

TUGAS AKHIR

BATASAN DARI PELURUHAN MATERI GELAP MENJADI NEUTRINO



Michael Hidayat

NPM: 2013720005

PROGRAM STUDI FISIKA
FAKULTAS TEKNOLOGI INFORMASI DAN SAINS
UNIVERSITAS KATOLIK PARAHYANGAN
2017

FINAL PROJECT

**CONSTRAINTS ON DARK MATTER DECAYING INTO
NEUTRINOS**



Michael Hidayat

NPM: 2013720005

**DEPARTMENT OF PHYSICS
FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY AND SCIENCES
PARAHYANGAN CATHOLIC UNIVERSITY
2017**

LEMBAR PENGESAHAN

**BATASAN DARI PELURUHAN MATERI GELAP MENJADI
NEUTRINO**

MICHAEL HIDAYAT

NPM: 2013720005



Bandung, 02 Juni 2017

Menyetujui,

Pembimbing Utama

Paulus Cahyono Tjiang, Ph.D.

Pembimbing Pendamping

Reinard Primulando, Ph.D.

Ketua Tim Penguji

Suharyo Sumowidagdo, Ph.D.

Anggota Tim Penguji

Reinard Primulando, Ph.D.

Mengetahui,

Ketua Program Studi

Philips Nicolas Gunawidjaja, Ph.D.



PERNYATAAN

Dengan ini saya yang bertandatangan di bawah ini menyatakan bahwa tugas akhir dengan judul:

BATASAN DARI PELURUHAN MATERI GELAP MENJADI NEUTRINO

adalah benar-benar karya saya sendiri, dan saya tidak melakukan penjiplakan atau pengutipan dengan cara-cara yang tidak sesuai dengan etika keilmuan yang berlaku dalam masyarakat keilmuan.

Atas pernyataan ini, saya siap menanggung segala risiko dan sanksi yang dijatuhkan kepada saya, apabila di kemudian hari ditemukan adanya pelanggaran terhadap etika keilmuan dalam karya saya, atau jika ada tuntutan formal atau non-formal dari pihak lain berkaitan dengan keaslian karya saya ini.

Dinyatakan di Bandung,
Tanggal 02 Juni 2017



Michael Hidayat
NPM: 2013720005

ABSTRAK

Keberadaan materi gelap di alam semesta sudah dibuktikan dengan berbagai pengamatan dan materi gelap diketahui mengisi 26.8 % di alam semesta kita. Akan tetapi hingga saat ini tidak ada seorang pun yang mengetahui karakteristik materi gelap. Oleh sebab itu dapat dibuat banyak asumsi untuk mengetahui karakteristik materi gelap, salah satunya adalah asumsi bahwa materi gelap dapat meluruh menjadi neutrino. Batasan dari peluruhan materi gelap menjadi neutrino sudah dibahas pada pengamatan ICE CUBE [1] dan akan dicari sebuah batasan baru dari peluruhan tersebut dengan menggunakan konstanta *coupling g* yang sama. Batasan baru tersebut didapatkan dengan melihat sifat alami neutrino yang dapat berinteraksi dengan *W* dan *Z* boson, diikuti dengan fakta bahwa *W* dan *Z* boson (radiasi *electroweak* boson) dapat meluruh menjadi antiproton setelah hadronisasi. Hasil yang didapatkan adalah pengamatan radiasi *electroweak* boson lebih baik dibandingkan dengan pengamatan peluruhan materi gelap menjadi neutrino ketika massa materi gelapnya besar. Pengamatan radiasi *electroweak* boson lebih baik ketika massa materi gelapnya adalah lebih dari 38 TeV untuk channel *e* dan lebih dari 35 TeV untuk channel μ dan τ . Sebuah batasan baru ketika nilai chi squared 35.17 untuk konstanta *coupling g* didapatkan dari radiasi *electroweak* boson pada channel *e* ketika massa materi gelapnya lebih dari 38 TeV dan lebih besar dari 35 TeV untuk channel μ dan τ .

Kata-kata kunci: Antiproton, materi gelap, neutrino, radiasi *electroweak* boson

ABSTRACT

The existence of dark matter in the universe has been proven by various observations. Today we know that dark matter fills 26.8 % of our universe. However the characteristics of dark matter is still elusive. Therefore, many assumptions can be made to know the characteristics of dark matter, one can assume that dark matter can decay into neutrinos only. The constraints on the decay of dark matter to neutrinos only have been discussed in ICE CUBE observation [1] and will be sought a new constraints of the decay using the same coupling g constants. The new constraints is obtained by looking at the nature of neutrinos that can interact with W and Z boson (electroweak boson radiation), followed by the fact that W and Z boson could decay into antiprotons after hadronization. The result is that the observation of the electroweak boson radiation might be better than the decay of dark matter to neutrinos only for a large value of dark matter mass. The observation of electroweak boson radiation decaying to antiproton makes the constraints to be better when the dark matter mass is over 38 TeV for channel e and over 35 TeV for channel μ and τ . A new constraints when chi squared value is 35.17 for g coupling constant is found from electroweak boson radiation at e channel when the mass of dark matter is more than 38 TeV and more than 35 TeV at μ and τ channel.

