^\circ \leq \ell \leq 90^\circ$), kecepatan radial maksimum yang paling dekat dengan pusat galaksi jatuh pada puncak paling kanan atau pada puncak ke C yang ditunjukkan pada Gambar 5a dan kemudian

akan turun pada radius mendekati orbit Matahari. Sedangkan pada kuadran IV ($270^\circ \leq l \leq 360^\circ$), kecepatan radial maksimum akan dihasilkan pada puncak paling kiri atau pada puncak ke A yang ditunjukkan oleh gambar 5a. Nilai yang dihasilkan pada kuadran IV akan sama dengan Kuadran I namun hanya berkebalikan tanda.

Langkah Pengerjaan :

1. Dari hasil survey GASS dan LAB diperoleh data berupa profil kecepatan radial gas HI dengan $b = 0^\circ$ dan $-90^\circ < l < 90^\circ$ dengan jeda $\Delta l = 5^\circ$. Kemudian akan diperiksa untuk masing-masing profil kecepatan radial dan ditentukan kecepatan ekstrim berdasarkan profil yang diperoleh. Kecepatan ekstrim (V_M) merupakan kecepatan maksimum pada $0^\circ \leq l \leq 90^\circ$ dan kecepatan minimum pada $270^\circ \leq l \leq 360^\circ$ yang dapat diperoleh dengan mencari nilai pada saat temperatur antenna yang berkaitan dengan intensitas emisi bernilai maksimum.



Gambar 7. Diagram bujur-kecepatan galaksi (peta intensitas emisi dalam fungsi (l, v))

Untuk menentukan kecepatan ekstrem ditinjau gambar 7 dengan melihat garis putus-putus merah yang menandai awan hidrogen dengan kecepatan 'ekstrem'. Ketika disesuaikan dengan profil HI dari https://www.astro.uni-bonn.de/hisurvey/AllSky_profiles/index.php diperoleh kecenderungan untuk $0^\circ \leq l \leq 90^\circ$ data V_M yang diambil adalah data dengan puncak paling kanan sedangkan untuk $270^\circ \leq l \leq 360^\circ$ data V_M yang diambil adalah data dengan puncak paling kiri. Berikut code python yang digunakan untuk $-90^\circ \leq l \leq 0^\circ$.

```
#Mencari nilai VM
A = []
df = pd.read_csv('spectrum (36).txt', skiprows=4,
header=None, names=['v_lsr', 'T_B', 'freq', 'wavel'],
delim_whitespace=True)
time_series = df['T_B']
indices = find_peaks(time_series)[0]
```

```

fig = go.Figure()
fig.add_trace(go.Scatter(
    y=time_series,
    mode='lines+markers',
    name='Original Plot'
))
fig.add_trace(go.Scatter(
    x=indices,
    y=[time_series[j] for j in indices],
    mode='markers',
    marker=dict(
        size=10,
        color='red',
        symbol='cross'
    ),
    name='Detected Peaks'
))
fig.show()
A.append(df.v_lsr[315])

#Membuat rentang sudut (l)
B = np.linspace(0,90,37)

C = list(zip(B, A))
df = pd.DataFrame(C, columns=['l_a', 'VM_a'])
df.to_csv("Data Atas I.csv")

```

2. Kemudian akan dihitung jarak galaktosentris gas HI yang memancarkan kecepatan ekstrim tersebut, yakni dengan persamaan *tangent-point*

$$R = R_0 \sin l$$

Dimana $R_0 = 8.0 \text{ kpc}$, menyatakan radius orbit Matahari. Berikut *code* Python yang dijalankan.

```

R0 = 8 #kpc
# Untuk data 0° < l < 90°
df['R_a'] = R0*sin(df.l_a)

# Untuk data 270° < l < 360°
df['R_b'] = R0*sin(df.l_b)

```

3. Selanjutnya akan dihitung kecepatan rotasi dengan persamaan

$$V(R) = V_M + V_0 \sin l$$

Dengan kecepatan LSR $V_0 = 220 \text{ km/s}$. Berikut *code* Python yang dijalankan.

```

Vo = 220 #km/s
# Untuk data 0° < l < 90°
df['V(Ra)'] = df['VM_a'] + (Vo*sin(df.l_a))
# Untuk data 270° < l < 360°
df['V(Rb)'] = df['VM_b'] + (Vo*sin(df.l_b))

