

# **LUBANG HITAM**

Sebuah Pengantar Populer

Aqsa Brilianza  
Misbahul Jannah  
Abd Mujahid Hamdan

# LUBANG HITAM

## Sebuah Pengantar Populer

Aqsa Brilianza  
Misbahul Jannah  
Abd Mujahid Hamdan



Buku Perguruan Tinggi  
**CV. Pustaka Learning Center**  
**M A L A N G**

# **LUBANG HITAM**

## **Sebuah Pengantar Populer**

Penulis : **Aqsa Brilianza**  
**Misbahul Jannah**  
**Abd Mujahid Hamdan**

ISBN 978-623-6591-00-0

**Cetakan Pertama, 2020**

viii, 87 hlm; 14.5 x 21

Penyunting : Umi Salamah

Desain Sampul : Misbahul Munir

Desain Layout : Pramudya Ammar

**Penerbit :**

**CV. Pustaka Learning Center**

Karya Kartika Graha A.9 Malang 65132

Whatsapp 08994458885

Email: [pustakalearningcenter@gmail.com](mailto:pustakalearningcenter@gmail.com)

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang . Dilarang memperbanyak atau memindahkan Sebagian atau seluruh isi buku ini ke dalam bentuk apapun secara elektronik maupun mekanis tanpa izin Tertulis dari penulis dan Penerbit Pustaka Learning Center

## KATA PENGANTAR

Puji syukur kita panjatkan kepada Allah Subhanahu Wa Ta 'Ala. Shalawat dan salam kepada Rasulullah Salallahu 'Alaihi Wa Sallam.

Indonesia sedang berupaya untuk bangkit di semua sektor. Sejak berdirinya republik ini, kita semua percaya bahwa pengetahuan dan teknologi adalah batu-bata peradaban untuk membangun bangsa ini yang letaknya di garis katulistiwa. Pengetahuan dan teknologi juga menjadi jawaban hipotetik terhadap paradoks, mengapa negeri yang diberkahi dengan kekayaan alam, baik di lautan maupun di daratan tidak dapat lepas dari belenggu kemiskinan dan mengapa kita yang dianggap sebagai negara ke-tiga tidak pernah mampu masuk ke gerbang kesejahteraan.

Indonesia sedang menggeliat. Pemerintah sedang berupaya dengan segenap cara yang paling mungkin agar kita dapat menjadi pemain penting dalam perkembangan pengetahuan. Riset-riset juga diarahkan untuk pembangunan nasional dan menjawab sejumlah tantangan di dalam negeri. Dari semua upaya dan gerakan itu, pengetahuan dasar yang sifatnya *basic science* juga tidak dapat ditinggalkan. Pengetahuan dasar adalah serpihan mozaik yang harus kita miliki agar akselerasi perkembangan pengetahuan dapat dilakukan dengan lebih masif.

Terdapat hipotesa bahwa bangsa-bangsa yang unggul dalam pencapaian teknologi adalah bangsa yang tidak meninggalkan pengetahuan dasar dari daftar sekala prioritasnya. Kosmologi dan astrofisika adalah pengetahuan dasar yang nampaknya di dalam negeri tidak terlalu diperhatikan. Jumlah buku teks untuk pengetahuan ini masih dapat di hitung dengan jari. Ilmuan yang berkecimpung pada bidang ini juga jauh dari kata cukup untuk menopang kebutuhan pengetahuan astrofisika dan kosmologi dengan negara penduduk yang jumlahnya hampir sepertiga miliar.

Sebagai negara yang menjadikan keyakinan kepada Tuhan Yang Maha Kuasa dalam asas kehidupan berbangsanya, seharusnya ada upaya yang serius terhadap integrasi nilai-nilai agama dengan pengetahuan dasar. Pengetahuan diharapkan dapat menjadi salah satu pilar yang meresap dalam kehidupan beragama dalam tingkat yang lebih luas dan dalam. Menurut hemat kami, kosmologi dan astrofisika sangat dekat bahkan berdampingan dengan nilai-nilai religius kita sebagai manusia. Kosmologi dan astrofisika, bahkan secara eksplisit disebutkan dalam teks kitab-kitab suci agama yang ada di Indonesia. Itulah sebabnya, mengapa pengetahuan dasar ini harus diperkenalkan lebih luas pada masyarakat di berbagai tingkatan.

Buku ini adalah secuil karya untuk menyemarakkan pengetahuan negeri. Kami berharap pengetahuan populer terhadap teori-teori fundamental

fisika bukan menjadi sesuatu yang asing. Buku ini diharapkan menjadi api kecil untuk memantik gelombang eforia pengetahuan di dalam negeri. Besar harapan, kami mendapat masukan dan saran dari pembaca sekalian, demi penyempurnaan tulisan ini. Tulisan ini adalah hasil penelitian yang dilakukan oleh penulis dalam tugas untuk memenuhi kurikulum di Pendidikan Fisika UIN Ar-Raniry Banda Aceh.

Penulis mengucapkan terimakasih yang tak terhingga kepada Prodi Pendidikan Fisika FTK UIN Ar-Raniry Banda Aceh yang telah memfasilitasi penulis dalam penerbitan buku ini. Terima kasih juga kepada semua pihak yang membantu penulisan ini, kepada orang tua, sahabat-sahabat “Profesor Muda”, dan tentunya kepada orang yang kami cintai yang tidak dapat kami sebutkan satu-persatu.

Pada akhirnya buku ini masih membutuhkan penyempurnaan dan masukan dari pembaca sekalian. Kami akan sangat senang menerima masukan tersebut yang akan sangat berguna pada edisi-edisi revisi berikutnya.

Akhir kata.

Banda Aceh, 2020

Penulis

# DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	III
DAFTAR ISI	VI
BAB I RELATIVITAS UMUM .....	1
1.1 Teori Gravitasi Newton .....	2
1.2 Teori Relativitas Khusus .....	6
1.3 Teori Gravitasi Umum .....	11
BAB II LUBANG HITAM .....	18
BAB III TIPE-TIPE BLACK HOLE .....	28
3.1 Swartzchiled Balckhole (NonRotating, Uncharged) .....	29
3.2 Reissner-Nordstrom BlackHole (Nonrotating,Charged) .....	30
3.3 Kerr Black Hole (Rotating, Uncharged)	31
3.4 Supermassive Black Hole .....	32
BAB IV GELOMBANG GRAVITASI BLACK- HOLE .....	34
4.1 Penemuan gelombang Gravitasi pada tahun 2016 .....	39
4.2 Dua Tipe Detektor Gelombang Gravitasi	44
4.3 Prinsip Instrumentasi detector Gelombang Gravitasi .....	46
4.4 Tentang aLIGO .....	49
4.5 Apa itu interferometer .....	53
4.6 Seperti apa Interferometer itu? .....	54
4.7 Cara kerja LIGO (Interferometer) .....	55
4.8 Apa itu pola Gangguan? .....	58

