

EVOLUSI WAKTU LUBANG CACING REISSNER- NORDSTRÖM DAN PENYISIPANNYA DALAM $\mathbb{R}^3$

SKRIPSI

Untuk memenuhi sebagian persyaratan
mencapai derajat sarjana S-1

Program studi fisika



Diajukan oleh:
Wahyu Norrudin
14620039

**PROGRAM STUDI FISIKA
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA
2017**



KEMENTERIAN AGAMA
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI SUNAN KALIJAGA
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
Jl. Marsda Adisucipto Telp. (0274) 540971 Fax. (0274) 519739 Yogyakarta 55281

PENGESAHAN TUGAS AKHIR

Nomor : B-877/Un.02/DST/PP.00.9/02/2018

Tugas Akhir dengan judul : Evolusi Waktu Lubang Cacing Reissner-Nordstrom dan Penyisipannya dalam R^3
yang dipersiapkan dan disusun oleh:

Nama : WAHYU NORRUDIN
Nomor Induk Mahasiswa : 14620039
Telah diujikan pada : Kamis, 15 Februari 2018
Nilai ujian Tugas Akhir : A

dinyatakan telah diterima oleh Fakultas Sains dan Teknologi UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta

TIM UJIAN TUGAS AKHIR

Ketua Sidang

Asih Melati, S.Si., M.Sc
NIP. 19841110 201101 2 017

Penguji I

Norma Sidik Risdianto, S.Pd., M.Sc
NIP. 19870630 201503 1 003

Penguji II

Cecilia Yanuarief, M.Si.
NIP. 19840127 201503 1 001

STATE ISLAMIC UNIVERSITY
SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA

Yogyakarta, 15 Februari 2018

RIAAHUN Sunan Kalijaga
Fakultas Sains dan Teknologi
DEKATAN



De. Kurnono, M.Si.
NIP. 19591212 200003 1 001



SURAT PERSETUJUAN SKRIPSI

Hal : Surat Persetujuan Skripsi

Lamp : -

Kepada

Yth. Dekan Fakultas Sains dan Teknologi
UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta
di Yogyakarta

Assalamu'alaikum wr. wb.

Setelah membaca, meneliti, memberikan petunjuk dan mengoreksi serta mengadakan perbaikan seperlunya, maka kami selaku pembimbing berpendapat bahwa skripsi Saudara:

Nama : Wahyu Norrudin
NIM : 14620039

Judul Skripsi : Evolusi Waktu Lubang Cacing Reissner-Nordström dan
Penyisipannya dalam R^3

Sudah dapat diajukan kembali kepada Program Studi Fisika Fakultas Sains dan Teknologi UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Strata Satu dalam Jurusan Fisika

Dengan ini kami mengharap agar skripsi Saudara tersebut di atas dapat segera dimunaqsyahkan. Atas perhatiannya kami ucapkan terima kasih.

Wassalamu'alaikum wr. wb.

Yogyakarta, 1 Februari 2018
Pembimbing I


Asih Melati, S.Si., M.Sc
NIP. 19841110 201101 2 017



SURAT PERSETUJUAN SKRIPSI

Hal : Surat Persetujuan Skripsi

Lamp : -

Kepada

Yth. Dekan Fakultas Sains dan Teknologi

UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta

di Yogyakarta

Assalamu'alaikum wr. wb.

Setelah membaca, meneliti, memberikan petunjuk dan mengoreksi serta mengadakan perbaikan seperlunya, maka kami selaku pembimbing berpendapat bahwa skripsi Saudara:

Nama : Wahyu Norrudin

NIM : 14620039

Judul Skripsi : Evolusi Waktu Lubang Cacing Reissner-Nordström dan
Penyisipannya dalam R^3

Sudah dapat diajukan kembali kepada Program Studi Fisika Fakultas Sains dan Teknologi UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Strata Satu dalam Jurusan Fisika

Dengan ini kami mengharap agar skripsi Saudara tersebut di atas dapat segera dimunaqsyahkan. Atas perhatiannya kami ucapkan terima kasih.

Wassalamu'alaikum wr. wb.

Yogyakarta, 26 Januari 2018

Pembimbing II

Norma Sidik Risdianto, S.Pd., M.Sc

NIP. 19870630 201503 1 003

SURAT PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

Yang bertanda tangan dibawah ini :

Nama : Wahyu Norrudin
NIM : 14620039
Program Studi : Fisika
Fakultas : Sains dan Teknologi

Dengan ini saya menyatakan bahwa skripsi yang berjudul "Evolusi Waktu Lubang Cacing Reissner-Nordström dan Penyisipannya dalam R^3 " merupakan hasil penelitian saya sendiri, tidak terdapat karya yang pernah diajukan untuk memperoleh gelar kesarjanaan di suatu Perguruan Tinggi, dan sepanjang pengetahuan saya juga tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis diacu dalam naskah ini dan disebutkan dalam daftar pustaka.

Yogyakarta, 5 Februari 2018
Yang menyatakan



Wahyu Norrudin
NIM : 14620039

STATE ISLAMIC UNIVERSITY
SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA

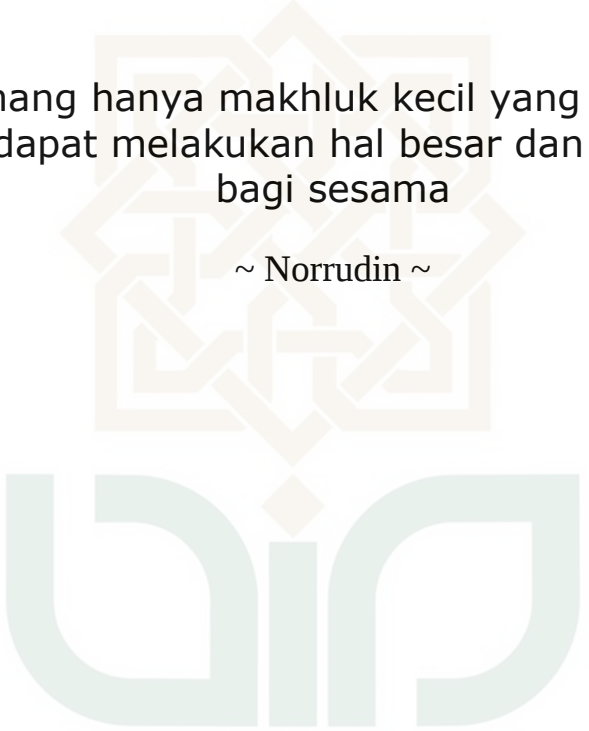
MOTTO

***However difficult life may seem, there is always something
you can do and succeed at***

~ Stephen Hawking ~

Kita memang hanya makhluk kecil yang tidak berarti,
tapi kita dapat melakukan hal besar dan memberi arti
bagi sesama

~ Norrudin ~



STATE ISLAMIC UNIVERSITY
SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA

HALAMAN PERSEMBAHAN

To all the curious minds



STATE ISLAMIC UNIVERSITY
SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA

KATA PENGANTAR

Alhamdulillahirobbil 'alamin, segala puji syukur kami panjatkan ke hadirat Allah SWT, yang telah melimpahkan *rahmat*, *nikmat*, *hidayah*, serta *inayah*-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi dengan judul **“Evolusi Waktu Lubang Cacing Reissner-Nordström dan Penyisipannya dalam $\mathbb{R}^3$ ”** dengan baik dan lancar. Tidak lupa *shalawat* serta salam semoga senantiasa tercurah kepada Rasulullah Muhammad SAW, semoga kita mendapatkan *syafaat* beliau di *yaumul akhir* kelak. *Amiin*.