```

4. Setelah diperoleh kecepatan rotasi kemudian akan dibuat plot kecepatan rotasi $V(R)$ terhadap R . Berikut *code* Python yang kami jalankan.

```
# Untuk 0<l<90
plt.scatter(dfa['R_a'], dfa['V(Ra)'])
plt.ylabel('Orbital Velocity (km/s)')
plt.xlabel('Orbital Radius (kpc)')
plt.title('Plot V(R) terhadap R pada 0° < l < 90°')
plt.grid()
plt.show()
```

5. Kemudian dibuat plot antara V_M dan R/R_0 dengan menggunakan *code* Python berikut.

```
# Untuk 0<l<90
plt.scatter(df.R_a/R0, df.VM_a)
plt.ylabel('VM')
plt.xlabel('Ra/R0')
plt.title('Plot VM terhadap R/R0 pada 0° < l < 90°')
plt.grid()
plt.show()
```

6. Setelah dihasilkan plot, selanjutnya akan dilakukan regresi linier untuk mendapatkan persamaan garis lurus hubungan V_M dan R/R_0 pada $R/R_0 \sim 1$ dengan menggunakan *code* Python berikut.

```
df4 = df[df.R_a/R0>=0.875]
# Untuk 0<l<90
plt.scatter(df4.R_a/R0, df4.VM_a)
plt.ylabel('Orbital Velocity (km/s)')
plt.xlabel('Orbital Radius (kpc)')
plt.title('Plot V(R) terhadap R pada 0° < l < 90°')
m4, b4 = np.polyfit(df4['R_a']/R0, df4.VM_a, 1)
plt.plot(df4['R_a']/R0, m4*df4['R_a']/R0 + b4,
linewidth=5)
plt.grid()
plt.show()

print('Persamaan garis regresi liniernya adalah y = '
      '+str(m4)+'x + '+str(b4))
```

7. Nilai konstanta Oort A dan B dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan yang diberikan dan persamaan regresi linier yang diperoleh yaitu

$$\left(\frac{dV_M}{d \sin l}\right)_{R=R_0} = -2AR_0$$

$$y = mx + b$$

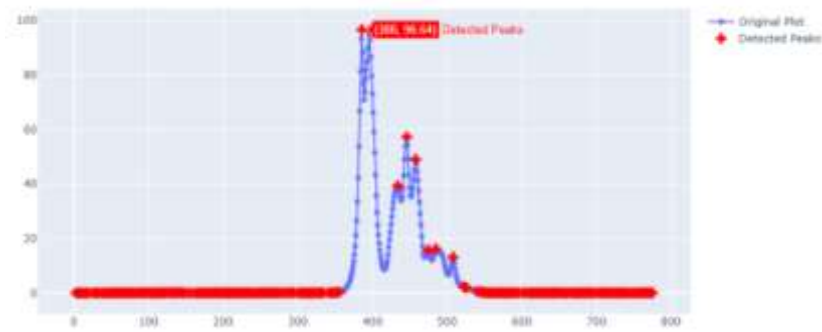
Dengan menggunakan *code* Python berikut maka akan diperoleh nilai konstanta Oort A dan B

```
#Nilai Konstanta Oort A
OortA = -m4/2/R0
```

```
#Nilai Konstanta Oort B
OortB = (-m4/2/R0) - (V0/R0)
```

D. Hasil dan Analisis

Berdasarkan pemilihan kecepatan ekstrim dengan menggunakan grafik dari data hasil survey GASS dan LAB pada $0^\circ \leq l \leq 90^\circ$ dan $270^\circ \leq l \leq 360^\circ$ dengan menggunakan grafik plot pada modul Python berikut.