BAB V	PENGAMATAN CITRA BAYANGAN	
	BLACK HOLE .....	61
5.1	Black Hole dari galaksi M87 .....	62
5.2	Lubang Hitam Berwarna Kuning .....	69
5.3	Mengapa gambar yang didapat berwarna kuning? .....	69
5.4	Apakah Lubang Hitam berputar? .....	70
5.5	Mengapa di bagian dalam lebih gelap? ..	71
5.6	Citra bayangan Black Hole .....	72
DAFTAR PUSTAKA	.....	81



# I

# RELATIVITAS UMUM

## Teori Gravitasi Newton



**Gambar 1.1 Issac Newton**

Gagasan Issac Newton mengenai gravitasi pertama kali muncul di buku *Philosophia Naturalis Principia Mathematica*, pada tahun 1687. Gagasan ini mahsyur melalui penjelasan mengapa apel yang ada di kebun jatuh ke tanah. Terlepas dari apakah cerita tentang apel jatuh

itu benar-benar ada, persamaan gravitasi Newton mampu menjelaskan mengapa kita tetap berdiri di atas permukaan bumi. Persamaan gravitasi Newton juga mampu memberi alasan mengapa dan bagaimana Bumi tetap mengorbit di sekitar Matahari. Karena kemampuannya dalam menjelaskan dan meramalkan mekanika benda langit, persamaan Newton telah membantu manusia untuk mendarat di atas permukaan bulan.

Newton mengemukakan suatu hukum gravitasi yang menyebutkan bahwa gaya tarik menarik antara dua benda besarnya sebanding dengan massa masing-masing benda dan berbanding terbalik dengan kuadrat jarak antara kedua benda (Newton, 1999 [1726]). Hukum tersebut kemudian dikenal dengan Hukum Gravitasi

Universal Newton. Peristiwa tentang kecenderungan benda jatuh menuju pusat bumi dan keteraturan peredaran planet dan benda-benda langit lainnya dalam tata surya dahulu dianggap dua fenomena yang berbeda. Namun demikian, setelah Newton (1726) mengemukakan gagasannya mengenai gravitasi, maka mekanika benda langit dan fenomena kebumihan yang berhubungan dengan sistem mekanik dianggap sebagai satu fenomena yang saling terintegrasi (Smith, 1998; Ducheyne, 2009 dan Ducheyne, 2011).

Gravitasi Newton dengan spektakuler memprediksi lintasan benda-benda langit dalam sistem tata surya dengan sangat akurat. Gagasan Newton mengenai gravitasi menyempurnakan teori mekanika benda langit yang diusulkan sebelumnya. Persamaan Newton datang berabad-abad setelah astronom dan matematikawan Jerman Johannes Kepler menyusun model geometri mekanika benda langit. Sebelumnya, prediksi Kepler terhadap orbit planet berhasil dengan sangat baik meramal periode suatu planet mengorbit matahari. Namun, dengan sintesa antara Hukum Gravitasi Newton dengan Hukum Kepler, maka posisi dan massa benda-benda langit juga dapat ditentukan dengan baik (Gingerich, 1975 dan Pourciau, 2007). Selain sebagai prediktor, teori Newton mampu memberi landasan teoritis hasil-hasil pengamatan empiris yang dilakukan oleh Kepler.



**Gambar 1.2 Komet Halley**

Sukses teori ini terus berlanjut. Gravitasi Newton menjadi dasar perhitungan untuk menentukan kemunculan Komet Halley (Thrower, 1969). Di masa itu, Teori Gravitasi Newton benar-benar

menakjubkan. Ilmuwan benar-benar mengalihkan perhatian mereka terhadap “kesaktian”nya dengan mencocokkan antara hasil perhitungan dengan pengamatan. Teori gravitasi Newton benar-benar mencapai puncak kegemilangannya ketika berhasil memprediksi dan membantu penemuan planet baru di masa itu. Pada tahun 1781, William Hanover menemukan planet Uranus melalui pengatamannya menggunakan teleskop. Seperti yang diprediksi oleh teori Newton, melalui data pengamatan, orbit Uranus teramati dalam bentuk elips (Ring, 2000). Pada tahun 1846, astronom Prancis Le Verriere menggunakan teori gravitasi Newton untuk menghitung posisi benda langit yang memberi “gangguan” terhadap orbit Uranus. Perhitungan itu pada akhirnya memprediksi hadirnya planet ke-delapan Neptunus (Hubble dkk., 1992).



**Gambar 1.3 Johannes Kepler**

Namun, Hukum Gravitasi Newton dan Hukum Kepler tidak dapat memprediksi lintasan orbital Planet Merkurius dengan baik (Harper, 2007). Pada tahun 1841, Urbain Jean Joseph Le Verriere melakukan pengamatan terhadap Planet Merkurius. Terdapat perbedaan antara gerak presisi yang diprediksi oleh teori gravitasi Newton

dengan pengamatan. Tidak konsistennya antara prediksi dengan hasil pengamatan sangat mengganggu komunitas astronomi di kala itu dan menjadi ujian paling kritis terhadap teori gravitasi Newton. Selama dua abad teori ini telah menjadi teori yang sangat kokoh melalui persamaan yang sederhana dan elegan. Setelah temuan perbedaan antara teori dan pengamatan tersebut, teori ini mulai diragukan. Belakangan, teori Newton tidak sepenuhnya mampu menjelaskan presesi perihelion orbit planet-planet, terutama planet Merkurius [33].

Newton sendiri tidak menjelaskan bagaimana gaya gravitasi itu bekerja. Newton tidak menjelaskan dengan memuaskan bagaimana mekanisme gaya gravitasi menjadi interaksi antara objek langit. Ada mata rantai yang hilang antara persamaannya yang elegan dengan penjelasan konsep pada tingkat filosofi yang lebih dalam (Schliesser, 2011). Akibatnya, teori ini terlalu sulit menghadapi beberapa pertanyaan-pertanyaan kritis. Misal, bagaimana interaksi gravitasi antara dua benda terjadi dalam waktu sesaat di dalam ruang hampa.

## **Teori Relativitas Khusus**

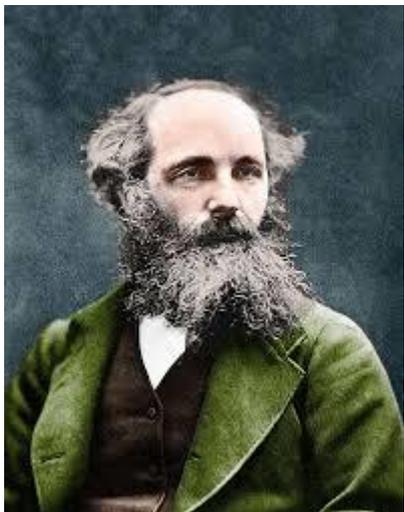


**Gambar 1.4 Augustin-Jean  
Fresnel**

Pada abad ke-19, teori cahaya mendapat perhatian yang sangat besar. Terdapat dua teori yang menjadi acuan para ilmuwan pada masa itu, yaitu konsep cahaya menurut Newton dan Fresnel. Newton menganggap cahaya sebagai “bulir-bulir” yang bergerak di dalam ruang. Sedangkan teori lainnya adalah teori yang diusulkan Fresnel yang menganggap cahaya sebagai gelombang. Di masa itu, anggapan Fresnel terhadap cahaya dianggap lebih kuat daripada pandangan Newton. Hal tersebut disebabkan oleh adanya dukungan

hasil eksperimen yang dilakukan Thomas Young terhadap fenomena interferensi cahaya. Fenomena cahaya sebagai gelombang dapat diterima dengan baik, karena fenomena interferensinya dapat dijelaskan dengan analogi sederhana melalui fenomena interferensi pada gelombang air (Elton 2009).