Keywords: Antiproton, dark matter, electroweak boson radiation, neutrinos

Fisika UNPAR

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa karena atas berkatNya penulis dapat menyelesaikan skripsi ini dengan judul "Batasan Dari Peluruhan Materi Gelap Menjadi Neutrino" dengan baik dan lancar. Penulisan skripsi ini merupakan salah satu persyaratan untuk memperoleh gelar Sarjana Sains di Fakultas Teknologi Informasi dan Sains Universitas Katolik Parahyangan. Penulis menyadari dalam penyusunan skripsi ini tidak terlepas dari bantuan berbagai pihak yang telah memberikan bimbingan dan arahan yang berguna bagi penulisan ini. Oleh sebab itu, dengan segala ketulusan hati penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Bapak Paulus Cahyono Tjiang, Ph.D selaku dosen pembimbing utama yang dengan sabar, setia, membimbing, dan mengarahkan penulis.
2. Bapak Reinard Primulando, Ph.D selaku dosen pembimbing serta yang menyumbangkan ide penelitian dan dengan penuh kesabaran mengarahkan penulis.
3. Bapak Suharyo Sumowidagdo, Ph.D selaku dosen penguji yang memberikan banyak masukan kepada penulis.
4. Kedua orang tua penulis yang telah membiayai saya kuliah dan mendukung penulis dalam segala hal.
5. Adik-adik penulis, Malvin dan Cellina yang selalu mendukung, memberikan semangat, dan mendoakan penulis dalam penyelesaian skripsi.
6. Dosen Fisika UNPAR: Prof Beni, Pak Rusli, Pak Philips, Ibu Risti, Pak Janto, Ibu Flaviana, Pak Kian Ming, Ibu Farica, Ibu Sylvi, Ibu Elok, dan Pak Haryanto yang telah mengajarkan banyak hal dan pengalaman di ilmu Fisika kepada penulis.
7. Dekanat FTIS UNPAR.
8. Staf TU dan karyawan FTIS UNPAR.
9. Sensius Seno, Silvi, Melissa, Alvin, Shierly, dan Ines yang telah banyak mengisi waktu dan memberikan dukungan kepada penulis.
10. Mahasiswa Fisika UNPAR angkatan 2010 hingga 2016.
11. Rekan-rekan kerja Majelis Perwakilan Mahasiswa 2015/2016.
12. Rekan-rekan kerja PM FTIS, khususnya kepada Marcel, Caroline, M. Sovy, Andreas, dan Sesilia yang telah menjadi rekan kerja penulis selama setahun.
13. Ring 1 Bengkel Sains UNPAR dan pengajar Bengkel Sains UNPAR yang telah bersedia menyediakan waktu dan bersama-sama memperbaiki sistem Bengkel Sains UNPAR.
14. Panitia Science Fest 2016, khususnya divisi acara: Arifin, Maria, Marcel, Baskara, Dini, Shierly, Cindy, dan Bhima.

15. Para siswa/i yang pernah saya ajar di Bengkel Sains UNPAR, khususnya siswa/i SMAK 1 BPK Penabur, SMAK 2 BPK Penabur, SMA St. Maria 1, SMP Pandu, dan SMP St. Ursula.
16. Para penghuni laboran Fisika Dasar yang telah maklum dengan keributan dan kegalakan penulis.
17. Para asisten laboratorium Fisika Dasar.
18. Rekan-rekan SMA St. Aloysius 2.
19. Rekan-rekan TK-SMP Daya Susila Garut.
20. Alumni Program Studi Fisika.

Bandung, Juni 2017

Penulis

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	xv
DAFTAR ISI	xvii
DAFTAR GAMBAR	xix
DAFTAR TABEL	xxi
1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	5
1.3 Tujuan Penulisan	5
1.4 Batasan Masalah Penulisan	6
1.5 Sistematika Penulisan	6
2 DASAR TEORI	7
2.1 Lagrangian <i>density</i> materi gelap yang dapat meluruh menjadi pasangan neutrino dan antineutrino	7
2.2 Cara Mendeteksi Materi Gelap	8
2.2.1 Mendeteksi Materi Gelap Secara Langsung	8
2.2.2 Mendeteksi Materi Gelap Secara Tidak Langsung	9
2.2.3 Detektor PAMELA, AMS-02, dan <i>ICE CUBE</i>	9
2.3 Model Standar	12
2.4 Interaksi Lemah	12
2.4.1 Interaksi Lemah Lepton yang Bermuatan	12
2.4.2 Interaksi Lemah Netral	13
2.5 Cara Menghitung <i>Decay Rate</i> dan <i>Lifetime</i>	14
2.5.1 Aturan Feynman	14
2.5.2 Trik Casimir dan Teorema Trace	15
2.5.3 <i>Golden Rule</i> untuk Peluruhan Partikel	15
2.5.4 <i>Decay Rate</i> dan <i>Lifetime</i>	16
2.6 Fluks Antiproton yang Diproduksi di Halo Galaksi Bimasakti dan Propagasinya ke Bumi	16
3 HASIL DAN PEMBAHASAN	19
3.1 Peluruhan Parsial Materi Gelap Menjadi Neutrino dan Antineutrino	19
3.2 Peluruhan Parsial Materi Gelap Menjadi Neutrino, Antineutrino, dan Z Boson	20
3.2.1 Perhitungan untuk $ \mathcal{M}_1 ^2$	21
3.2.2 Perhitungan untuk $ \mathcal{M}_2 ^2$	21
3.2.3 Perhitungan untuk $\mathcal{M}_1\mathcal{M}_2^*$	22
3.2.4 Perhitungan untuk $\mathcal{M}_2\mathcal{M}_1^*$	22
3.2.5 Perhitungan untuk $ \mathcal{M} ^2$	22