Gambar 8. Plot yang digunakan untuk pemilihan kecepatan ekstrim

Setelah diperoleh nilai kecepatan ekstrim, akan dihitung jarak galaktosentris gas HI dan kecepatan rotasi dengan persamaan berikut.

$$R = R_0 \sin l$$

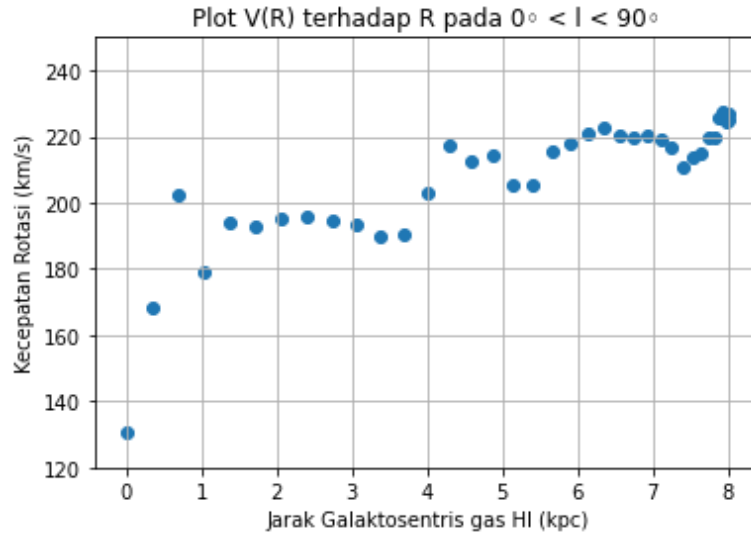
$$V(R) = V_M + V_0 \sin l$$

Diperoleh data sebagai berikut.

Tabel 1. Hasil V_M dari profil survey HI per $\Delta l = 5$ dan $b = 0$ untuk $0^\circ \leq l \leq 90^\circ$ dan $270^\circ \leq l \leq 360^\circ$

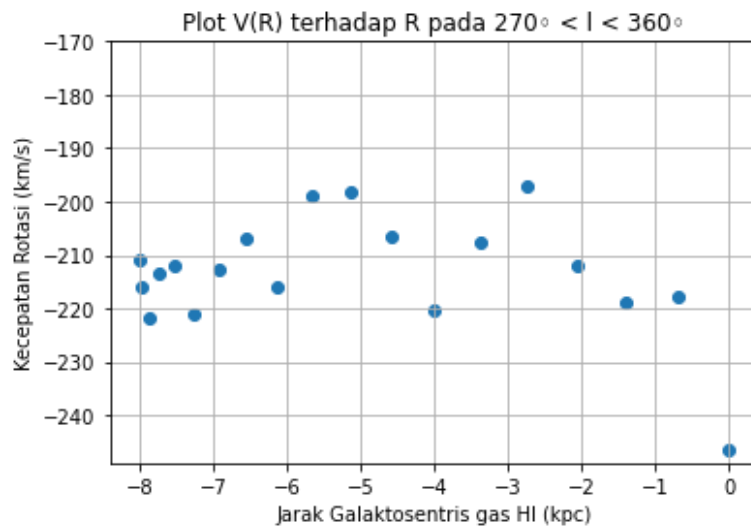
$l(\text{deg})$	$V(\text{M})$	$R(\text{kpc})$	$V(R)$	$l(\text{deg})$	$V(\text{M})$	$R(\text{kpc})$	$V(R)$
0.0	130.87	0.000000	130.870000	270	9.07	-8.000000e+00	-210.930000
5.0	183.43	0.697246	202.604263	275	3.09	-7.969558e+00	-216.072834
10.0	155.60	1.389185	193.802599	280	-5.15	-7.878462e+00	-221.807706
15.0	138.08	2.070552	195.020190	285	-0.82	-7.727407e+00	-213.323682
20.0	119.53	2.736161	194.774432	290	-5.15	-7.517541e+00	-211.882377
25.0	96.88	3.380946	189.856018	295	-21.64	-7.250462e+00	-221.027713
30.0	92.75	4.000000	202.750000	300	-22.26	-6.928203e+00	-212.785589
35.0	86.56	4.588611	212.746816	305	-26.79	-6.553216e+00	-207.003450
40.0	63.89	5.142301	205.303274	310	-47.40	-6.128356e+00	-215.929777
45.0	59.77	5.656854	215.333492	315	-43.28	-5.656854e+00	-198.843492
50.0	52.56	6.128356	221.089777	320	-56.89	-5.142301e+00	-198.303274
55.0	40.19	6.553216	220.403450	325	-80.38	-4.588611e+00	-206.566816
60.0	29.88	6.928203	220.405589	330	-110.26	-4.000000e+00	-220.260000
65.0	17.52	7.250462	216.907713	335	-114.60	-3.380946e+00	-207.576018
70.0	7.21	7.517541	213.942377	340	-122.02	-2.736161e+00	-197.264432
75.0	7.21	7.727407	219.713682	345	-155.00	-2.070552e+00	-211.940190
80.0	9.27	7.878462	225.927706	350	-180.54	-1.389185e+00	-218.742599
85.0	5.15	7.969558	224.312834	355	-198.68	-6.972459e-01	-217.854263
90.0	5.15	8.000000	225.150000	360	-246.50	-1.959435e-15	-246.500000