Konsekuensi atas anggapan bahwa cahaya adalah gelombang, maka gelombang diasumsikan harus merambat di dalam medium, serupa dengan gelombang bunyi pada udara dan gelombang air pada air laut. Pada saat itu, cahaya dihipotesakan merambat pada suatu medium yang disebut sebagai eter. Melalui gagasan ini, benda-benda langit dianalogikan sebagai perahu yang berada di atas lautan, dengan lautan adalah analogi untuk eter.



**Gambar 1.5 James Clerk Maxwell**

Ditengah gagasan eter sebagai medium rambat cahaya, pada akhir abad ke-19 James Clarck Maxwell menunjukkan bahwa cahaya merupakan gelombang yang merupakan perpaduan antara gelombang listrik dan gelombang. Gelombang ini disebut

sebagai gelombang elektromagnetik (Chalmers, 1986). Teori medan

elektromagnetik pada saat itu dianggap satu lompatan besar dalam fisika. Namun, teori mengenai eter sama sekali belum benar-benar dapat terpecahkan.

Perhatian fisikawan di masa itu ditujukan untuk mengamati eter. Untuk mengukur kecepatan gelombang air laut, maka dapat dilakukan dengan mengamati kecepatan perahu yang dibawa oleh gelombang tersebut, sehingga untuk mengamati eter sebagai medium rambat cahaya dapat dilakukan dengan pengukuran terhadap cahaya (Michelson, 1881). Eksperimen yang paling terkenal dalam mendekteksi keberadaan eter di dalam ruang dilakukan oleh Albert A. Michelson dan Edward W. Morley pada tahun 1887. Namun, eksperimen tersebut gagal menunjukkan bahwa terdapat eter sebagai medium rambat cahaya seperti yang telah dihipotesakan selama ini.

\*\*\*

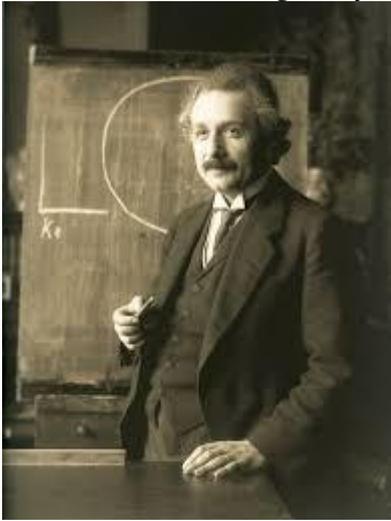
Pada kinematika klasik, gerak diketahui bersifat relatif. Dalam menjelaskan gerak suatu partikel di dalam



**Gambar 1.6 Galileo Galilei**

sistem, dibutuhkan suatu kerangka acuan. Kerangka acuan dasar Newton disebut sebagai 'ruang absolut'. Sifat geometris acuan tersebut berdasarkan pada sifat-sifat geometri Euclidean. Ruang ini dengan mudah dideskripsikan melalui sistem koordinat Cartesius. Dengan prinsip tersebut, suatu benda atau partikel yang mengalami gerak terhadap

suatu kerangka acuan dapat diamati dalam keadaan diam oleh kerangka yang lainnya. Sementara itu,



kerangka acuan yang tidak bergerak atau bergerak secara seragam dalam ruang absolut disebut kerangka acuan Galilea. Prinsip relativitas Galileo, menyatakan bahwa hukum-hukum mekanika harus dalam bentuk yang sama untuk semua kerangka acuan inersial. Newton juga memperkenalkan waktu

universal yang sama untuk semua posisi di alam semesta.

\*\*\*

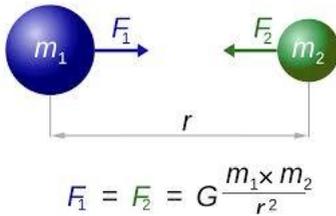
Pada usia 16 tahun Einstein mulai memikirkan tentang fenomena cahaya. Ia membayangkan, jika ia dapat mengendarai sebuah cahaya, kemudian terdapat cahaya lain yang bergerak bersama dengan cahaya yang dikendarainya, maka ia akan mengukur bahwa cahaya yang disampingnya tidak bergerak. Namun, hal ini tidak sesuai dengan hasil perhitungan yang dilakukan oleh James Clarck Maxwell bahwa cahaya selalu bergerak dengan kecepatan yang sama.

Einstein mengusulkan konsep baru dalam menjelaskan mekanika sebuah benda di dalam ruang. Einstein masih mempertahankan gagasan Newton

tentang pengamat istimewa yang dalam kerangka Galilea yang bergerak dengan kecepatan konstan relatif satu sama lain. Namun, Einstein memperluas konsep ekuivalensi kerangka Galilea. Menurut Einstein, eter sebagai kerangka absolut tidak dibutuhkan untuk menjelaskan mekanika benda yang bergerak. Artinya, tidak diperlukan konsep eter untuk menjelaskan dua objek yang bergerak di dalam ruang. Kecepatan masing-masing objek tersebut hanya diukur berdasarkan kecepatannya terhadap benda yang lain. Prinsip tersebut selanjutnya disebut sebagai Teori Relativitas Khusus yang mengacu pada dua prinsip, yaitu: (i) Prinsip relativitas: hukum-hukum Fisika haruslah berbentuk sama di semua kerangka acuan inersial, dan (ii) Laju cahaya konstan yang dalam ruang vakum merambat dengan laju  $2,99 \times 10^8$  m/s, terhadap semua kerangka inersial dan kecepatan tersebut sama sekali tidak bergantung pada kecepatan pengamat atau kecepatan sumber (Grøn dan Hervik, 2007).

Teori Relativitas Khusus menciptakan lompatan fundamental di dalam fisika. Sebelumnya, tidak ada intuisi yang cukup meyakinkan bahwa ruang dan waktu adalah dua parameter yang saling berhubungan. Dengan Teori Relativitas Einstein, waktu menjadi elemen penting untuk menjelaskan konsep ruang dan waktu atau ruang-waktu di dalam alam semesta.