3.2.6	Perhitungan <i>Decay Rate</i> dan <i>Lifetime</i> Peluruhan Parsial Materi Gelap Menjadi Neutrino, Antineutrino, dan Z Boson	23
3.3	Peluruhan Parsial Materi Gelap Menjadi Neutrino/Antineutrino, Lepton/Antilepton, dan W Boson	23
3.3.1	Perhitungan untuk $ \mathcal{M}_1 ^2$	24
3.3.2	Perhitungan untuk $ \mathcal{M}_2 ^2$	24
3.3.3	Perhitungan untuk $\mathcal{M}_1\mathcal{M}_2^*$	25
3.3.4	Perhitungan untuk $\mathcal{M}_2\mathcal{M}_1^*$	25
3.3.5	Perhitungan untuk $ \mathcal{M} ^2$	26
3.3.6	Perhitungan <i>Decay Rate</i> dan <i>Lifetime</i> Peluruhan Parsial Materi Gelap Menjadi Neutrino/Antineutrino, Lepton/Antilepton, dan W Boson	26
3.4	Perbandingan batasan (<i>constraints</i>) antara $\phi \rightarrow \nu\bar{\nu}$, $\phi \rightarrow \nu\bar{\nu}Z$ dan $\phi \rightarrow \nu Wl$	26
3.4.1	Perbandingan kurva parsial <i>decay width</i> terhadap massa materi gelap dari $\phi \rightarrow \nu\bar{\nu}$ atau $\phi \rightarrow \nu\bar{\nu}Z$ dan $\phi \rightarrow \nu Wl$	27
3.4.2	Perbandingan chi squared terhadap massa materi gelap dari $\phi \rightarrow \nu\bar{\nu}$ atau $\phi \rightarrow \nu\bar{\nu}Z$ dan $\phi \rightarrow \nu Wl$	28
3.4.3	Perbandingan kurva konstanta <i>coupling g</i> terhadap massa materi gelap dari $\phi \rightarrow \nu\bar{\nu}$ atau $\phi \rightarrow \nu\bar{\nu}Z$ dan $\phi \rightarrow \nu Wl$	29
4	PENUTUP	33
4.1	Simpulan	33
4.2	Saran	33
	DAFTAR REFERENSI	35
	A TEOREMA TRACE	37
	B <i>Decay rate</i> DAN <i>Lifetime</i> PELURUHAN PARSIAL MATERI GELAP MENJADI NEUTRINO, ANTINEUTRINO, DAN Z BOSON	39
B.1	Perhitungan untuk $ \mathcal{M}_1 ^2$	39
B.2	Perhitungan untuk $ \mathcal{M}_2 ^2$	40
B.3	Perhitungan untuk $\mathcal{M}_1\mathcal{M}_2^*$	40
B.4	Perhitungan untuk $\mathcal{M}_2\mathcal{M}_1^*$	40
B.5	Perhitungan untuk $ \mathcal{M} ^2$	41
B.6	Perhitungan <i>Decay Rate</i> dan <i>Lifetime</i> Peluruhan Parsial Materi Gelap Menjadi Neutrino, Antineutrino, dan Z Boson	41
	C <i>Decay rate</i> DAN <i>lifetime</i> PELURUHAN PARSIAL MATERI GELAP MENJADI NEUTRINO/ANTINEUTRINO, LEPTON/ANTILEPTON, DAN W BOSON	47
C.1	Perhitungan untuk $ \mathcal{M}_1 ^2$	47
C.2	Perhitungan untuk $ \mathcal{M}_2 ^2$	48
C.3	Perhitungan untuk $\mathcal{M}_1\mathcal{M}_2^*$	48
C.4	Perhitungan untuk $\mathcal{M}_2\mathcal{M}_1^*$	48
C.5	Perhitungan untuk $ \mathcal{M} ^2$	48
C.6	Perhitungan <i>Decay Rate</i> dan <i>Lifetime</i> Peluruhan Parsial Materi Gelap Menjadi Neutrino/Antineutrino, lepton/antilepton, dan W Boson	49
	D <i>Chi Squared</i>	55