Penyusunan skripsi ini merupakan suatu bentuk komitmen dari penulis sebagai mahasiswa program studi fisika UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta untuk memenuhi salah satu persyaratan kelulusan serta mendapatkan gelar sarjana. Dalam penulisan serta pelaksanaan tugas akhir ini penulis telah mendapat banyak bantuan dari berbagai pihak. Oleh karena itu sepatutnya penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Prof. Drs. Yudian Wahyudi, M.A., Ph.D., selaku rektor UIN Sunan Kalijaga
2. Dr. Murtono, M.Si., selaku dekan Fakultas Sains dan Teknologi UIN Sunan Kalijaga
3. Dr. Thaqibul Fikri Niyartama, M.Si., selaku ketua Program Studi Fisika UIN Sunan Kalijaga
4. Seluruh dosen Fisika UIN Sunan Kalijaga, yang telah memberikan bimbingan serta ilmunya

5. Ibu Asih Melati, M.Sc., selaku dosen pembimbing akademik sekaligus pembimbing I Tugas Akhir yang telah memberikan bimbingan, saran, motivasi, serta masukan hingga terselesaikannya skripsi ini
6. Bapak Norma Sidik Risdianto, M.Sc., selaku dosen pembimbing II yang telah memberikan waktu, tenaga, dan pikirannya sehingga skripsi ini dapat terselesaikan
7. Kedua orang tua penulis beserta keluarga di rumah yang selalu memberikan semangat, motivasi, dan doa-doanya kepada penulis sehingga skripsi ini dapat terselesaikan tepat pada waktunya
8. Teman-teman fisika 2014 yang selalu memberikan motivasi, semangat, dan harapan kepada penulis
9. Mas Agung Laksana, S.Si yang telah meminjamkan buku teks kepada penulis
10. Semua pihak yang telah memberikan bantuan dan dukungan dalam penyusunan skripsi ini

Selain ucapan terima kasih, penulis juga memohon maaf apabila dalam penulisan ini masih terdapat banyak kekurangan dan kesalahan baik dari sistematika penyusunan, isi, hingga proses yang telah dilaporkan ini. Semoga skripsi ini dapat memberikan manfaat, baik bagi penulis pribadi maupun bagi para pembaca.

Penulis

EVOLUSI WAKTU LUBANG CACING REISSNER-NORDSTRÖM DAN PENYISIPANNYA DALAM $\mathbb{R}^3$

Wahyu Norrudin
14620039

INTISARI

Penelitian ini mencoba menggunakan muatan listrik untuk membangun lubang cacing yang berbeda dari lubang cacing Schwarzschild, disebut lubang cacing Reissner-Nordström. Pengaruh muatan listrik terhadap lubang cacing dapat diketahui dengan cara melakukan penyisipan ke dalam $\mathbb{R}^3$ kemudian menganalisa bagaimana lubang cacing ini berevolusi terhadap waktu. Jenis penelitian ini adalah teoritis komputasi. Perhitungan teoritis dilakukan dengan cara melakukan transformasi koordinat untuk menghilangkan singularitas koordinat pada metrik Reissner-Nordström kemudian menyisipkannya ke dalam $\mathbb{R}^3$. Proses komputasi dilakukan menggunakan *software* MATLAB R2009a yang meliputi pencarian solusi persamaan secara numerik serta pembuatan simulasi menggunakan fasilitas GUI. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa muatan listrik, baik muatan positif maupun negatif, membuat lubang cacing lebih stabil. Akan tetapi keberadaan muatan listrik juga memperkecil jari-jari lubang cacing.

Kata Kunci : Lubang cacing, Reissner-Nordström, muatan listrik

STATE ISLAMIC UNIVERSITY
SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA

EMBEDDINGS AND TIME EVOLUTION OF THE REISSNER-NORDSTRÖM WORMHOLE

Wahyu Norrudin
14620039

ABSTRACT

This study attempted to use electric charges to build a wormhole that was different from the Schwarzschild wormhole, called the Reissner-Nordström wormhole. The effect of electric charges on the wormhole can be known by embedding in $\mathbb{R}^3$ and analyzing how this wormhole evolves over time. This research is computation-theoretical research. The theoretical calculations are performed by presenting coordinate transformations to remove coordinate singularities in the Reissner-Nordström metric and embed it in $\mathbb{R}^3$. The computation is done using MATLAB R2009a software which includes finding numerical solution of the equations and make a simulation using GUI facility. The results of this study show that electric charges, either positive and negative charges, make the wormhole more stable. But the presence of electric charges also makes the radius of the wormhole smaller.

Keywords : Wormhole, Reissner-Nordström, electric charge

STATE ISLAMIC UNIVERSITY
SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PENGESAHAN.....	Error! Bookmark not defined.
SURAT PERSETUJUAN SKRIPSI 1	Error! Bookmark not defined.
SURAT PERSETUJUAN SKRIPSI 2	Error! Bookmark not defined.
SURAT PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI.....	Error! Bookmark not defined.
MOTTO	ii
HALAMAN PERSEMBAHAN	vii
KATA PENGANTAR	viii
INTISARI.....	x
ABSTRACT.....	xi
DAFTAR ISI.....	xii
DAFTAR SIMBOL.....	xiv
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR LAMPIRAN.....	xvi
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1. Latar Belakang Masalah	1
1.2. Rumusan Masalah.....	3
1.3. Tujuan	4
1.4. Batasan Penelitian.....	4
1.5. Manfaat Penelitian	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	Error! Bookmark not defined.
2.1. Studi Pustaka.....	Error! Bookmark not defined.
2.2. Landasan Teori.....	Error! Bookmark not defined.
2.2.1. Teori Relativitas.....	Error! Bookmark not defined.
2.2.2. Solusi Schwarzschild	Error! Bookmark not defined.
2.2.3. Solusi Reissner-Nordström	Error! Bookmark not defined.
2.2.4. Fisika Komputasi dan <i>Software</i> MATLAB.....	Error! Bookmark not defined.
BAB III METODE PENELITIAN.....	Error! Bookmark not defined.
3.1. Waktu dan Tempat Penelitian.....	Error! Bookmark not defined.
3.2. Alat dan Bahan.....	Error! Bookmark not defined.
3.3. Prosedur Kerja	Error! Bookmark not defined.

3.3.1.	Pengumpulan informasi dan studi pustaka	Error! Bookmark not defined.
3.3.2.	Menurunkan persamaan penyisipan lubang cacing Reissner-Nordström dalam $\mathbb{R}^3$	Error! Bookmark not defined.
3.3.3.	Membuat grafik penyisipan dan evolusi waktu lubang cacing Schwarzschild dan Reissner-Nordström	Error! Bookmark not defined.
3.3.4.	Analisa Hasil	Error! Bookmark not defined.
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN		Error! Bookmark not defined.
4.1.	Persamaan Penyisipan Lubang Cacing Reissner-Nordström dalam $\mathbb{R}^3$	Error! Bookmark not defined.
4.2.	Grafik Penyisipan Lubang Cacing Schwarzschild dan Reissner-Nordström	Error! Bookmark not defined.
4.3.	Evolusi Waktu Lubang Cacing Schwarzschild dan Reissner-Nordström	Error! Bookmark not defined.
4.4.	Integrasi-Interkoneksi	Error! Bookmark not defined.
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN		35
5.1.	Kesimpulan	35
5.2.	Saran	36
DAFTAR PUSTAKA		37
LAMPIRAN A		39
LAMPIRAN B		42
LAMPIRAN C		44
LAMPIRAN D		51
DAFTAR RIWAYAT HIDUP		53

DAFTAR SIMBOL

G	: konstanta gravitasi universal ($6,6726 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$)
$\mu, \nu, \alpha, \dots$	: indeks 0,1,2,3
$g_{\mu\nu}$	: tensor metrik
Q	: muatan listrik (C)
ε_0	: permisivitas ruang hampa ($8,85 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{Nm}^2$)
r_+ dan r_-	: Letak singularitas koordinat metrik Reissner-Nordström (m)
q	: suku muatan metrik Reissner-Nordström (m)
m	: suku massa metrik Reissner-Nordström dan Schwarzschild (m)
$\exp$	: eksponensial