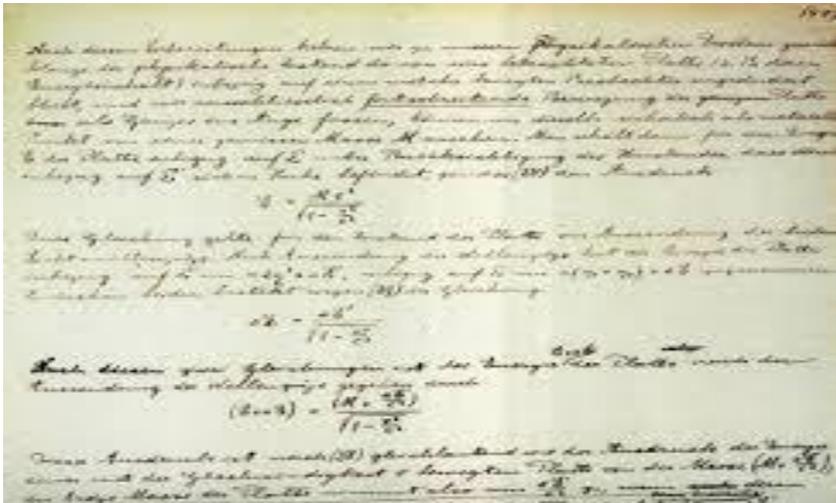
# Teori Gravitasi Umum



Gambar 1.8 Ilustrasi gaya gravitasi Newton

Menurut Newton, dinamika bumi dan matahari dikontrol oleh persamaan interaksi gravitasi dalam bentuk,

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2} \quad (1.1)$$



Gambar 1.9 Manuskrip asli relativitas khusus Einstein

Dengan  $r$  adalah jarak rata-rata bumi-matahari,  $m_1$  dan  $m_2$  adalah massa bumi dan matahari. Bayangkan jika matahari mengalami seketika lenyap di dalam ruang akibat peristiwa tertentu, maka gaya tarik menarik antara bumi-matahari juga lenyap dalam selang waktu yang

yang tidak terdefinisi. Bagi Teori Relativitas Khusus, hal ini tidak mungkin terjadi, sebab ada benda atau energi yang memiliki kelajuan melampaui besarnya kelajuan cahaya. Mari berimajinasi! Dengan jarak bumi-matahari adalah 150 juta km dan laju cahaya adalah 299.792 km/detik, maka waktu yang dibutuhkan bumi untuk merasakan hilangnya matahari adalah 8,33 menit, dengan asumsi kelajuan energi gaya sama dengan kelajuan cahaya. Dengan demikian, efek gravitasi antara satu objek di alam semesta membutuhkan waktu untuk mempengaruhi objek lainnya. Meskipun terdapat kontradiksi antara Teori Gravitasi Newton dengan Teori Relativitas Khusus Einstein, namun Teori Relativitas Khusus tidak dapat mengganti kehandalan gravitasi Newton dalam memprediksi orbit planet-planet dalam tata surya. Koreksi Einstein justru memberikan hasil prediksi orbit planet yang keliru terhadap data astronomi. Satu-satunya cara untuk menjelaskan hal ini adalah, teori Newton tidak sepenuhnya benar dan diperlukan teori baru untuk memodifikasinya.

Konsep Issac Newton menganggap terdapat kerangka absolut di dalam ruang. Mari kita uji! Anggaplah kita berada di dalam lift yang terletak di ruang angkasa. Di posisi tersebut lift bebas dari gaya gravitasi dari objek tertentu di dalam ruang angkasa. Lift mengalami percepatan ke atas dengan percepatan yang sama dengan percepatan gravitasi bumi yaitu  $9,8 \text{ m/s}^2$ . Jika terdapat sebuah apel dalam keadaan melayang di dalam lift, maka apel tersebut akan bergerak menuju

lantai lift dengan percepatan yang sama dengan percepatan yang dialami oleh lift, yaitu  $9,8 \text{ m/s}^2$ . Jika apel tersebut dijatuhkan di permukaan bumi, maka apel akan jatuh ke bumi dengan percepatan yang sama dengan apel yang ada di dalam pesawat. Artinya, kita tidak dapat membedakan apakah apel tersebut mengalami pengaruh gravitasi dari bumi atau karena kerangka acuannya mengalami percepatan yang sama dengan percepatan gravitasi di bumi. Dengan demikian, apakah gravitasi disebabkan oleh kehadiran benda bermassa, atau hanya kerangka acuan mengalami percepatan? Teori gravitasi yang dikemukakan oleh Newton, nampaknya membutuhkan koreksi dengan eksperimen pikiran tersebut. Meskipun relativitas khusus berhasil memberi konsep ruang-waktu yang baru dan radikal, namun teori ini tidak cukup untuk menjelaskan kejanggalan-kejanggalan yang diuraikan sebelumnya.

\*\*\*

Einstein menghabiskan 10 tahun untuk memberikan gagasan baru mengenai gravitasi. Pada tahun 1915 Einstein mempublikasikan karyanya yang mengusulkan bahwa gravitasi disebabkan oleh kelengkungan ruang dan waktu akibat distorsi oleh massa. Teori ini kemudian disebut sebagai Teori Relativitas Umum (TRU). TRU berdasar pada dua asas, yaitu asas ekuivalensi dan kedua asas kovariansi umum. Asas kesetaraan menyatakan bahwa tidak ada eksperimen yang dapat dilakukan dalam daerah lokal yang dapat membedakan antara medan gravitasi atau

## Die Feldgleichungen der Gravitation.

VON A. EINSTEIN.

In zwei vor kurzem erschienenen Mitteilungen<sup>1</sup> habe ich gezeigt, wie man zu Feldgleichungen der Gravitation gelangen kann, die dem Postulat allgemeiner Relativität entsprechen, d. h. die in ihrer allgemeinen Fassung beliebigen Substitutionen der Raumzeitvariablen gegenüber kovariant sind.

Der Entwicklungsgang war dabei folgender. Zunächst find ich Gleichungen, welche die Newtonsche Theorie als Näherung enthalten

**Gambar 1. 10 Makalah Relativitas Umum Einstein**

sistem yang dipercepat yang setara. TRU benar-benar radikal dalam memandang ruang dan waktu. Konsep ruang dalam TRU menganggap ruang di dalam jagad raya dirajut oleh anyaman ruang dan waktu, yang selanjutnya disebut sebagai ruang-waktu.

TRU menghubungkan ruang-waktu sebagai objek geometris terhadap massa dan energi. Bentuk atau kelengkungan geometris dari ruang-waktu ditentukan oleh distribusi massa dan energi. Untuk menyederhanakan konsep ini, mari kita analogikan ruang-waktu dengan trampolin yang bersifat elastis dan matahari sebagai bola pejal bermassa. Kemudian bola tersebut diletakkan di atas trampolin, maka bola akan menyebabkan permukaan trampolin yang sebelumnya datar menjadi melengkung. Kemudian terdapat bola pingpong yang ukurannya lebih kecil dan massanya lebih ringan dari bola pejal. Jika bola pingpong dilempar di sekitar bola pejal, maka bola pingpong akan mengalami gerak melingkar di sekitar bola pejal.