DAFTAR GAMBAR

1.1	Kecepatan bintang-bintang $v(r)$ akan sebanding dengan r apabila bintang-bintang tersebut berada di sekitar daerah $r < R$. Akan tetapi kecepatan bintang-bintang $v(r)$ akan sebanding dengan $\frac{1}{\sqrt{r}}$ ketika bintang-bintang tersebut berada pada jarak $r > R$ dari pusat galaksi.	2
1.2	Kurva kecepatan rotasi bintang-bintang pada galaksi NGC 6503. Pada kurva kecepatan rotasi di atas terdapat 3 buah komponen, yaitu garis putus-putus yang merepresentasikan <i>disk</i> galaksi; titik putus-putus yang merepresentasikan gas; juga garis dan titik putus-putus yang merepresentasikan halo materi gelap. <i>Disk</i> galaksi tersusun atas komponen gas dan debu-debu [2] dan kontribusi terhadap kecepatan menurun seiring dengan bertambah jauh jarak <i>disk</i> terhadap pusat galaksi. Sedangkan pada gas, kecepatannya relatif konstan pada kecepatan 25 km/s. Halo adalah sebuah daerah yang terdiri dari objek-objek yang bersinar dan termasuk materi gelap yang mengelilingi galaksi. Kecepatan bintang-bintang yang dihasilkan pada kurva kecepatan rotasi hampir sama dengan kurva halo pada jarak sekitar 8 sampai 20 kpc. Sumber gambar diambil dari referensi [3].	3
1.3	Citra ganda sebagai efek dari <i>strong lensing</i> pada galaksi SDSS J1038+4849 yang diambil oleh Teleskop Ruang Angkasa Hubble. Sumber gambar diambil dari www.nasa.gov/content/hubble-sees-a-smiling-lens yang dikunjungi pada tanggal 26 September 2016.	3
1.4	Citra yang terdistorsi akibat <i>weak lensing</i> pada galaksi CL0024+17 ditandai dengan tanda panah. Sumber gambar diambil dari http://inspirehep.net/record/822539/plots yang dikunjungi pada tanggal 10 Oktober 2016.	4
1.5	<i>Bullet cluster</i>	4
2.1	Diagram Feynman untuk materi gelap yang meluruh menjadi pasangan neutrino ν dan antineutrino $\bar{\nu}$	8
2.2	Prinsip kerja TRD. Sumber gambar diambil dari http://www.ams02.org/what-is-ams/tecnology/trd/ yang dikunjungi pada tanggal 11 November 2016 pukul 10.15.	10
2.3	Interaksi elektron yang ditandai dengan garis merah yang memproduksi <i>electromagnetic shower</i> . Sumber gambar diambil dari http://www.ams02.org/what-is-ams/tecnology/ecal/ pada tanggal 12 November 2016 pukul 09.29.	11
2.4	Partikel elementer dari model standar beserta dengan keterangan massa, muatan, dan <i>spin</i> partikel elementer tersebut. Sumber gambar diambil dari [4].	12
2.5	Lepton terkonservasi menjadi neutrino yang saling berkaitan dan mengemisikan W^- . Sumber gambar diambil dari [5].	13
2.6	Diagram Feynman untuk interaksi lemah dengan f adalah lepton atau quark yang terlibat dan Z adalah mediator interaksi lemah. Sumber gambar diambil dari [5].	13
2.7	Kontribusi faktor pada garis eksternal di diagram Feynman. Sumber gambar diambil dari [5].	14

3.1	Diagram Feynman untuk materi gelap yang meluruh parsial menjadi pasangan neutrino dan antineutrino.	19
3.2	Diagram Feynman untuk peluruhan materi gelap menjadi neutrino ν , antineutrino $\bar{\nu}$, dan Z boson.	20
3.3	Diagram Feynman untuk materi gelap yang meluruh parsial menjadi neutrino/antineutrino, lepton/antilepton, dan W boson.	24
3.4	Kurva parsial <i>decay width</i> terhadap massa materi gelap dari peluruhan parsial materi gelap menjadi $\nu + X$ dengan tingkat kepercayaan 95 %. Garis <i>solid</i> hitam, biru, dan merah adalah kurva untuk <i>channel</i> peluruhan materi gelap menjadi ν_e , ν_μ , dan ν_τ secara berurutan setelah terpropagasi ke Bumi. Hasil akhir massa X pada peluruhan materi gelap diasumsikan sangat ringan dibandingkan dengan massa materi gelap dan X adalah antineutrino yang bersangkutan.	27
3.5	Kurva parsial <i>decay width</i> terhadap massa materi gelap dari $\phi \rightarrow \nu\bar{\nu}Z$ dengan tingkat kepercayaan 95 %. Garis hitam, biru, dan merah adalah kurva untuk <i>channel</i> $\phi \rightarrow \nu_e\bar{\nu}_eZ$, $\phi \rightarrow \nu_\mu\bar{\nu}_\mu Z$, dan $\phi \rightarrow \nu_\tau\bar{\nu}_\tau Z$	27
3.6	Kurva parsial <i>decay width</i> terhadap massa materi gelap dari $\phi \rightarrow \nu Wl$ dengan tingkat kepercayaan 95 %. Garis hitam, biru, dan merah adalah kurva untuk <i>channel</i> $\phi \rightarrow \nu_e W e$, $\phi \rightarrow \nu_\mu W \mu$, dan $\phi \rightarrow \nu_\tau W \tau$	28
3.7	Kurva parsial <i>decay width</i> terhadap massa materi gelap dari $\phi \rightarrow \nu\bar{\nu}$ (garis biru) dan $\phi \rightarrow \nu\bar{\nu}Z$ (garis merah). Data plot ini diambil untuk konstanta <i>coupling</i> $g = 10^{-26}$	28
3.8	Kurva nilai chi squared terhadap massa materi gelap dari $\phi \rightarrow \nu\bar{\nu}Z$ dan $\phi \rightarrow \nu Wl$. Garis biru putus-putus adalah nilai chi squared sebesar 35.17. Garis <i>solid</i> hitam, biru, dan merah adalah kurva untuk <i>channel</i> peluruhan materi gelap menjadi e , μ , dan τ secara berurutan.	29
3.9	Grafik g terhadap massa materi gelap dari $\phi \rightarrow \nu\bar{\nu}$. Garis hitam, biru, dan merah adalah kurva untuk <i>channel</i> peluruhan materi gelap menjadi ν_e , ν_μ , dan ν_τ secara berurutan.	30
3.10	Grafik g terhadap massa materi gelap dari radiasi <i>electroweak</i> boson. Garis hitam, biru, dan merah adalah kurva untuk <i>channel</i> peluruhan materi gelap menjadi e , μ , dan τ secara berurutan.	30
3.11	Kurva konstanta <i>coupling</i> g terhadap massa materi gelap dari radiasi <i>electroweak</i> boson <i>channel</i> e (garis putus-putus) terhadap $\phi \rightarrow \nu_e\bar{\nu}_e$	31
3.12	Kurva konstanta <i>coupling</i> g terhadap massa materi gelap dari radiasi <i>electroweak</i> boson <i>channel</i> μ (garis putus-putus) terhadap $\phi \rightarrow \nu_\mu\bar{\nu}_\mu$	31
3.13	Kurva konstanta <i>coupling</i> g terhadap massa materi gelap dari radiasi <i>electroweak</i> boson dari <i>channel</i> τ (garis putus-putus) terhadap $\phi \rightarrow \nu_\tau\bar{\nu}_\tau$	31
B.1	Diagram Feynman untuk peluruhan parsial materi gelap menjadi neutrino ν , antineutrino $\bar{\nu}$, dan Z boson.	39
C.1	Diagram Feynman untuk peluruhan parsial materi gelap menjadi neutrino/antineutrino, lepton/antilepton, dan W boson.	47