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Diagram ruang-waktu metrik Schwarzschild.....	12
Gambar 2.2 Geometri Schwarzschild pada sistem koordinat Kruskal.....	15
Gambar 3.1 Prosedur kerja.....	22
Gambar 3.2 Tampilan antarmuka simulator.....	23
Gambar 3.3 Algoritma program.....	24
Gambar 4.1. Grafik penyisipan lubang cacing Schwarzschild	29
Gambar 4.2. Grafik penyisipan lubang cacing Reissner-Nordström	30
Gambar 4.3. Grafik hubungan antara muatan dan jari-jari lubang cacing Reissner-Nordström untuk $v = 0$	31
Gambar 4.4. Grafik evolusi waktu jari-jari lubang cacing Schwarzschild dan Reissner-Nordstrom	32

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran A : Pelenyapan singularitas koordinat pada metrik Reissner-Nordström	39
Lampiran B : Penurunan persamaan penyisipan lubang cacing Reissner-Nordström dalam $\mathbb{R}^3$	42
Lampiran C : Kode program MATLAB	44
Lampiran D : Tampilan simulator.....	52



BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang Masalah

Alam semesta merupakan tempat yang sangat luas. Umat manusia terus mencoba untuk mengeksplorasinya baik secara langsung maupun dalam ranah teoritis. Salah satu usaha dalam ranah teoritis yaitu studi tentang lubang cacing. Lubang cacing tampaknya memberikan harapan bagi umat manusia untuk dapat menembus penjuru langit. Namun Allah SWT berfirman dalam QS. Ar-Rahman ayat 33:

يَمْعَشَرِ الْجِنَّ وَالْإِنْسِ إِنَّ اسْتَطَعْتُمْ أَنْ تَنْفُذُوا مِنْ أَقْطَارِ السَّمَوَاتِ وَالْأَرْضِ
فَأَنْفُذُوا لَا تَنْفُذُونَ إِلَّا بِسُلْطَانٍ ﴿٣٣﴾

Artinya: *“Hai jama'ah jin dan manusia, jika kamu sanggup menembus (melintasi) penjuru langit dan bumi, maka lintasilah, kamu tidak dapat menembusnya kecuali dengan kekuatan”* (Tim Penerjemah, 2004).

Tafsir Al-Maraghi dan tafsir Quraish Shihab menyebutkan bahwa perintah ini mengandung makna yang menunjukkan ketidakmampuan jin dan manusia untuk menembus penjuru atau kawasan-kawasan langit melainkan dengan kekuatan. Sedangkan mereka tidak akan mempunyai kekuatan untuk itu. Penjuru langit tidak akan bisa ditembus.

Lubang cacing saat ini masih menjadi objek matematis yang didapat dari teori relativitas umum. Belum ada hasil observasi yang menunjukkan keberadaan objek ini (Anugraha, 2011). Teori relativitas umum menyatakan bahwa gravitasi

bukan merupakan gaya melainkan manifestasi dari kelengkungan ruang-waktu yang disebabkan oleh kehadiran materi (Anugraha, 2011). Hubungan antara distribusi materi dengan kelengkungan ruang-waktu dimuat dalam persamaan medan Einstein. Solusi pertama bagi persamaan medan Einstein ditemukan oleh Karl Schwarzschild pada tahun 1916. Solusi Schwarzschild merepresentasikan geometri ruang-waktu di luar objek bermassa bersimetri bola, tak berotasi, dan tak bermuatan listrik (Walecka, 2007). Akan tetapi ada dua tempat dimana metrik Schwarzschild menjadi cacat. Kecacatan ini dikenal dengan istilah singularitas.

Ada dua macam singularitas yaitu singularitas intrinsik dan singularitas koordinat. Singularitas intrinsik merupakan singularitas yang tidak dapat dihilangkan sedangkan singularitas koordinat merupakan singularitas yang muncul hanya karena pemakaian sistem koordinat yang kurang sesuai. Ketika solusi Schwarzschild dinyatakan dalam sistem koordinat Kruskal, singularitas koordinat lenyap dan tampak bahwa geometri Schwarzschild mengandung satu lubang hitam, satu lubang putih, dan dua alam semesta yang terhubung oleh lubang cacing (Hobson dkk, 2006). Lubang cacing yang didapatkan melalui perhitungan solusi Schwarzschild dikenal dengan nama lubang cacing Schwarzschild. Lubang cacing Schwarzschild ternyata tidak stabil sehingga tidak ada objek yang dapat melewatinya karena lubang cacing ini membuka dan menutup dengan cepat (Fuller dan Wheeler, 1962).

Solusi Schwarzschild merupakan solusi yang kurang umum karena solusi ini mengabaikan muatan listrik dan rotasi. Lubang cacing yang dihasilkan dari metrik ini tentunya juga kurang bersifat umum. Solusi Persamaan Medan Einstein yang

lebih umum dari solusi Schwarzschild telah diperoleh pada tahun yang sama oleh Hans Reissner dan Gunnar Nordström dua tahun kemudian (Wald, 1984). Solusi yang mereka hasilkan dikenal sebagai metrik Reissner-Nordström. Berbeda dengan metrik Schwarzschild yang tidak mengandung muatan listrik, metrik Reissner-Nordström merupakan solusi bagi objek bermassa bersimetri bola, tak berotasi, dan bermuatan listrik (Groen dan Hervik, 2007).

Kebanyakan penelitian tentang lubang cacing tidak menjabarkan secara detail proses penyisipan dalam $\mathbb{R}^3$ dan evolusi waktu dari lubang cacing tersebut (Collas dan Klein, 2011). Oleh karena itu, penelitian tentang penyisipan dalam $\mathbb{R}^3$ dan evolusi waktu lubang cacing Reissner-Nordström perlu dilakukan agar didapatkan hasil yang lebih umum tentang lubang cacing sekaligus mengetahui perbedaannya dengan lubang cacing Schwarzschild.

1.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian latar belakang, maka rumusan masalah penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana persamaan penyisipan lubang cacing Reissner-Nordström dalam $\mathbb{R}^3$?
2. Bagaimana perbedaan grafik penyisipan lubang cacing Reissner-Nordström dan lubang cacing Schwarzschild?
3. Bagaimana perbedaan evolusi waktu lubang cacing Reissner-Nordström dengan lubang cacing Schwarzschild?

1.3. Tujuan

Tujuan penelitian ini dimaksudkan untuk:

1. Menurunkan persamaan penyisipan lubang cacing Reissner-Nordström dalam $\mathbb{R}^3$
2. Membandingkan grafik penyisipan lubang cacing Reissner-Nordström dengan lubang cacing Schwarzschild
3. Membandingkan evolusi waktu lubang cacing Reissner-Nordström dengan lubang cacing Schwarzschild

1.4. Batasan Penelitian

Penelitian ini dibatasi pada hal-hal berikut:

1. Penelitian ini hanya meninjau kasus ketika kuadrat suku massa pada metrik Reissner-Nordström lebih besar daripada kuadrat suku muatannya $m^2 > q^2$.
2. Perhitungan dilakukan dengan massa tetap.
3. Evolusi lubang cacing hanya ditinjau untuk rentang waktu $-1 < v < 1$.
4. Lubang cacing Reissner-Nordström dibandingkan dengan lubang cacing Schwarzschild hanya pada daerah $r > r_-$.