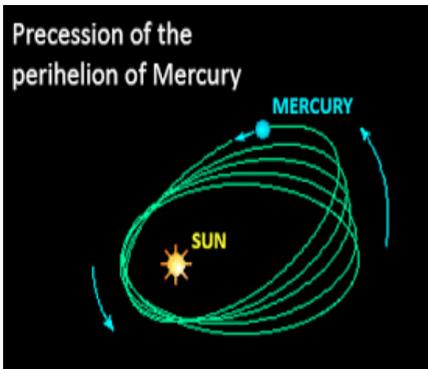
Demikianlah analogi terhadap kelengkungan ruang-waktu yang disebabkan oleh keberadaan matahari, yang dapat menyebabkan bumi mengalami gerak revolusi mengelilingi matahari.

Sebagaimana teori fisika yang lain, TRU harus diuji dengan pengamatan. TRU telah melewati beberapa uji yang tidak dapat dijelaskan dengan teori Newton. Uji tersebut adalah presisi merkurius, pergeseran merah akibat gravitasi, pembelokan cahaya dan pulsar ganda.

### *Presisi Merkurius*

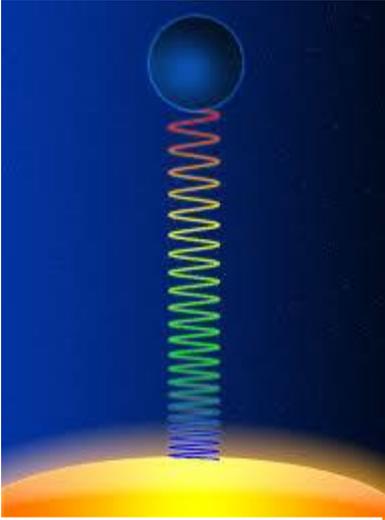
Sebagaimana yang dijelaskan sebelumnya, teori gravitasi Newton tidak dapat menjelaskan data pengamatan terhadap presisi Merkurius (Park dkk., 2017). Sejumlah asumsi

untuk mencocokkan kegagalan ini, diantaranya adalah dugaan bahwa terdapat debu antara Merkurius dan Matahari. Namun, TRU dengan akurat memprediksi presisi merkurius tersebut.



**Gambar 1.11 Presisi perihilion Merkurius**

## *Pergeseran merah gravitasi*



**Gambar 1.12** Ilustrasi pergeseran merah gravitasi

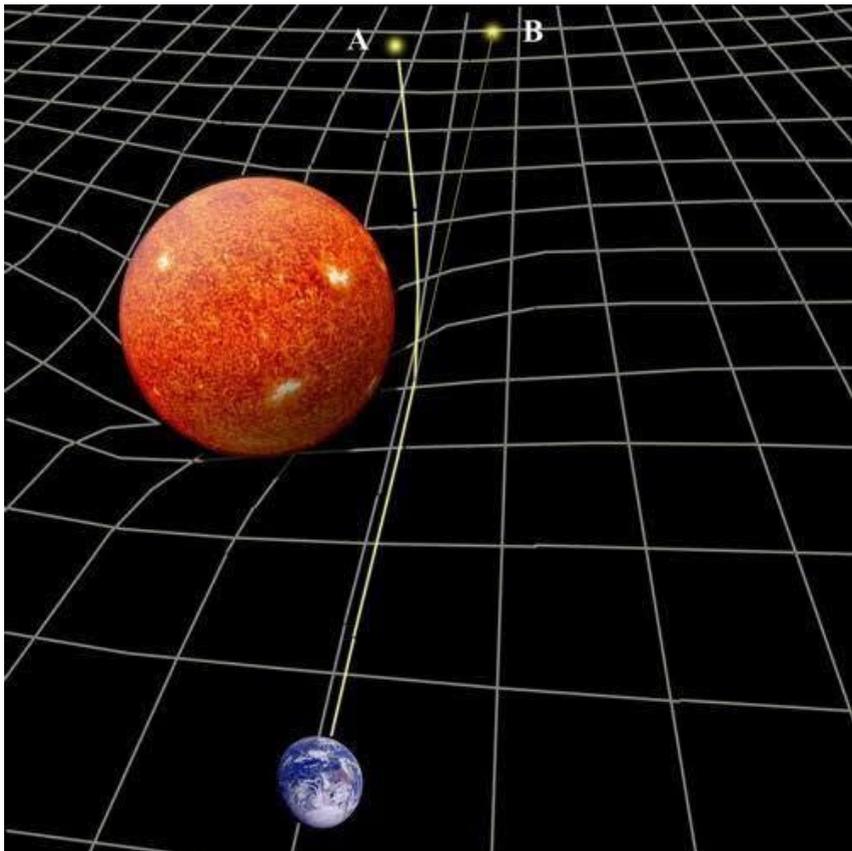
TRU memprediksi bahwa gelombang elektromagnetik akan menjadi lebih panjang pada daerah gravitasi yang lebih lemah dan menjadi pendek pada daerah dengan gravitasi yang lebih kuat. Fenomena ini disebut sebagai pergeseran merah. Sejumlah observasi telah membuktikan prediksi ini. Salah satunya adalah eksperimen menara Harvard. Eksperimen ini juga disebut sebagai

Eksperimen Pound-Rebka dengan sinar gamma ditembakkan dari atas menara dan diukur oleh penerima di bagian bawah menara. Hasilnya, terjadi pergeseran frekuensi ke nilai frekuensi yang lebih besar akibat perbedaan gravitasi.

## *Pembelokan cahaya*

Pada tahun 1919 pembelokan akibat cahaya akibat gravitasi pertama kali teramati. Ekspedisi ini disponsori oleh Royal Astronomical Society dan Royal Society. Sir Arthur Eddington memimpin ekspedisi untuk memotret Gerhana Matahari Total pada tahun tersebut. Pemotretan

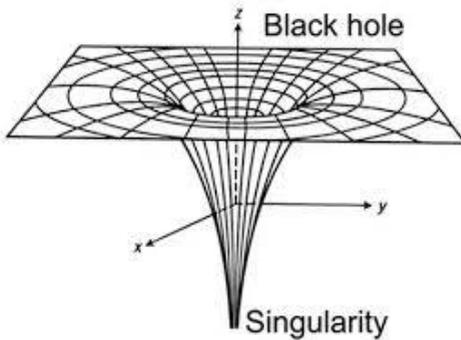
dilakukan untuk mengamati bintang-bintang yang cahayanya lewat di dekat Matahari. Hasil pemotretan tersebut menunjukkan terjadinya pembelokan cahaya. Percobaan diulangi pada tahun 1922 dengan gerhana lain, hasilnya tetap mengkonfirmasi prediksi Albert Einstein.