DAFTAR TABEL

2.1	Besar konstanta vektor netral c_V^f dan vektor aksial c_A^f untuk lepton atau quark yang terlibat di interaksi lemah. Tabel diambil dari referensi [5].	14
-----	---	----

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Selama 80 tahun terakhir, sebuah paradigma baru muncul karena ada pengamatan massa dari materi 'yang terlihat' rupanya hanya mewakili sebagian kecil dari jumlah massa materi yang ada di alam semesta. Massa materi yang tidak dapat diamati tersebut tidak memancarkan cahaya, tidak berinteraksi dengan radiasi elektromagnet, dan tidak memancarkan radiasi elektromagnet [6]. Materi tersebut yang disebut dengan materi gelap. Sampai hari ini, sifat dan karakteristik dari materi gelap yang mengisi alam semesta kita masih merupakan misteri besar.

Pada tahun 1933, seorang astronom dari Swiss bernama Fritz Zwicky mengukur pergerakan beberapa galaksi di gugus galaksi Coma dan mengestimasi massa dari gugus galaksi Coma dengan menggunakan teori virial. Dengan data luminositas yang diketahui dari cahaya yang tampak dari galaksi di gugus galaksi Coma, Zwicky menghitung rasio massa terhadap luminositas $\frac{M}{L}$ gugus galaksi Coma dan dibandingkan dengan masing-masing galaksi yang ada pada gugus galaksi Coma. Hasil yang Zwicky temukan adalah rasio massa terhadap luminositas gugus galaksi Coma ternyata 50 kali lebih besar dibandingkan dengan masing-masing galaksi yang ada di dalam gugus galaksi Coma [6]. Hal ini yang mengindikasikan bahwa ada materi yang tidak terlihat di dalam gugus galaksi Coma.

Selain pengamatan Zwicky, masih ada beberapa bukti pendukung keberadaan materi gelap di alam semesta yang antara lain:

1. Pengamatan pada kurva rotasi galaksi spiral.

Sir Isaac Newton merumuskan satu hukum alam fundamental yang disebut dengan hukum umum gravitasi Newton. Isi hukum umum gravitasi Newton adalah "Setiap partikel di alam semesta menarik setiap partikel lain dengan gaya yang besarnya sebanding dengan perkalian dari massa kedua partikel dan berbanding terbalik dengan kuadrat jarak antara kedua partikel tersebut [7]". Hukum umum gravitasi Newton dapat dituliskan dalam bentuk persamaan:

$$\vec{F}_{ij} = G \frac{m_i m_j}{r_{ij}^2} \widehat{r}_{ij} \quad (1.1)$$

dengan G adalah konstanta gravitasi umum sebesar $(6.67259 \pm 0.00085) \times 10^{-11} \text{ Nm}^2\text{kg}^{-2}$ [7], m_i dan m_j adalah massa benda ke- i dan ke- j ($i \neq j$), r_{ij} adalah jarak pisah kedua benda, dan \widehat{r}_{ij} adalah vektor satuan jarak benda i ke benda j . Persamaan (1.1) pada hukum umum gravitasi Newton menegaskan bahwa semakin masif benda m_i dan m_j , maka besar gaya gravitasi \vec{F}_{ij} akan semakin besar. Selain itu, besar gaya gravitasi \vec{F}_{ij} berbanding terbalik dengan kuadrat jarak pisah r_{ij}^2 antar kedua benda yang saling berinteraksi; semakin jauh jarak pisah antara kedua benda, maka akan semakin kecil gaya gravitasi yang dihasilkan.