1.5. Manfaat Penelitian

Persamaan penyisipan lubang cacing Reissner-Nordström dalam $\mathbb{R}^3$ dapat memudahkan penelitian selanjutnya yang hendak membandingkan lubang cacing ini dengan lubang cacing yang lain. Selain itu, perbedaan grafik dan evolusi waktu kedua lubang cacing dalam penelitian ini memberi petunjuk tentang pengaruh muatan listrik terhadap struktur dan kestabilan lubang cacing.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian serta pembahasan pada bab sebelumnya, maka dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Persamaan penyisipan lubang cacing Reissner-Nordström dalam $\mathbb{R}^3$ adalah sebagai berikut

$$z(r) = \int_{r(0)}^{r(u)} \left[\frac{r_-^w K^2 (r-r_-)^{1-w} \exp\left(\frac{r}{K}\right) \left((r-r_+) \left(\frac{1}{K} - \frac{W}{r-r_-} \right) + 1 \right)^2}{r_+ r^2 \left(\frac{r_-^w}{r_+} \exp\left(\frac{r}{K}\right) (r-r_-)^{-w} (r-r_+) + v^2 \right)} - 1 \right]^{\frac{1}{2}} dr$$

2. Perbedaan grafik penyisipan lubang cacing Reissner-Nordström dengan lubang cacing Schwarzschild terletak pada jari-jarinya. Semakin besar muatan listrik positif maupun negatif pada metrik Reissner-Nordström, jari-jari lubang cacing yang diperoleh semakin kecil.
3. Lubang cacing Reissner-Nordström dan lubang cacing Schwarzschild sama-sama mengalami pengembangan dan penyusutan. Perbedaannya, lubang cacing Reissner-Nordström mengembang dan menyusut dengan kecepatan yang lebih rendah daripada lubang cacing Schwarzschild. Semakin besar muatan listrik pada metrik Reissner-Nordström, semakin lambat lubang cacing Reissner-Nordström mengembang dan menyusut.

5.2. Saran

Lubang cacing merupakan salah satu solusi dari persamaan medan Einstein yang belum sepenuhnya dimengerti. Penelitian ini bukan merupakan penelitian yang membahas segala hal yang berkaitan dengan lubang cacing. Banyak aspek lubang cacing yang masih perlu dikaji lebih lanjut. Oleh karena itu, penelitian berikutnya disarankan untuk memperhatikan hal-hal berikut:

1. Untuk lebih mengerti perbedaan dinamika lubang cacing Reissner-Nordström dan lubang cacing Schwarzschild, evolusi waktu lubang cacing perlu ditinjau dalam rentang waktu yang lebih lama. Hal ini dikarenakan ruang-waktu metrik Reissner-Nordström mempunyai struktur yang berbeda dari ruang-waktu metrik Schwarzschild.
2. Penelitian ini murni bersifat klasik, dalam artian hanya menggunakan teori relativitas umum saja. Teori relativitas umum bukanlah teori segalanya. Di samping teori ini masih ada teori kuantum. Oleh karena itu, analisis menggunakan kedua teori tersebut perlu dilakukan agar diperoleh gambaran yang lebih lengkap mengenai lubang cacing.

DAFTAR PUSTAKA

- Al-Maraghi, A. M. (1989). *Terjemah Tafsir Al-Maraghi Juz 27*. Semarang: CV Toha Putra.
- Anugraha, R. (2011). *Teori Relativitas dan Kosmologi*. Yogyakarta: UGM.
- Boas, M. L. (1983). *Mathematical Method in the Physical Sciences*. USA: John Willey & Sons.
- Carroll, S. (2004). *Spacetime and Geometry, An Introduction to General Relativity*. Chicago: Addison Wesley.
- Collas, P., & Klein, D. (2011). Embeddings and time evolution of the Schwarzschild wormhole. *arXiv:1107.4871v2*.
- DeVries, P. L. (1994). *A First Course in Computational Physics*. New York: John Willey & Sons, Inc.
- Driscoll, T. A. (2009). *Learning MATLAB*. Delaware: SIAM.
- Fuller, R. W., & Wheeler, J. A. (1962). Causality and Multiply-Connected Space-Time. *Physical Review*, 919.
- Graves, J. C., & Brill, D. R. (1960). Oscillatory Character of Reissner-Nordström Metric for an Ideal Charged Wormhole. *Physical Review*, Volume 120.
- Groen, O., & Hervik, S. (2007). *Einstein's General Theory of Relativity*. London: Springer-Verlag.
- Hawking, S. W., & Ellis, G. F. (1975). *The Large Scale Structure of Space-Time*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Hobson, M. P., Efstathiou, G., & Lasenby, A. N. (2006). *General Relativity, An Introduction for Physicist*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Houcque, D. (2005). *Introduction to MATLAB for Engineering Students*. Illinois: Northwestern University.
- Klein, A., & Godunov, A. (2010). *Introductory Computational Physics*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Koonin, S. E., & Meredith, D. C. (1990). *Computational Physics*. Greenwich: Addison-Wesley Pub.Co.Inc.
- Krane, K. (2012). *Modern Physics Third Edition*. Oregon: John Willey & Sons.

- Lawrie, I. D. (2002). *A Unified Grand Tour of Theoretical Physics*. London: Institute of Physics Publishing.
- Longair, M. S. (2003). *Theoretical Concepts in Physics*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Mehra, J. (1974). *Einstein, Hilbert and the Theory of Gravitation*. Dordrecht: D. Reidel.
- Misner, C. W., Thorne, K. S., & Wheeler, J. A. (1973). *Gravitation*. San Francisco: W.H. Freeman.
- Morris, M. S., & Thorne, K. S. (1988). Wormhole in spacetime and their use for interstellar travel: A tool for teaching general relativity. *American Journal of Physics*, Volume 56.
- Penerjemah, T. (2004). *Al-Qur'an dan Terjemahannya*. Jakarta: Departemen Agama RI.
- Plebanski, J., & Krasinski, A. (2006). *An Introduction to General Relativity and Cosmology*. Cambridge: Cambridge U. Press.
- Poisson, E., & Will, C. M. (2014). *Gravity: Newtonian, Post-Newtonian, Relativistic*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Schwarzschild, K. (1916). Über das Gravitationsfeld eines Massenpunktes nach der Einsteinschen Theorie. *Sitzungsberichte der königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin, Phys.- Math. Klasse*, 189-196.
- Shihab, Q. M. (2002). *Tafsir Al-Mishbah Volume 13*. Jakarta: Lentera Hati.
- Tipler, P. A. (2001). *Fisika untuk Sains dan Teknik Edisi Ketiga Jilid 2*. Jakarta: Erlangga.
- Wald, R. M. (1984). *General Relativity*. Chicago: University of Chicago Press.
- Walecka, J. D. (2007). *Introduction to General Relativity*. Singapore: World Scientific Publishing.
- Woodhouse, N. (2007). *General Relativity*. London: Springer-Verlag.

LAMPIRAN-LAMPIRAN

LAMPIRAN A

Pelenyapan Singularitas Koordinat Pada Metrik Reissner-Nordström

Dalam sistem koordinat bola, metrik Reissner-Nordström memiliki bentuk

$$ds^2 = \Delta c^2 dt^2 - \frac{1}{\Delta} dr^2 - r^2 d\Omega^2 \quad (\text{A.1})$$

dengan $\Delta \equiv 1 - 2m/r + q^2/r^2 = (1 - r_-/r)(1 - r_+/r)$ dan $d\Omega^2 \equiv (d\theta^2 + \sin^2 \theta d\phi^2)$.

Singularitas koordinat terjadi di $r = r_-$ dan $r = r_+$ dengan $r_- \equiv m - \sqrt{m^2 - q^2}$ dan

$r_+ \equiv m + \sqrt{m^2 - q^2}$. Singularitas ini dapat dihilangkan dengan cara melakukan

transformasi koordinat $(r, t) \rightarrow (p, q)$. Dengan menggunakan $dp = cdt + dr/\Delta$,

persamaan (A.1) menjadi

$$ds^2 = -\Delta dp^2 + 2\Delta cdpdt - r^2 d\Omega^2 \quad (\text{A.2})$$

dan dengan menggunakan $dq = cdt - dr/\Delta$, persamaan (A.1) menjadi

$$ds^2 = -\Delta dq^2 + 2\Delta cdqdt - r^2 d\Omega^2 \quad (\text{A.3})$$

Persamaan (A.2) dan (A.3) digabungkan sehingga diperoleh

$$\begin{aligned} ds^2 &= \frac{1}{2} \left(-\Delta (dp^2 + dq^2) + 2\Delta cdt (dp + dq) - 2r^2 d\Omega^2 \right) \\ &= -\frac{\Delta}{2} (dp^2 + dq^2) + \Delta cdt (dp + dq) - r^2 d\Omega^2 \end{aligned}$$