**Gambar 1.13 Ilustrasi pembelokan cahaya akibat gravitasi**

# II

# LUBANG HITAM

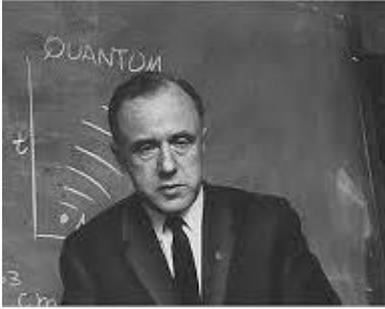


**Gambar 2.1 Singularitas dan lubang hitam**

Lubang hitam adalah wilayah di dalam ruang-waktu yang memiliki medan gravitasi sangat kuat, bahkan cahaya tidak dapat lepas dari ruang tersebut akibat kuatnya gaya gravitasi tersebut. Lubang hitam terbentuk jika sebuah

benda dengan massa  $M$  mengalami kontraksi sampai pada ukuran kurang dari  $2GM/c^2$  ( $G$  adalah konstanta gravitasi Newton dan  $c$  adalah kecepatan cahaya). Persamaan tersebut menunjukkan bahwa kecepatan yang diperlukan untuk meninggalkan batas tepi lubang hitam sama dengan kecepatan cahaya. Karena kecepatan cahaya adalah batas paling maksimum, maka dapat disimpulkan bahwa tidak ada sinyal atau partikel yang dapat lepas dari wilayah lubang hitam.

Lubang hitam dideskripsikan sepenuhnya menggunakan TRU. Karena kerumitan persamaannya, sekilas TRU tidak dapat mendeskripsikan secara lengkap tentang lubang hitam. Apalagi dengan sifatnya yang nonlinear. Namun, TRU benar-benar memberi penjelasan yang relatif sangat memuaskan mengenai sifat fisis dari lubang hitam, seperti massa, momentum sudut dan muatan listrik.



**Gambar 2.2 Jhon Wheeler**

Teori Lubang Hitam dilontarkan pertama kali pada abad ke-18 oleh John Michell dan Pierre-Simon Laplace. Michell dan Laplace membahas mengenai lubang hitam dalam kerangka teori Newton. Istilah "lubang hitam"

diperkenalkan oleh Wheeler pada tahun 1967 meskipun studi teoritis objek ini memiliki sejarah yang cukup panjang. Walaupun dianggap luas sebagai pencetus pertama istilah ini, namun John Archibald Wheeler selalu menampik anggapan sebagai penemu istilah ini. Segera setelah itu, istilah lubang hitam diadopsi dengan antusias oleh masyarakat luas.



**Gambar 2.3 Karl Schwarzschild**

Satu tahun setelah teori dikembangkan, Schwarzschild (1916) mendapatkan solusi eksak (simetris bola) persamaan persamaan Einstein dalam ruang hampa. Solusi ini merupakan solusi pertama terhadap TRU. Interpretasi dari solusi ini adalah adanya singularitas pada pusat simetri dan adanya horizon

peristiwa pada permukaan lubang hitam. Melalui persamaan ini, untuk pertama kalinya TRU memberi

hasil bahwa di sekitar materi yang termampatkan dengan kepadatan tak hingga, akan muncul wilayah bulat mampu menjebak materi. Materi yang masuk ke wilayah tersebut, tidak dapat bebas karena tarikan gravitasi yang sangat kuat. Batas wilayah tersebut dikenal sebagai horizon peristiwa, karena tidak ada peristiwa yang terjadi di dalamnya yang dapat diamati dari luar. Pada tahun 1939, J. Robert Oppenheimer dan Hartland Snyder mengusulkan mekanisme terjadinya lubang hitam di alam semesta. Menurutnya, sebuah bintang yang telah kehabisan "bahan bakar" nuklirnya, akan mengalami kolaps akibat tidak dapat menahan diri dari gravitasinya sendiri. Sisa-sisa bintang tersebut selanjutnya mengalami penyusutan. Pada akhirnya, akan terbentuk singularitas lubang hitam.

Studi intensif benar-benar mulai dilakukan sejak pertengahan tahun enam puluhan setelah Sygne (1950), Kruskal (1960) dan Kerr (1963) memberikan solusi eksak terhadap lubang hitam model Scwartzchild dan model lubang hitam yang mengalami rotasi. Sebelum periode ini, para ahli menganggap lubang hitam sebagai tahap akhir utama dari evolusi bintang masif, dan mungkin benda yang lebih masif. Untuk memberi penjelasan fase bintang tersebut, beberapa istilah telah digunakan diantaranya bintang "beku" atau bintang "runtuh".



**Gambar 2.4 Teleskop Hubble**

Setelah bintang neutron ditemukan pada akhir tahun enam puluhan, para astrofisikawan selanjutnya mengalihkan perhatian terhadap kemungkinan pengamatan terhadap lubang hitam. Kemajuan instrumentasi astronomi dengan sinar-X dan mengarah pada penemuan sejumlah sumber-sumber sinar-X di alam semesta. Pada akhir tahun sembilan puluhan lubang hitam diyakini ada di dalam Galaksi kita. Melalui Teleskop Hubble Ford dkk. (1994) dan Harms dkk., (1994) melaporkan pengamatan yang relatif sangat jelas



**Gambar 2.5 Stephen W Hawking**

untuk memperkuat dugaan bahwa terdapat lubang hitam di pusat galaksi.

Stephen W Hawking (1974, 1975) menstimulus perhatian fisikawan pada lubang hitam setelah mengusulkan teori bahwa ketidakstabilan lubang hitam di ruang hampa disebabkan oleh radiasi kuantum. Radiasi tersebut dianggap memiliki

spektrum termal. Dengan kata lain, lubang hitam dapat

memancarkan radiasi seperti benda hitam yang dipanaskan. Hawking juga mengemukakan bahwa jika massa lubang hitam cukup kecil, ia akan meluruh dalam waktu yang lebih pendek dari usia alam semesta. Lubang hitam kecil seperti itu, sekarang disebut lubang hitam *primordial* yang mungkin telah terbentuk pada tahap awal evolusi alam semesta. Pada prinsipnya, usulan lubang hitam *primordial* atau produk peluruhannya akan memberikan informasi berharga tentang proses fisika yang terjadi di alam semesta pada awal penciptaan.

Tim yang dipimpin oleh Fabio Pacucci melakukan pemodelan komputasi untuk melihat lubang hitam dari citra yang diperoleh dari tiga teleskop NASA. Dengan menggunakan Teleskop Hubble dan Spitzer, dua kandidat lubang hitam yang berwarna merah berhasil teramati. Kedua calon lubang hitam ini memiliki massa sekitar 100.000 kali besar daripada massa matahari. Diduga bintang-bintang tersebut telah terbentuk kurang dari satu miliar tahun setelah terjadinya ledakan besar di awal penciptaan (*bigbang*). Sementara itu, temuan baru yang dipublikasikan oleh *Royal Astronomical Society* mengusulkan adanya skenario lain bahwa terdapat beberapa calon lubang hitam yang lebih masif dengan 100.000 kali massa matahari. Lubang hitam ini diduga terbentuk secara langsung dari kolapsnya awan-awan gas.