Metode *tangent point* tidak dapat digunakan untuk emisi gas pada $90^\circ < l < 270^\circ$ karena dengan melihat gambar 6 untuk kuadran II dan III nilai R akan lebih besar dari R_0 . Sehingga geometri untuk metode tangent point akan menjadi ambigu dan menyulitkan untuk mencari tahu jarak aktual objek. Selain itu, bisa dilihat dari gambar 6 sebelah kanan tidak ada v_R maksimum untuk kuadran II ($90^\circ < l < 180^\circ$) tetapi d meningkat sepanjang pertambahan l . begitu pula untuk kuadran III ($180^\circ < l < 270^\circ$) serupa dengan kuadran II tapi dengan tanda yang berkebalikan. Berikut merupakan kurva rotasi untuk data $0^\circ \leq l \leq 90^\circ$.



Gambar 9. Kurva rotasi untuk data $0^\circ \leq l \leq 90^\circ$

Dari kurva yang diperoleh (gambar 9), pada R kecil kecepatan rotasi meningkat bersama dengan meningkatnya jarak galaktosentris gas HI. Salah satu penyebabnya, menurut LAB Survey, pada $l < 20^\circ$ nilai kecepatan rotasi cenderung acak yang disebabkan oleh kecepatan rotasi di dalam Bimasakti memiliki ketidakpastian yang sangat tinggi. Sedangkan pada $R \sim R_0$, kecepatan rotasi cenderung landai dengan meningkatnya jarak galaktosentris gas HI. Berikut merupakan tampilan dari kurva rotasi untuk $270^\circ < l \leq 360^\circ$.

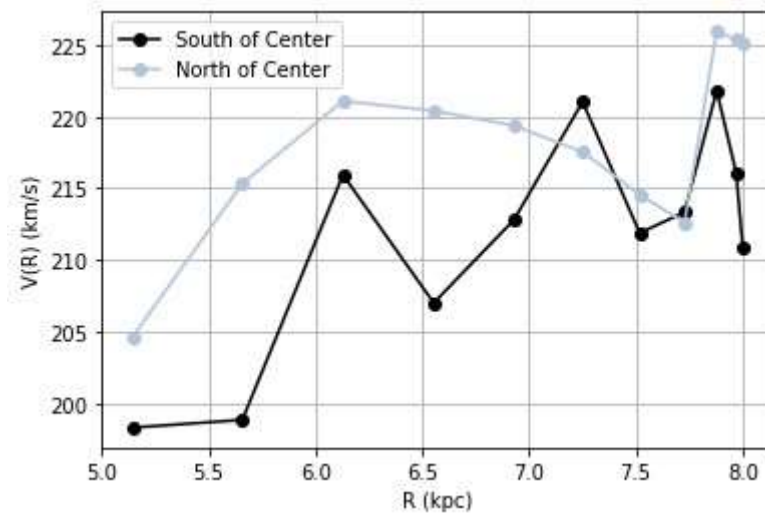


Gambar 10. Kurva rotasi untuk data $270^\circ < l \leq 360^\circ$

Sedangkan dari kurva pada gambar 10 diperoleh bahwa pada R kecil kecepatan rotasi meningkat bersama dengan meningkatnya jarak galaktosentris gas HI. Sedangkan