Karena $cdt = (dp + dq)/2$ maka

$$ds^2 = -\frac{\Delta}{2} (dp^2 + dq^2) + \frac{\Delta}{2} (dp + dq)^2 - r^2 d\Omega^2$$

$$ds^2 = \Delta dpdq - r^2 d\Omega^2 \quad (\text{A.4})$$

Metrik di atas kembali bermasalah sehingga perlu dilakukan kembali transformasi koordinat sebagai berikut

$$\tilde{p} = \exp\left(\frac{p}{2K}\right) \quad (\text{A.5})$$

$$\tilde{q} = -\exp\left(-\frac{q}{2K}\right) \quad (\text{A.6})$$

$$K \equiv \frac{r_+^2}{r_+ - r_-}$$

Ubah metrik (A.4) ke dalam bentuk berikut.

$$ds^2 = \Delta \frac{dp}{d\tilde{p}} \frac{dq}{d\tilde{q}} d\tilde{p} d\tilde{q} - r^2 d\Omega^2 \quad (\text{A.7})$$

Dari persamaan (A.5) dan (A.6) diperoleh

$$\begin{aligned} \frac{dp}{d\tilde{p}} &= 2K \exp\left(-\frac{p}{2K}\right) \\ \frac{dq}{d\tilde{q}} &= 2K \exp\left(\frac{q}{2K}\right). \end{aligned}$$

Masukkan ke persamaan (A.7) sehingga diperoleh

$$\begin{aligned} ds^2 &= 4\Delta K^2 \exp\left(-\frac{p}{2K}\right) \exp\left(\frac{q}{2K}\right) d\tilde{p} d\tilde{q} - r^2 d\Omega^2 \\ &= 4\Delta K^2 \exp\left(-\frac{1}{K} \frac{1}{2} (p - q)\right) d\tilde{p} d\tilde{q} - r^2 d\Omega^2 \end{aligned} \quad (\text{A.8})$$

Dengan mengkombinasikan persamaan (2.16) dan (2.17) diperoleh

$$\frac{1}{2}(p - q) = r - \frac{r_-^2}{r_+ - r_-} \ln \left| \frac{r}{r_-} - 1 \right| + K \ln \left| \frac{r}{r_+} - 1 \right|. \quad (\text{A.9})$$

Karena bentuk r_-^2/r_+^2 akan selalu muncul dalam perhitungan, bentuk ini disingkat

dengan simbol W . Masukkan persamaan (A.9) ke persamaan (A.8).

$$\begin{aligned}
ds^2 &= 4\Delta K^2 \exp\left(-\frac{1}{K}\left(r - \frac{r_-^2}{r_+ - r_-} \ln\left|\frac{r}{r_-} - 1\right| + K \ln\left|\frac{r}{r_+} - 1\right|\right)\right) d\tilde{p}d\tilde{q} - r^2 d\Omega^2 \\
&= 4\Delta K^2 \exp\left(-\frac{r}{K} + W \ln\left|\frac{r}{r_-} - 1\right| - \ln\left|\frac{r}{r_+} - 1\right|\right) d\tilde{p}d\tilde{q} - r^2 d\Omega^2 \\
&= \frac{4\Delta K^2 \exp\left(-\frac{r}{K}\right)}{\left(\frac{r}{r_+} - 1\right)\left(\frac{r}{r_-} - 1\right)^{-W}} d\tilde{p}d\tilde{q} - r^2 d\Omega^2
\end{aligned}$$

Masukkan kembali ekspresi $\Delta \equiv (1 - r_-/r)(1 - r_+/r)$ maka akan diperoleh

$$ds^2 = \frac{4r_+ K^2 (r - r_-)^{1+W} \exp\left(-\frac{r}{K}\right)}{r^2 r_-^W} d\tilde{p}d\tilde{q} - r^2 d\Omega^2 \quad (\text{A.10})$$

Agar metrik di atas menjadi diagonal, didefinisikan

$$v = \frac{1}{2}(\tilde{p} + \tilde{q}), \quad u = \frac{1}{2}(\tilde{p} - \tilde{q}).$$

Diperoleh metrik Reissner-Nordström yang bebas singularitas koordinat sebagai berikut

$$ds^2 = \frac{4r_+ K^2 (r - r_-)^{1+W} \exp\left(-\frac{r}{K}\right)}{r^2 r_-^W} (dv^2 - du^2) - r^2 d\Omega^2. \quad (\text{A.11})$$

STATE ISLAMIC UNIVERSITY
SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA

LAMPIRAN B

Penurunan Persamaan Penyisipan Lubang Cacing Reissner-Nordström dalam $\mathbb{R}^3$

Persamaan penyisipan lubang cacing dalam $\mathbb{R}^3$ diberikan oleh persamaan (2.13). Untuk melakukan penyisipan ini, metrik dalam persamaan (A.11) harus diubah menjadi bentuk berikut.

$$ds^2 = \frac{4r_+ K^2 (r - r_-)^{1+W} \exp\left(-\frac{r}{K}\right)}{r^2 r_-^W} \left[1 - \left(\frac{dv}{du}\right)^2 \right] du^2 + r^2 d\Omega^2 \quad (\text{B.1})$$

Karena sifat simetri bola ruang-waktu Reissner-Nordström, dipilih $\theta = \pi/2$ sehingga dapat dihasilkan irisan dua dimensi lubang cacing dalam $\mathbb{R}^3$. Selain itu, penelitian ini juga hanya mengambil irisan dengan v konstan sehingga $dv/du = 0$. Persamaan (B.1) kemudian berubah menjadi

$$ds^2 = \frac{4r_+ K^2 (r - r_-)^{1+W} \exp\left(-\frac{r}{K}\right)}{r^2 r_-^W} du^2 + r^2 d\phi^2 \quad (\text{B.2})$$

Langkah selanjutnya adalah mengidentifikasi metrik (B.2) di atas dengan metrik $ds^2 = \left[1 - (dz/dr)^2 \right] dr^2 + d\phi^2$. Oleh karena itu, du^2 harus diubah menjadi dr^2 . Variabel r dalam metrik (B.2) di atas merupakan fungsi u dan v yang secara implisit dihubungkan oleh persamaan

$$u^2 - v^2 = \frac{r_-^W}{r_+} \exp\left(\frac{r}{K}\right) (r - r_-)^{-W} (r - r_+) \quad (\text{B.3})$$

sehingga ekspresi untuk du^2 dapat diperoleh dengan menurunkan kedua ruas persamaan ini.

$$2\left(u - v \frac{dv}{du}\right) du = \frac{r_-^W}{r_+} \exp\left(\frac{r}{K}\right) (r - r_-)^{-W} \left[(r - r_+) \left(\frac{1}{K} - \frac{W}{r - r_-} \right) + 1 \right] dr$$

$$du = \frac{r_-^W \exp\left(\frac{r}{K}\right) (r - r_-)^{-W} \left[(r - r_+) \left(\frac{1}{K} - \frac{W}{r - r_-} \right) + 1 \right]}{2r_+ \left(u - v \frac{dv}{du} \right)} dr \quad (\text{B.4})$$

Substitusikan du pada persamaan (B.4) ke persamaan (B.2) dan dengan mengingat bahwa $v = \text{konstan}$ menghasilkan

$$ds^2 = \frac{r_-^W K^2 (r - r_-)^{1-W} \exp\left(\frac{r}{K}\right) \left[(r - r_+) \left(\frac{1}{K} - \frac{W}{r - r_-} \right) + 1 \right]^2}{r_+ r^2 \left(\frac{r_-^W}{r_+} \exp\left(\frac{r}{K}\right) (r - r_-)^{-W} (r - r_+) + v^2 \right)} dr^2 + r^2 d\phi^2$$

Komponen rr dari metrik di atas yaitu

$$g_{rr} = \frac{r_-^W K^2 (r - r_-)^{1-W} \exp\left(\frac{r}{K}\right) \left[(r - r_+) \left(\frac{1}{K} - \frac{W}{r - r_-} \right) + 1 \right]^2}{r_+ r^2 \left(\frac{r_-^W}{r_+} \exp\left(\frac{r}{K}\right) (r - r_-)^{-W} (r - r_+) + v^2 \right)}$$