*Bagaimana lubang hitam terbentuk?* Lubang hitam terbentuk sebagai siklus dari sebuah bintang. Bintang akan terbentuk ketika gas yang didominasi oleh

unsur hidrogen mengalami kolaps akibat interaksi gravitasi di dalam kumpulan gas tersebut. Dalam prosesnya, atom-atom gas akan mengalami gesekan dan tabrakan. Kejadian ini berlangsung semakin cepat. Selanjutnya atom-atom hidrogen tersebut membentuk atom helium. Panas yang dihasilkan akan memicu tekanan hingga cukup digunakan untuk membuat gaya tarik gravitasi. Jika keseimbangan tersebut tercapai, gas kemudian berhenti mengalami kontraksi. Keseimbangan antara tarikan gravitasi dengan tekanan yang berasal dari reaksi nuklir akan menjaga bintang stabil. Akan tetapi ketika bintang kehabisan bahan bakarnya, suhu bintang mulai menurun dan selanjutnya mengalami kontraksi.

Ketika ukuran bintang menjadi kecil, partikel-partikel intra-bintang menjadi lebih dekat satu sama lain. Berdasarkan asas larangan Pauli, partikel-partikel tersebut haruslah memiliki kecepatan yang benar-benar berbeda. Ini membuat mereka menjauh satu sama lain, sehingga bintang mengalami pengembangan. Dengan hal ini, bintang mempertahankan dirinya dengan menjaga keseimbangan antara gaya gravitasi dan gaya yang muncul akibat dari asas larangan. Namun, karena kecepatan maksimum partikel di dalam bintang adalah kecepatan cahaya, maka ada batasan ketika bintang menjadi cukup padat, tolakan yang disebabkan oleh asas larangan akan lebih kecil dari gaya gravitasi. Bintang yang massanya lebih dari satu setengah kali massa matahari tidak akan mampu menopang dirinya untuk

melawan gravitasinya sendiri. Di dalam bintang yang memiliki massa satu atau dua kali massa matahari akan ditopang oleh gaya gravitasi akibat asas larangan antara neutron dan proton. Oleh karena itu disebut sebagai bintang neutron. Bintang ini hanya memiliki jari-jari sekitar sepuluh mil dengan kepadatan sekitar ratusan juta ton untuk setiap inci kubik.

Implikasi yang sangat mengejutkan adalah bahwa terdapat kemungkinan bintang mengalami kontraksi dan selanjutnya kolaps menuju ke satu titik jika bintang memiliki massa yang lebih masif. Dalam situasi ini, asas larangan tidak dapat menghentikan runtuhnya bintang. Pada 1960-an, Oppenheimer menyatakan bahwa medan gravitasi bintang dapat mengubah jalur cahaya dalam ruang-waktu. Hal ini bisa dilihat pada pembengkokan cahaya oleh bintang-bintang yang diamati selama terjadinya gerhana matahari. Saat bintang mengalami kontraksi, medan gravitasi di permukaannya semakin kuat. Keadaan ini membuat cahaya semakin sulit lolos dari bintang. Selanjutnya, cahaya akan diamati meredup atau nampak merah. Pada akhirnya, ketika bintang telah menyusut ke jari-jari kritis tertentu, medan gravitasi di permukaan menjadi sangat kuat sehingga cahaya tidak lagi dapat lepas dari tarikan gravitasi.



**Gambar 2.6 Roger Penrose dan Stephen W Hawking**

Roger Penrose dan Stephen Hawking menunjukkan bahwa pasti ada singularitas tak terbatas dan kelengkungan ruang-waktu di dalam lubang hitam. Menurut

Stephen Hawking, di dalam singularitas hukum-hukum fisika dan kemampuan kita untuk meramalkan masa depan akan runtuh. Namun, keadaan ini tidak berlaku bagi pengamat yang tetap berada di luar lubang hitam, hal ini karena baik cahaya atau sinyal lain tidak dapat menjangkau dirinya dari singularitas. Selanjutnya, Roger Penrose mengusulkan hipotesis bahwa singularitas yang dihasilkan oleh keruntuhan gravitasi hanya terjadi di lubang hitam.

Schwarzschild merupakan orang pertama yang memecahkan persamaan TRU Einstein. Ia menggunakan solusi bola simetri di dalam ruang hampa. Metrik Schwarzschild mengilustrasikan medan gravitasi dengan asumsi muatan listrik, momentum dan konstanta kosmologi tidak diperhitungkan. Solusi ini berhasil relatif memuaskan untuk membuktikan kehandalan TRU untuk menjelaskan mekanika benda-benda langit seperti sistem tata surya kita.

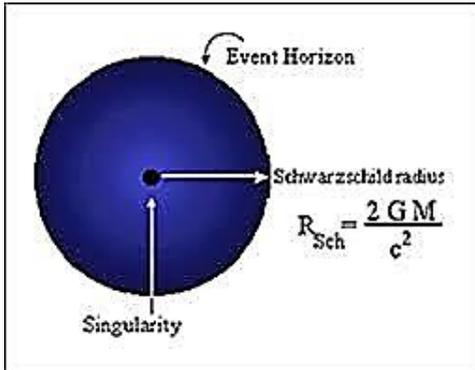
Pada tahun 1967 Werner Israel menunjukkan bahwa akselerasi materi bintang yang terjadi dalam keruntuhan bintang membangkitkan gelombang gravitasi yang membuat bintang menjadi *spheris*. Menurut hipotesa ini, setiap bintang yang tidak mengalami rotasi, akan menjadi lubang hitam bulat sempurna yang ukurannya hanya akan bergantung pada massanya. Pada tahun 1963, Roy Kerr memberi model baru solusi dari persamaan TRU untuk lubang hitam yang mengalami rotasi. Lubang hitam "Kerr" mengalami rotasi dengan laju konstan yang

ukuran serta bentuknya ditentukan oleh massa dan laju rotasinya. Jika tidak terjadi rotasi, lubang hitam akan menjadi bulat sempurna dan solusinya identik dengan solusi Schwarzschild. Namun jika lubang hitam mengalami rotasi, lubang hitam akan menonjol ke luar dekat khatulistiwa. Semakin kuat rotasinya, maka tonjolan tersebut juga semakin besar.