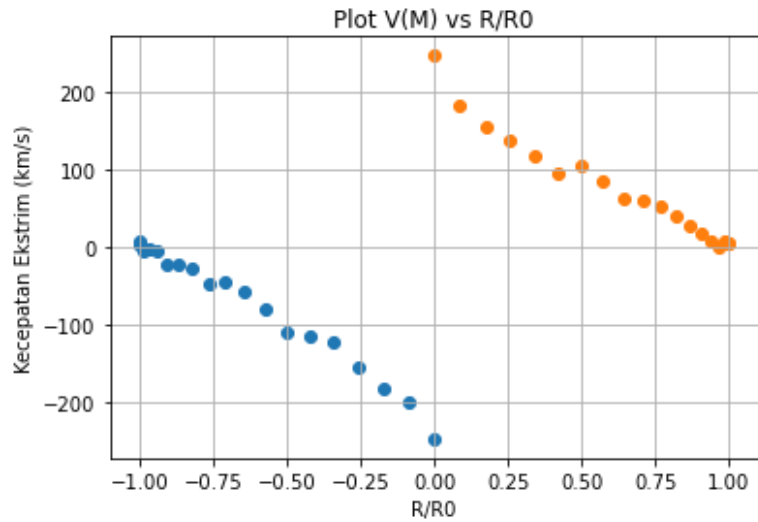
pada $R \sim R_0$, kecepatan rotasi cenderung landai dengan meningkatnya jarak galaktosentris gas HI.

Alasan mengapa pada R kecil kecepatan rotasi meningkat bersama dengan meningkatnya jarak galaktosentris gas HI adalah massa yang terlingkupi meningkat dengan cepat dengan jarak radial sehingga kecepatan rotasi galaksi akan meningkat pada jarak radial yang kecil. Kemudian, kurva rotasi yang landai pada jarak radial yang mendekati R_0 pada dasarnya menunjukkan bahwa terdapat materi tambahan yang terlingkupi namun bukan dalam bentuk materi tampak (*visible mass*) tetapi dalam bentuk materi gelap (*luminous matter*). Jika semua materi di Galaksi dalam bentuk materi yang menghasilkan cahaya, maka seharusnya kurva rotasi yang dihasilkan menurun sesuai dengan dinamika Newton.



Gambar 11. Perbandingan kurva rotasi dari data pengamatan radio 21-cm untuk data langit utara ($0^\circ \leq l \leq 90^\circ$) dan langit selatan ($270^\circ \leq l \leq 360^\circ$).

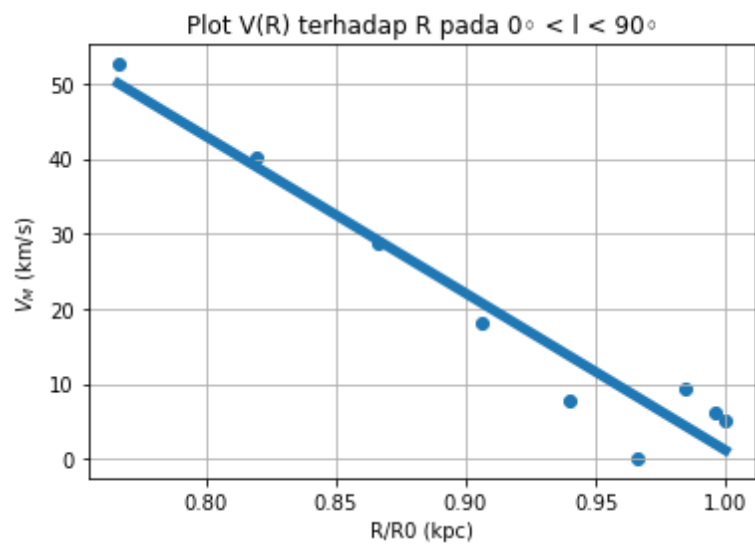
Dari gambar 9 dan 10 terlihat bahwa profil kurva rotasi untuk data belahan utara dan belahan selatan memberikan kurva rotasi yang hampir sama akan tetapi terdapat perbedaan arah seperti dicerminkan karena gambar 9 terletak pada kuadran I sedangkan gambar 10 terdapat di kuadran IV sehingga menyebabkan perbedaan tanda untuk R nya. Perbandingan keduanya lebih jelas dapat dilihat dari gambar 11. Berikut adalah plot kecepatan maksimum $V(M)$ terhadap R/R_0 .