Dengan demikian, persamaan penyisipan lubang cacing Reissner-Nordström dalam $\mathbb{R}^3$ yaitu

$$z(r) = \int_{r(0)}^{r(u)} \left[\frac{r_-^W K^2 (r - r_-)^{1-W} \exp\left(\frac{r}{K}\right) \left[(r - r_+) \left(\frac{1}{K} - \frac{W}{r - r_-} \right) + 1 \right]^2}{r_+ r^2 \left(\frac{r_-^W}{r_+} \exp\left(\frac{r}{K}\right) (r - r_-)^{-W} (r - r_+) + v^2 \right)} - 1 \right]^{\frac{1}{2}} dr \quad (\text{B.5})$$

LAMPIRAN C

Kode Program MATLAB

```
function varargout = simulasi(varargin)
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',       mfilename, ...
                  'gui_Singleton',   gui_Singleton, ...
                  'gui_OpeningFcn',   @simulasi_OpeningFcn, ...
                  'gui_OutputFcn',    @simulasi_OutputFcn, ...
                  'gui_LayoutFcn',    [], ...
                  'gui_Callback',     []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end
if nargin
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end
function simulasi_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles,
varargin)
handles.output = hObject;
guidata(hObject, handles);
function varargout = simulasi_OutputFcn(hObject, eventdata,
handles)
varargout{1} = handles.output;
function charge_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
function time_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
function rminSC_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
function rminRN_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
end

%PERSAMAAN-PERSAMAAN
function rSchwarzschild = f_rSchwarzschild(r,m,u,v)
rSchwarzschild = (r/2*m-1)*exp(r/2*m)-u*u+v*v;
return
function zSchwarzschild = f_zSchwarzschild(r,v)
```

```

zSchwarzschild = sqrt((abs((2.*(exp(r./2)-v.*v))./(r.*exp(r./2)-
(2.*(exp(r./2)-v.*v))))));
return
function rReissner = f_rReissner(a,b,r,K,v,u,W)
rReissner = (((a^W)*exp(r/K)*(r-b)*(((r-a)^(-W))))/b)-u*u+v*v;
return
function zReissner = f_zReissner(r,a,W,K,b,v)
zReissner = sqrt(abs((((a.^W).*(K.^2).*((r-a).^(1-
W)).*exp(r./K)).*((r-b).*(1./K-W./(r-
a))+1).^2))./(b.*(r.^2).*((a.^W).*exp(r./K).*(r-b).*((r-a).^(-
W))))./b)+v.*v))-1));
return

%INPUT MUATAN
function charge_Callback(hObject, eventdata, handles)
q=str2num(get(handles.charge, 'String'));
handles.q=q;
guidata(hObject, handles)

%INPUT WAKTU
function time_Callback(hObject, eventdata, handles)
v=str2num(get(handles.time, 'String'));
handles.v=v;
guidata(hObject, handles)

%TOMBOL CALCULATE
function calculate_Callback(hObject, eventdata, handles)
%inisialisasi variabel
q = handles.q;
m = 1;
v = handles.v;
r1 = 0;
r2 = 10;
r1T=0;
r2T=10;
tol = 1e-4;
a = m-sqrt(m*m-q*q);
b = m+sqrt(m*m-q*q);
K = b*b/(b-a);
W = a*a/b*b;
maxstep = 300;
u = 0;
uT=0;
repetisi=100;

%pencarian r SCHWARZSCHILD dengan metode bisection
for jT=1:repetisi
    rtT=(r1T+r2T)/2;
    for i=1:maxstep
        if(abs(r2T-r1T))>tol
            f1T=f_rSchwarzschild(r1T,m,uT,v);
            f2T=f_rSchwarzschild(r2T,m,uT,v);
            if(f1T*f2T)>0
                disp('error');
                break;
            else

```

```

        rtT=(r1T+r2T)/2;
        frT=f_rSchwarzschild(rtT,m,uT,v);
        if(f1T*frT)<0
            r2T=rtT;
        else
            r1T=rtT;
        end
    end
else
    RT(jT)=rtT;
    r1T=0;r2T=10;
    break;
end
end
uT=uT+0.01;
end
%pencarian r REISSNER dengan metode bisection
for j=1:repetisi
    rt=(r1+r2)/2;
    for i=1:maxstep
        if(abs(r2-r1))>tol
            f1=f_rReissner(a,b,r1,K,v,u,W);
            f2=f_rReissner(a,b,r2,K,v,u,W);
            if(f1*f2)>0
                disp('error');
                break;
            else
                rt=(r1+r2)/2;
                fr=f_rReissner(a,b,rt,K,v,u,W);
                if(f1*fr)<0
                    r2=rt;
                else
                    r1=rt;
                end
            end
        end
    else
        R(j)=rt;
        r1=0;r2=10;
        break;
    end
end
u=u+0.01;
end

%pencarian z SCHWARZSCHILD dengan metode kuadratur
hT=1e-4;
for iT=1:repetisi
    RRT=RT(iT);
    aaT=RT(1);
    hasilT(iT)=quad(@f_zSchwarzschild(r,v),aaT,RRT,hT);
end
%pencarian z REISSNER dengan metode kuadratur
h=1e-4;
for i=1:repetisi
    RR=R(i);
    aa=R(1);

```

```

        hasil(i)=quad(@(r)f_zReissner(r,a,W,K,b,v),aa,RR,h);
    end

    %pembuatan matriks SCHWARZSCHILD
    rAxT=RT';
    zAxT=hasilT';
    nT=200;
    rAxisT=[rAxT; rAxT];
    tAxisT=zeros(nT,1);
    zAxisT=[zAxT; -zAxT];
    xyzT=[rAxisT, tAxisT, zAxisT];
    xThetaT=zeros(nT,nT);
    yThetaT=zeros(nT,nT);
    zThetaT=zeros(nT,nT);
    thetaT=linspace(0,2*pi,nT);
    for i=1:nT
        RotasiT=[cos(thetaT(i)) -sin(thetaT(i)) 0; sin(thetaT(i))
cos(thetaT(i)) 0; 0 0 1];
        xyz_t_thetaT=xyzT*RotasiT;
        xThetaT(:,i)=xyz_t_thetaT(:,1);
        yThetaT(:,i)=xyz_t_thetaT(:,2);
        zThetaT(:,i)=xyz_t_thetaT(:,3);
    end
    %pembuatan matriks REISSNER
    rAx=R';
    zAx=hasil';
    n=200;
    rAxis=[rAx; rAx];
    tAxis=zeros(n,1);
    zAxis=[zAx; -zAx];
    xyz=[rAxis, tAxis, zAxis];
    xTheta=zeros(n,n);
    yTheta=zeros(n,n);
    zTheta=zeros(n,n);
    theta=linspace(0,2*pi,n);
    for i=1:n
        Rotasi=[cos(theta(i)) -sin(theta(i)) 0; sin(theta(i))
cos(theta(i)) 0; 0 0 1];
        xyz_t_theta=xyz*Rotasi;
        xTheta(:,i)=xyz_t_theta(:,1);
        yTheta(:,i)=xyz_t_theta(:,2);
        zTheta(:,i)=xyz_t_theta(:,3);
    end

    %pembuatan grafik SCHWARZSCHILD
    axes(handles.scAxes)
    surf1(xThetaT,yThetaT,zThetaT)
    shading interp
    colormap gray
    axis([-2.5 2.5 -2.5 2.5 -2.5 2.5]);
    %pembuatan grafik REISSNER
    axes(handles.rnAxes)
    surf1(xTheta,yTheta,zTheta)
    shading interp
    colormap gray
    axis([-2.5 2.5 -2.5 2.5 -2.5 2.5]);