Terdapat pengamatan oleh para astronom bahwa objek yang bersinar (bintang, awan-awan gas, *globular cluster*, dan seluruh galaksi) bergerak lebih cepat dari yang diharapkan jika objek-objek tersebut hanya merasakan gaya tarik gravitasi dari objek yang terlihat di sekitarnya [8]. Bintang-bintang tersebut bergerak rotasi dengan jarak yang berbeda-beda terhadap pusat

galaksi sehingga kecepatan bintang-bintang tersebut sebagai fungsi dari jarak r . Sebuah kurva kecepatan rotasi sebuah galaksi dapat dibuat berdasarkan data pengamatan kecepatan rotasi bintang-bintang. Jadi kurva rotasi galaksi bisa didefinisikan sebagai kecepatan bintang-bintang mengorbit pusat galaksi sebagai fungsi dari jarak bintang tersebut terhadap pusat galaksi. Pada galaksi spiral terdapat massa yang terkonsentrasi pada bagian pusatnya, misalkan massa tersebut kita anggap sebagai bola dengan jari-jari R . Bintang-bintang yang berputar dengan kecepatan $v(r)$ pada jarak r dari pusat galaksi akan mengikuti persamaan yang berdasarkan hukum umum gravitasi Newton dan gaya sentripetal:

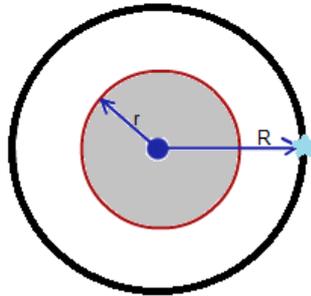
$$\frac{mv^2}{r} = \frac{GmM_{<r}}{r^2} \quad (1.2)$$

Dengan $M_{<r}$ adalah massa bintang yang berada dalam bola dengan jari-jari r tertutup dan m adalah massa bintang yang sedang berputar dengan jarak R terhadap pusat bola seperti pada Gambar 1.1. Apabila bintang-bintang berada di daerah sekitar pusat galaksi ($r < R$), maka $M_{<r} = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho$, dengan ρ adalah kerapatan massa pada pusat galaksi. Oleh sebab itu kecepatan bintang-bintang pada daerah $M_{<r}$ dapat dituliskan dalam bentuk persamaan:

$$v(r) \sim r \quad (1.3)$$

Untuk bintang-bintang yang berada di luar massa tertutup $M_{<r}$ dengan jarak bintang-bintang terhadap pusat galaksi adalah r , maka kecepatannya dapat dituliskan dalam bentuk persamaan:

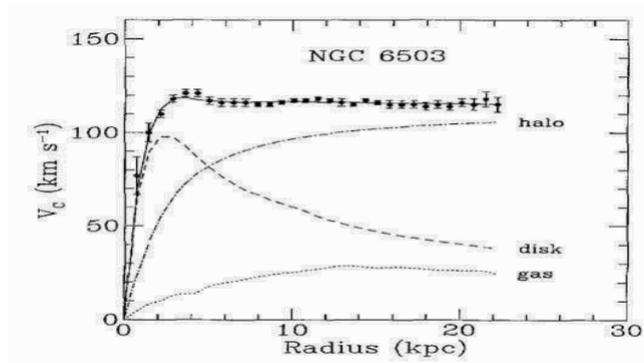
$$v(r) \sim \frac{1}{\sqrt{r}} \quad (1.4)$$



Gambar 1.1: Kecepatan bintang-bintang $v(r)$ akan sebanding dengan r apabila bintang-bintang tersebut berada di sekitar daerah $r < R$. Akan tetapi kecepatan bintang-bintang $v(r)$ akan sebanding dengan $\frac{1}{\sqrt{r}}$ ketika bintang-bintang tersebut berada pada jarak $r > R$ dari pusat galaksi.

Dari persamaan (1.3) dan (1.4) dapat disimpulkan bahwa kecepatan $v(r)$ bintang-bintang sebagai fungsi dari jarak r seharusnya bertambah sampai jarak R dan kecepatannya akan berkurang ketika bintang-bintang berjarak lebih besar dari R .

Gambar 1.2 merupakan kurva rotasi galaksi NGC 6503 hasil pengamatan. Bintang-bintang yang berada pada pusat galaksi NGC 6503 hingga yang berjarak 3 kpc dari pusat galaksi menunjukkan kecepatan yang cenderung meningkat, dan bintang-bintang yang berjarak 4 hingga 20 kpc bergerak dengan kecepatan yang relatif konstan. Hal inilah yang mengindikasikan ada sebuah materi bermassa di antara pusat galaksi dan bintang-bintang yang turut berkontribusi terhadap kecepatan bintang-bintang tersebut. [6].



Gambar 1.2: Kurva kecepatan rotasi bintang-bintang pada galaksi NGC 6503. Pada kurva kecepatan rotasi di atas terdapat 3 buah komponen, yaitu garis putus-putus yang merepresentasikan *disk* galaksi; titik putus-putus yang merepresentasikan gas; juga garis dan titik putus-putus yang merepresentasikan halo materi gelap. *Disk* galaksi tersusun atas komponen gas dan debu-debu [2] dan kontribusi terhadap kecepatan menurun seiring dengan bertambah jauh jarak *disk* terhadap pusat galaksi. Sedangkan pada gas, kecepatannya relatif konstan pada kecepatan 25 km/s. Halo adalah sebuah daerah yang terdiri dari objek-objek yang bersinar dan termasuk materi gelap yang mengelilingi galaksi. Kecepatan bintang-bintang yang dihasilkan pada kurva kecepatan rotasi hampir sama dengan kurva halo pada jarak sekitar 8 sampai 20 kpc. Sumber gambar diambil dari referensi [3].