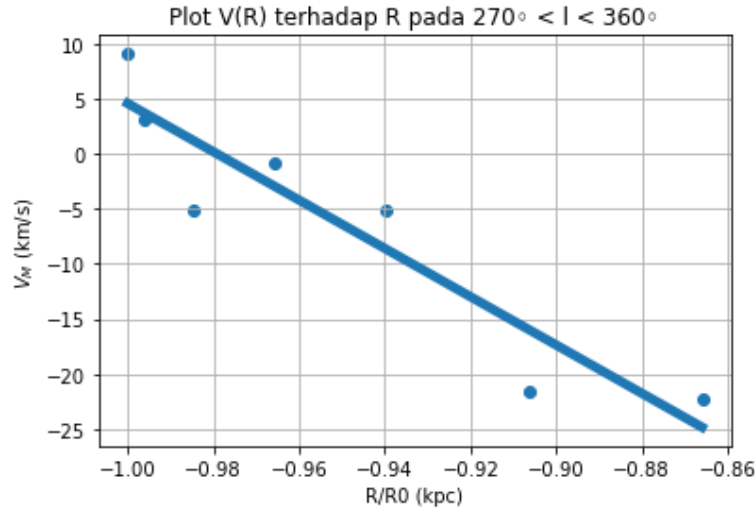
Gambar 12. Plot Kecepatan Ekstrim terhadap R/R_0

Untuk data $0^\circ \leq l \leq 90^\circ$, kecepatan ekstrim akan mulai mendekati garis lurus pada jarak galaktosentris gas HI 6 kpc dan untuk data $270^\circ \leq l \leq 360^\circ$ diperoleh jarak galaktosentris gas HI ketika kecepatan ekstrim mendekati garis lurus adalah 6.8 kpc.

Persamaan garis lurus hubungan V_M dan R/R_0 diperoleh dengan melakukan regresi linier berikut



Gambar 12 . Regresi Linear pada $R/R_0 \leq 0.75$



Gambar 13. Regresi Linear pada $R/R_0 \leq -0.85$

Diperoleh persamaan regresi linear untuk $0^\circ \leq l \leq 90^\circ$ adalah $y = -208.81x + 209.972$, sedangkan untuk $270^\circ \leq l \leq 360^\circ$ adalah $y = -219.51x - 214.938$. Maka, berdasarkan persamaan regresi linearnya maka untuk rentang $0^\circ \leq l \leq 90^\circ$ nilai $m = -208.81$ dan $c = 209.972$. Sedangkan untuk rentang $270^\circ \leq l \leq 360^\circ$ nilai $m = -219.51$ dan $c = -214.938$. Selanjutnya untuk menghitung konstanta Oort A dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan hasil regresi linier dengan persamaan berikut.

$$\left(\frac{dV_M}{d \sin l} \right)_{R=R_0} = -2AR_0$$

Dengan $\left(\frac{dV_M}{d \sin l} \right)_{R=R_0}$ menyatakan gradien (m) dari persamaan garis linear yang diperoleh. Sehingga nilai konstanta Oort A yaitu untuk $0^\circ \leq l \leq 90^\circ$ adalah 13.05 dan untuk $270^\circ \leq l \leq 360^\circ$ adalah 13.71. Sedangkan nilai konstanta oort A yang didapatkan dari referensi yaitu $A = 19 \text{ km s}^{-1} \text{ kpc}^{-1}$ (Oort, 1928), $A = 15 \text{ km s}^{-1} \text{ kpc}^{-1}$ (IAU, 1964) dan dari beberapa perhitungan lainnya $A = 16.9 \text{ km s}^{-1} \text{ kpc}^{-1}$. jika dibandingkan dengan nilai referensi ini, nilai konstanta oort A hasil perhitungan lebih kecil. Hal ini disebabkan karena terdapat perbedaan asumsi saat memilih nilai R_0 dan V_0 . Selain itu, pemilihan V_M pada data hasil survey juga berpengaruh. Hasil survei yang digunakan dalam menentukan konstanta oort A pada tugas ini juga berbeda dengan hasil survei yang digunakan dalam menentukan konstanta oort A pada referensi. Konstanta oort A merepresentasikan pergeseran lokal atau simpangan dari rotasi benda padat.