```

```

%menampilkan nilai r minimum
var_rminSC=min(RT);
var_rminRN=min(R);
set(handles.rminSC,'string',var_rminSC);
set(handles.rminRN,'string',var_rminRN);

%penyimpanan komponen-komponen matriks
handles.xThetaT=xThetaT;
handles.yThetaT=yThetaT;
handles.zThetaT=zThetaT;
handles.xTheta=xTheta;
handles.yTheta=yTheta;
handles.zTheta=zTheta;
guidata(hObject, handles)

%TOMBOL SAVE
function save_Callback(hObject, eventdata, handles)
xTheta=handles.xTheta;
yTheta=handles.yTheta;
zTheta=handles.zTheta;
xThetaT=handles.xThetaT;
yThetaT=handles.yThetaT;
zThetaT=handles.zThetaT;
figure('position',[0,0,500,500])
surfl(xThetaT,yThetaT,zThetaT)
title('Schwarzschild Wormhole');
xlabel('x');ylabel('y');zlabel('z');
shading interp
colormap gray
axis([-2.5 2.5 -2.5 -2.5 2.5]);
figure('position',[500,0,500,500])
surfl(xTheta,yTheta,zTheta)
title('Reissner-Nordstrom Wormhole');
xlabel('x');ylabel('y');zlabel('z');
shading interp
colormap gray
axis([-2.5 2.5 -2.5 2.5 -2.5 2.5]);

%TOMBOL RESET
function reset_Callback(hObject, eventdata, handles)
set(handles.charge,'String','');
set(handles.time,'String','');
set(handles.rminSC,'String','');
set(handles.rminRN,'String','');
cla(handles.scAxes,'reset');
cla(handles.rnAxes,'reset');
guidata(hObject,handles);

%TOMBOL TAMBAHAN UNTUK PEMBUATAN GRAFIK
function tambahan_Callback(hObject, eventdata, handles)

%Pembuatan grafik muatan vs jari-jari
q1=0:0.05:0.95;
q2=q1.*1.16063*10; %konversi ke Q

```

```

rminRN1=[2.00005 1.99883 1.99501 1.98875 1.97975 1.96831 1.95396
1.93672 1.91658 1.89308 1.86607 1.83510 1.80000 1.75987 1.71410
1.66145 1.59996 1.52672 1.43593 1.31218];
rminRN2=rminRN1.*9.74565/10;
figure,plot(q2,rminRN2,'b')
xlabel('muatan (C) x 10^16');ylabel('jari-jari (m) x 10^3');
title('Grafik hubungan muatan vs jari-jari pada v=0');

%Pembuatan grafik evolusi waktu lubang cacing
q = 0.25;
figure();
for iq = 1:3
    m = 1;
    r1 = 0;
    r2 = 10;
    r1T = 0;
    r2T = 10;
    tol = 1e-4;
    a = m-sqrt(m*m-q*q);
    b = m+sqrt(m*m-q*q);
    K = b*b/(b-a);
    W = a*a/b*b;
    maxstep = 300;
    u = 0;
    uT = 0;
    repetisi = 100;
    v = -0.95;
    for ik = 1:39 %jumlah v
        for jT=1:repetisi
            rtT=(r1T+r2T)/2;
            for i=1:maxstep
                if(abs(r2T-r1T))>tol
                    f1T=f_rSchwarzschild(r1T,m,uT,v);
                    f2T=f_rSchwarzschild(r2T,m,uT,v);
                    if(f1T*f2T)>0
                        disp('error');
                        break;
                    else
                        rtT=(r1T+r2T)/2;
                        frT=f_rSchwarzschild(rtT,m,uT,v);
                        if(f1T*frT)<0
                            r2T=rtT;
                        else
                            r1T=rtT;
                        end
                    end
                end
            else
                RT(jT)=rtT;
                r1T=0;r2T=10;
                break;
            end
        end
        uT=uT+0.01;
    end
    for j=1:repetisi
        rt=(r1+r2)/2;

```

```

for i=1:maxstep
    if(abs(r2-r1))>tol
        f1=f_rReissner(a,b,r1,K,v,u,W);
        f2=f_rReissner(a,b,r2,K,v,u,W);
        if(f1*f2)>0
            disp('error');
            break;
        else
            rt=(r1+r2)/2;
            fr=f_rReissner(a,b,rt,K,v,u,W);
            if(f1*fr)<0
                r2=rt;
            else
                r1=rt;
            end
        end
    else
        R(j)=rt;
        r1=0;r2=10;
        break;
    end
end
u=u+0.01;
end
rminSC(ik)=min(RT); %jari-jari lubang cacing Schwarzschild
rminRN(ik)=min(R); %jari-jari lubang cacing Reissner
v=v+0.05;
u=0;
uT=0;
end
t=-0.95:0.05:0.95;
rminRNn=rminRN.*9.74565/10; %konversi ke satuan meter
plot(t,rminRNn)
if(q==0.25)
    gtext('A');
else if(q==0.5)
    gtext('B');
else
    gtext('C');
end
end
hold on
q=q+0.25;
v=-0.95;
end
rminSCn=rminSC.*9.74565/10;
plot(t,rminSCn,'r')
gtext('D');
xlabel('waktu');ylabel('jari-jari (m) x 10^3');
title('Grafik hubungan waktu vs jari-jari');

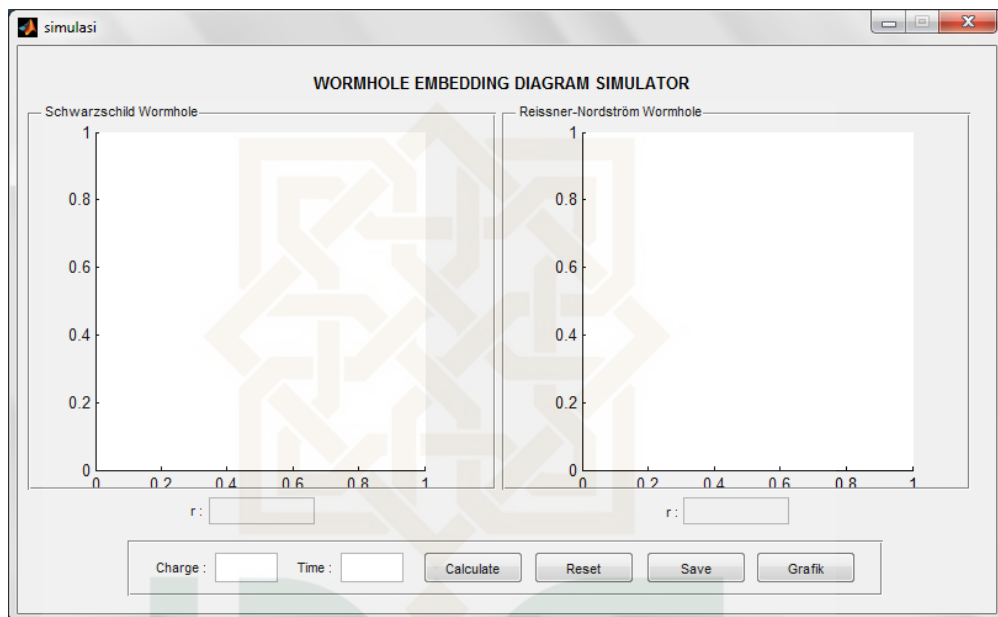
function rminSC_Callback(hObject, eventdata, handles)
function rminRN_Callback(hObject, eventdata, handles)