2. Pengamatan lensa gravitasi.

Selain hasil pengamatan kecepatan rotasi bintang-bintang, bukti keberadaan materi gelap juga teramati dari lensa gravitasi. Lensa gravitasi dapat terjadi ketika cahaya yang merambat lurus dibelokkan saat ada kehadiran massa di sekitarnya. Lensa gravitasi merupakan konsekuensi dari teori relativitas umum Einstein yang menyatakan bahwa kehadiran massa mengakibatkan ruang dan waktu melengkung. Ada tiga kategori lensa gravitasi, yaitu *strong lensing*, *weak lensing*, dan *microlensing* [6]. Pada kasus *strong lensing*, pengamat di Bumi akan melihat citra ganda atau cincin Einstein seperti pada Gambar 1.3.

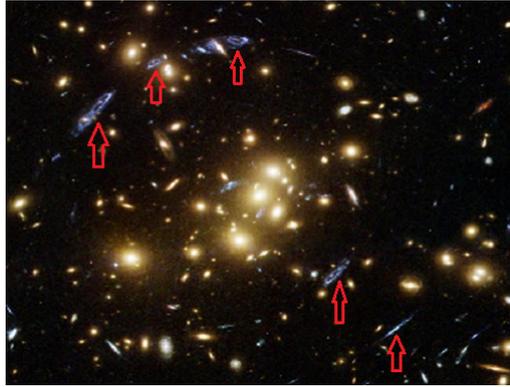


Gambar 1.3: Citra ganda sebagai efek dari *strong lensing* pada galaksi SDSS J1038+4849 yang diambil oleh Teleskop Ruang Angkasa Hubble.

Sumber gambar diambil dari www.nasa.gov/content/hubble-sees-a-smiling-lens yang dikunjungi pada tanggal 26 September 2016.

Sedangkan pada kasus *microlensing*, pengamat akan melihat citra sebuah objek yang tiba-tiba menjadi lebih terang intensitasnya. Dan yang terakhir pada kasus *weak lensing*, pengamat

akan melihat citra objek terdistorsi atau berubah bentuknya seperti pada Gambar 1.4.

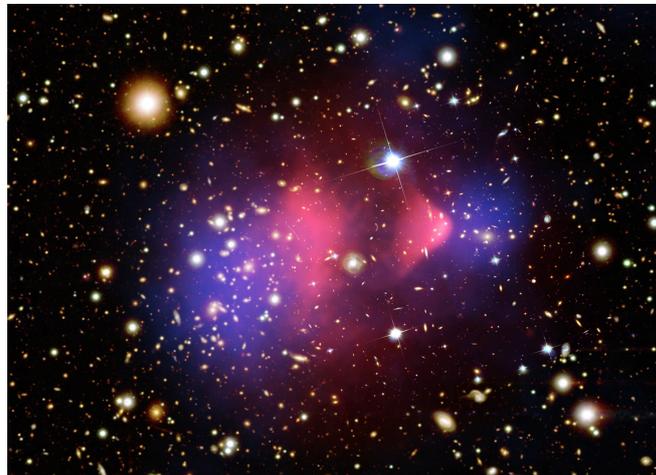


Gambar 1.4: Citra yang terdistorsi akibat *weak lensing* pada galaksi CL0024+17 ditandai dengan tanda panah. Sumber gambar diambil dari <http://inspirehep.net/record/822539/plots> yang dikunjungi pada tanggal 10 Oktober 2016.

Dengan mengobservasi dan mempelajari efek lensa gravitasi, ilmuwan dapat memperkirakan profil kerapatan materi (baryon dan materi gelap) atau distribusi massa pada gugus galaksi [6].

3. Pengamatan pada *bullet cluster*.

Rupanya pengamatan pada *bullet cluster* pun menjadi bukti lain yang mendukung keberadaan materi gelap yang mengisi alam semesta. Hal tersebut diakibatkan oleh adanya efek lensa gravitasi pada *bullet cluster* seperti pada Gambar 1.5. *Bullet cluster* terbentuk dari hasil tumbukan dua gugus galaksi di konstelasi Carina yang berjarak 4 miliar tahun cahaya dari Bumi.



Gambar 1.5: *Bullet cluster*.

Pada awalnya masing-masing gugus galaksi terdiri dari baryon (warna merah muda) yang dikelilingi oleh halo materi gelap (warna biru). Ketika kedua gugus galaksi saling bertumbukan, analisis sinar-X menunjukkan bahwa baryon dari masing-masing galaksi berinteraksi satu dengan yang lainnya sehingga terpusat di luar halo materi gelap, sedangkan halo materi gelap tidak saling berinteraksi dan tidak terganggu (*unperturbed*). Fenomena inilah yang mengindikasikan juga bahwa materi gelap saling bertumbukan dengan sangat lemah. Oleh sebab itu, diduga materi gelap terdiri dari partikel yang tidak bermuatan (netral).