Sedangkan konstanta Oort B diperoleh dengan menggunakan persamaan

$$A - B = V_0/R_0$$

Dengan $V_0 = 222 \text{ km/s}$ dan $R_0 = 8 \text{ kpc}$. Sehingga diperoleh konstanta Oort B yaitu untuk $0^\circ \leq l \leq 90^\circ$ adalah -14.69 dan untuk $270^\circ \leq l \leq 360^\circ$ adalah -14.03 . Nilai konstanta oort B dari beberapa referensi yaitu $B = -24 \text{ km s}^{-1} \text{ kpc}^{-1}$ (Oort, 1928), $B = -10 \text{ km s}^{-1} \text{ kpc}^{-1}$ (IAU, 1964) dan dari beberapa perhitungan lainnya $B = -11 \pm 3 \text{ km s}^{-1} \text{ kpc}^{-1}$. Jika dibandingkan dengan nilai referensi ini, terdapat perbedaan nilai konstanta oort B, ada yang menunjukkan bahwa hasil perhitungan lebih kecil dan lebih besar. Namun, ada pula nilai yang masuk rentang. Perbedaan disebabkan karena terdapat perbedaan asumsi saat memilih nilai R_0 dan V_0 . Selain itu, pemilihan V_M pada data hasil survei juga berpengaruh. Hasil survei yang digunakan dalam menentukan konstanta oort B pada tugas ini juga berbeda dengan hasil survei yang digunakan dalam menentukan konstanta oort B pada referensi. Konstanta oort B merepresentasikan vortisitas lokal atau gradien dari momentum sudut.

E. Kesimpulan

Dengan menggunakan metode *tangen point*, didapat kurva rotasi galaksi pada gambar 9 dan 10. berdasarkan kurva tersebut diperoleh bahwa pada R kecil kecepatan rotasi meningkat bersama dengan meningkatnya jarak galaktosentris gas HI. Sedangkan pada $R \sim R_0$, kecepatan rotasi cenderung landai dengan meningkatnya jarak galaktosentris gas HI. Nilai parameter rotasi differensial yang didapat dari tugas ini yaitu untuk konstanta oort $A = 13.051$ untuk $0^\circ \leq l \leq 90^\circ$ dan $A = 13.72$ untuk $270^\circ \leq l \leq 360^\circ$. Sedangkan konstanta oort $B = -14.699$ untuk $0^\circ \leq l \leq 90^\circ$ dan $B = -14.03$ untuk $270^\circ \leq l \leq 360^\circ$.

DAFTAR PUSTAKA

- Mihalas, D., & Binney, J. (1981). Galactic astronomy. Structure and kinematics. *San Francisco: Freeman*.
- Materi Kuliah AS3202 Fisika Galaksi, tahun 2022, oleh M. Ikbal Arifyanto
- Kalberla, P. M., Burton, W. B., Hartmann, D., Arnal, E. M., Bajaja, E., Morras, R., & Pöppel, W. G. L. (2005). The leiden/argentine/bonn (lab) survey of galactic hi-final data release of the combined lds and iar surveys with improved stray-radiation corrections. *Astronomy & Astrophysics*, 440(2), 775-782.
- Mahdi, H. S., & Mohsin, D. S. (2017). Determination of the Rotation Curve of the Milky Way Using the 21 cm hi Emission Line. *Iraqi Journal of Science*, 58(2C), 1169-1176.
- McClure-Griffiths, N. M., Pisano, D. J., Calabretta, M. R., Ford, H. A., Lockman, F. J., Staveley-Smith, L., ... & Newton-McGee, K. (2009). GASS: the Parkes galactic all-sky survey. I. Survey description, goals, and initial data release. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 181(2), 398.
- ASTR 421: Galaxies. (2011). Diakses 24 April 2022 dari astronomy.case.edu: <http://astroweb.case.edu/ssm/ASTR421/lecture11.pdf>