```

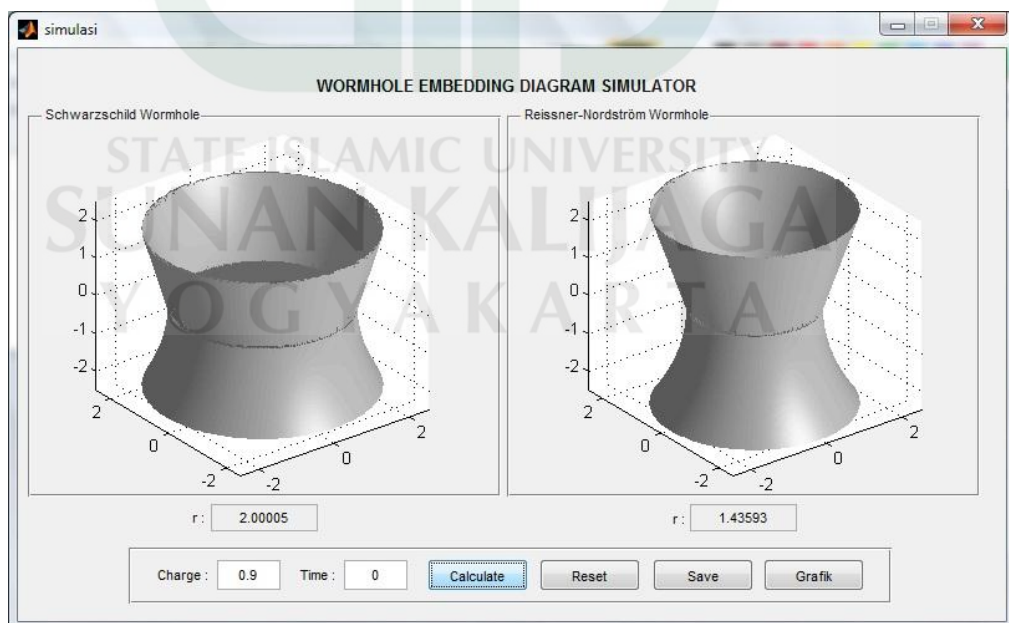
LAMPIRAN D

Tampilan Simulator

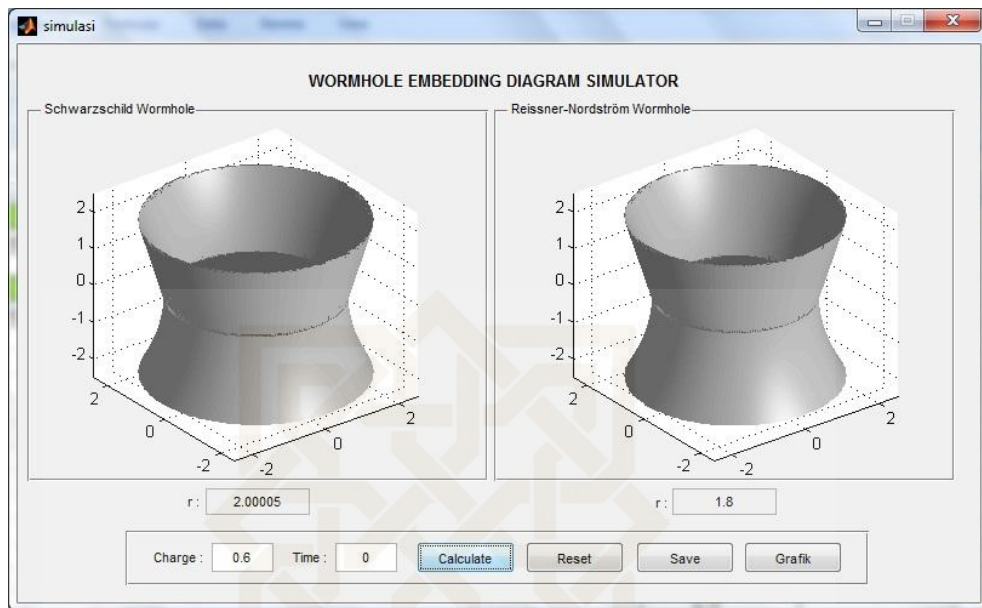
1. Tampilan awal simulator



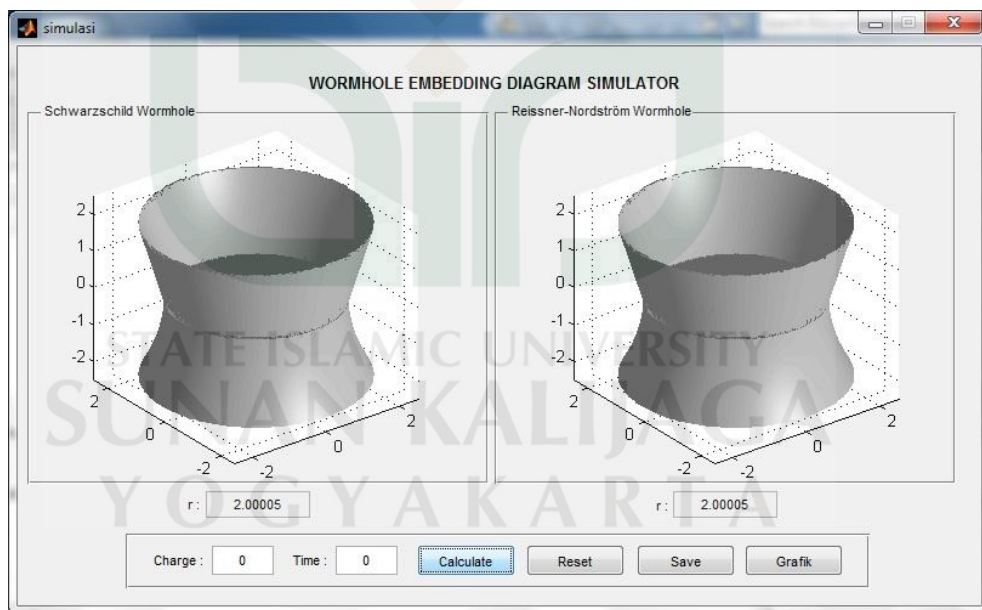
2. Tampilan simulator untuk muatan (Q) = $1,0446 \times 10^{17}$ C dan waktu (v) = 0



3. Tampilan simulator untuk muatan (Q) = $6,9638 \times 10^{16}$ C dan waktu (v) = 0



4. Tampilan simulator untuk muatan (Q) = 0 C dan waktu (v) = 0



Catatan:

Charge dalam simulator ini tidak diinputkan dalam bentuk Q (muatan listrik) melainkan q (suku muatan) sehingga harus dikonversi terlebih dahulu menggunakan persamaan: $q = (8,6160 \times 10^{-18} \text{ mC}^{-1}) Q$.

DAFTAR RIWAYAT HIDUP

Curriculum Vitae

I. Data Pribadi

1. Nama : Wahyu Norrudin
2. Tempat, tanggal lahir : Bantul, 28 April 1996
3. Jenis Kelamin : Laki-laki
4. Agama : Islam
5. Status Pernikahan : Belum menikah
6. Kewarganegaraan : WNI
7. Alamat KTP : Jalan Imogiri-Siluk km 1,9 Karangtalun RT 01,
Karangtalun, Imogiri, Bantul, DI.Yogyakarta
8. Alamat sekarang : Jalan Imogiri-Siluk km 1,9 Karangtalun RT 01,
Karangtalun, Imogiri, Bantul, DI.Yogyakarta
9. Email : wahyunorrudin1@gmail.com
10. No. HP : 085733917757



II. Pendidikan Formal

Jenjang	Nama Sekolah	Tahun
TK	TK Pertiwi 9	2001 – 2002
SD	SD Negeri 3 Imogiri	2002 – 2008
SMP	SMP Negeri 1 Imogiri	2008 – 2011
SMU	SMK Negeri 1 Bantul	2011 – 2014
S1	UIN Sunan Kalijaga	2014 – 2017

III. Pengalaman Organisasi

Ketua FORMASSKA	2014 – 2015
Kadept Divisi Media-Jaringan FKIST	2015 – 2016

IV. Pengalaman Lain

Tentor privat fisika	2016 - sekarang
Pimpinan redaksi majalah M-KIST	2015 - 2016
Fasilitator training ICT UIN Sunan Kalijaga	2016 - 2017
Asisten praktikum fisika modern	2016 - 2017
Asisten praktikum termodinamika	2017
Pemateri ASTRONIC	2017

V. Kemampuan

1. Microsoft Office (Word, Excel, Powerpoint)
2. Desain grafis (CorelDraw, Adobe Photoshop)
3. Pemrograman (PHP, HTML, Mikrokontroler Arduino)
4. Media pembelajaran, animasi, dan simulasi (Adobe Flash, Algodo)
5. Komputasi (MATLAB)