Walaupun keberadaan materi gelap di alam semesta sudah didukung dari beberapa hasil pengamatan di atas, pada akhirnya tidak ada seorang pun yang mengetahui mengenai sifat dan karakteristik materi gelap. Satu hal yang kita ketahui adalah bahwa materi gelap mengisi 26.8 % di alam semesta kita [9]. Oleh sebab itu perlu dipikirkan cara alternatif untuk mengetahui karakteristik materi gelap. Salah satu alternatif yang dapat digunakan adalah dengan mengasumsikan materi gelap dapat meluruh menjadi partikel elementer di model standar. Partikel elementer di model standar pada saat ini ada 61 partikel, yang terdiri dari 12 lepton, 36 quark, 12 mediator, dan partikel Higgs [5]. Pada penulisan tugas akhir ini, penulis mengasumsikan bahwa materi gelap dapat meluruh menjadi neutrino. Peluruhan materi gelap menjadi neutrino dipilih karena neutrino merupakan partikel netral yang mengakibatkan neutrino hanya mengalami interaksi lemah saja dan tidak berinteraksi dengan medan magnet dan medan listrik dari galaksi-galaksi [10]. Neutrino yang berinteraksi lemah dengan materi di sekitarnya membuat pengamatan neutrino menjadi sulit untuk diamati. Oleh sebab itu, penulis membuat alternatif untuk pengamatan neutrino agar lebih mudah untuk diamati. Alternatif yang dilakukan adalah dengan melihat peluruhan materi gelap menjadi neutrino, antineutrino, dan Z boson dan peluruhan materi gelap menjadi neutrino/antineutrino, lepton/antilepton, dan W boson. Z boson dapat meluruh menjadi fermion dengan antipartikelnya dan quark dengan antiquark setelah hadronisasi. Sedangkan W boson dapat meluruh menjadi lepton dengan pasangan neutrinonya dan quark setelah hadronisasi.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas, muncul lima permasalahan yaitu:

1. Berapa parsial *decay width* peluruhan parsial materi gelap menjadi neutrino?
2. Berapa parsial *decay width* peluruhan parsial materi gelap menjadi neutrino, antineutrino, dan Z boson?
3. Berapa parsial *decay width* peluruhan parsial materi gelap menjadi neutrino/antineutrino, lepton/antilepton, dan W boson?
4. Manakah proses peluruhan parsial materi gelap yang lebih baik untuk konstanta *coupling* g yang sama antara peluruhan parsial materi gelap menjadi neutrino atau peluruhan parsial materi gelap menjadi neutrino, antineutrino, dan Z boson dan peluruhan parsial materi gelap menjadi neutrino/antineutrino, lepton/antilepton, dan W boson?
5. Adakah batasan baru yang dihasilkan dari peluruhan parsial materi gelap menjadi neutrino, antineutrino, dan Z boson dan peluruhan parsial materi gelap menjadi neutrino/antineutrino, lepton/antilepton, dan W boson?

1.3 Tujuan Penulisan

Penulisan tugas akhir ini bertujuan untuk:

1. Menghitung parsial *decay width* peluruhan parsial materi gelap menjadi neutrino.
2. Menghitung parsial *decay width* peluruhan parsial materi gelap menjadi neutrino, antineutrino, dan Z boson.
3. Menghitung parsial *decay width* peluruhan parsial materi gelap menjadi neutrino/antineutrino, lepton/antilepton, dan W boson.
4. Mengetahui proses peluruhan parsial materi gelap yang lebih baik untuk konstanta *coupling* g yang sama antara peluruhan parsial materi gelap menjadi neutrino atau peluruhan parsial

materi gelap menjadi neutrino, antineutrino, dan Z boson dan peluruhan parsial materi gelap menjadi neutrino/antineutrino, lepton/antilepton, dan W boson.

5. Mencari batasan baru yang dihasilkan dari peluruhan parsial materi gelap menjadi neutrino, antineutrino, dan Z boson dan peluruhan parsial materi gelap menjadi neutrino/antineutrino, lepton/antilepton, dan W boson?

1.4 Batasan Masalah Penulisan

Penulisan ini dibatasi permasalahannya oleh beberapa hal di bawah ini:

1. Tumbukan materi gelap dengan materi lain sangat lemah;
2. Materi gelap terdiri dari partikel netral;
3. Materi gelap diasumsikan dapat meluruh menjadi neutrino;
4. Neutrino tidak bermassa (*massless*);
5. Massa maksimum materi gelap yang digunakan adalah 200 TeV;
6. Peluruhan Z boson dan W boson yang digunakan hanya antiproton setelah hadronisasi.

1.5 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan untuk tugas akhir ini terdiri dari 4 bab. Bab 1 adalah pendahuluan yang isinya terdiri dari latar belakang masalah, rumusan masalah, tujuan penulisan, batasan masalah penulisan, dan sistematika penulisan. Bab 2 adalah landasan teori yang isinya terdiri dari Lagrangian *density* materi gelap yang dapat meluruh menjadi pasangan neutrino ν dan antineutrino $\bar{\nu}$, cara mendeteksi materi gelap, model standar, interaksi lemah, cara menghitung *decay rate* dan *lifetime*, dan fluks antiproton yang diproduksi di halo galaksi Bimasakti dan propagasinya ke Bumi. Bab 3 adalah hasil dan pembahasan yang isinya adalah pemaparan hasil perhitungan parsial *decay width* peluruhan parsial materi gelap menjadi neutrino; hasil perhitungan parsial *decay width* peluruhan parsial materi gelap menjadi neutrino, antineutrino, dan Z boson; perhitungan parsial *decay width* peluruhan parsial materi gelap menjadi neutrino/antineutrino, lepton/antilepton, dan W boson; dan perbandingan batasan antara $\phi \rightarrow \nu\bar{\nu}$ atau $\phi \rightarrow \nu\bar{\nu}Z$ dan $\phi \rightarrow \nu Wl$. Dan bab 4 adalah penutup yang isinya adalah simpulan yang ditarik dari hasil dan pembahasan pada bab 3, disertai juga dengan saran-saran yang diberikan untuk penulisan tugas akhir ini.