# III

## TIPE-TIPE *BLACK HOLE*

## Swartzchild      Balckhole      (Non-Rotating, Uncharged)



**Gambar 3.1 Struktur Black Hole Schwarzschild**

Pada saat itu, *Black-Hole* adalah objek imajinatif fisikawan, karena lubang hitam masih menjadi sesuatu yang bersifat hipotetik. Sebagai sebuah misteri, lubang hitam benar-benar sangat jauh dari bayangan bahwa

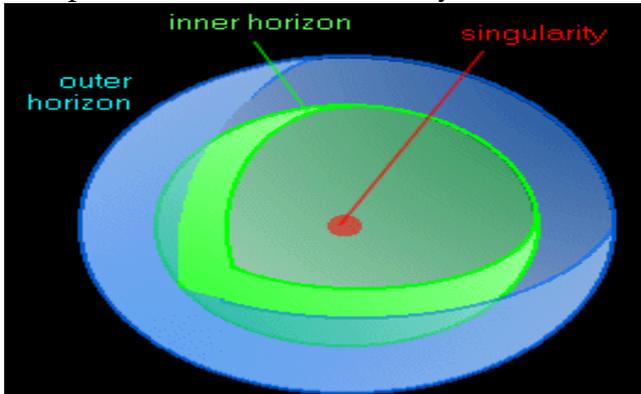
dapat dibuktikan keberadaanya di alam semesta. Dengan asumsi bahwa lubang hitam tidak mengalami rotasi, Schwarzschild mengejutkan dunia fisika melalui persamaanya yang berhasil menunjukkan bahwa lubang hitam mungkin benar-benar ada di jagad raya.

*Black-Hole Schwarzschild* adalah jenis lubang hitam paling sederhana dalam teori. Model ini juga mengambil asumsi bahwa lubang hitam tidak memiliki muatan listrik. Melalui solusinya beberapa fitur-fitur menarik mengenai lubang hitam, yaitu, sebuah bola foton 1,5 kali lebih besar dari jari-jari Schwarzschild, adanya horizon peristiwa dan singularitas yang memiliki nilai kelengkungan tak hingga.

## *Reissner-Nordstrom Black Hole (Non rotating, Charged)*

Model lubang hitam Reissner-Nordstrom mengambil asumsi bahwa lubang hitam bermuatan listrik dan tidak mengalami rotasi. Lubang hitam Reissner-Nordstrom memiliki dua horizon peristiwa yang terpisah yang terdiri dari horizon peristiwa bagian dalam dan horizon peristiwa bagian luar.

Konsekuensi dari dua horizon peristiwa adalah bahwa ketika melintasi keduanya, ruang dan waktu bertukar peran dua kali: dalam bola yang tertutup oleh cakrawala Cauchy, ruang dan waktu kembali ke peran mereka yang biasa dikarenakan ruang dan waktu telah bertukar peran dua kali. Akibatnya, adalah mungkin



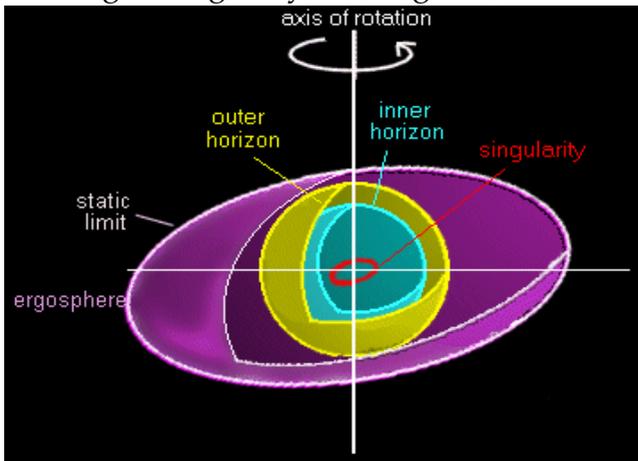
**Gambar 3.2 Struktur *Black-hole* Reissner-Nordstrom. (Sumber: IN. Rumiuno)**

untuk menghindari singularitas, yang bersifat temporal. Jika muatan lubang hitam cukup tinggi, kedua horizon

menghilang dan singularitas menjadi terbuka. Banyak fisikawan percaya bahwa situasi itu tidak dapat muncul: ada prinsip “sensor kosmik” mereka percaya itu dapat mencegah singularitas menjadi terbuka terbentuk.

### ***Kerr Black Hole (Rotating, Uncharged)***

*Kerr Black-Hole* adalah jenis lubang hitam yang memiliki massa dan momentum sudut dan tidak memiliki muatan listrik. Nama lubang hitam ini ditujukan untuk menghargai jasa matematikawan Selandia Baru Roy Kerr yang pada tahun 1963 yang mengusulkan model ini. Model *Kerr Black-Hole* mungkin model yang relatif lebih realistis untuk menggambarkan kebanyakan bintang-bintang masif di alam semesta. Model ini terdiri dari struktur yang relatif lebih kompleks dari model-model lain. *Kerr Black-Hole* memiliki bagian-bagian yaitu, ergosfir, horizon dalam,



**Gambar 3.3 Struktur Kerr Black-Hole**

horizon luar dan singularitas.

Ergosfir adalah area ellipsoidal di sekitar *Kerr Black-Hole*. Ergosfir dibatasi oleh bagian permukaan statis atau stasioner dan horizon peristiwa bagian luar. Model ini, memungkinkan sebuah objek yang masuk ke area ergosfer masih dapat lolos dari “jebakan” lubang hitam, jika benda tersebut mendapatkan energi dari rotasinya. Namun, jika objek tersebut masuk ke horizon peristiwa, objek tersebut tidak lagi dapat meloloskan diri.

### *Supermassive Black Hole*



**Gambar 3.4 Ilustrasi Quasar**

*Supermassive Black-Hole* adalah lubang hitam yang massanya puluhan ribu hingga miliaran kali dari massa matahari. Salah satu lubang hitam

supermasif yang dikenal adalah lubang hitam OJ287 yang bermassa 18 miliar kali massa matahari yang terletak di dalam *quasar*. *Quasar* ini terletak sekitar 3,5 miliar tahun cahaya di konstelasi *Cancer*. Massa lubang hitam pusatnya, diketahui enam kali lebih besar dari lubang hitam terdekat. *Black-Hole* yang lebih kecil memiliki massa hanya sekitar 100 juta Matahari, mengorbit di sekitar lubang hitam yang jauh lebih besar dengan jarak hanya 1,5 tahun cahaya.

Bagaimana lubang hitam ini terbentuk? Lubang hitam supermasif pada awalnya adalah lubang hitam non-supermasif yang “menelan” materi disekitarnya selama jutaan tahun. Kemungkinan lain lubang hitam supermasif berasal dari kumpulan lubang hitam yang mengalami penggabungan menjadi satu. Selain itu, lubang hitam supermasif terbentuk dari awan gas besar yang kolaps lalu membentuk lubang hitam.

IV  
GELOMBANG  
GRAVITASI *BLACK-*  
*HOLE*

Teori Relativitas Umum merupakan karya besar Einstein yang memerlukan waktu cukup lama untuk diuji, bahkan sampai sekarang pengujian teori ini masih berlangsung. Teori ini dapat dikatakan sebagai teori yang “membongkar” teori gravitasi Newton dengan radikal. Teori ini mampu memperkirakan beberapa fenomena di jagad raya seperti pembelokan cahaya bintang, presisi orbit planet, pergeseran merah gravitasi, dan gema tunda radar dengan ketelitian tinggi.



**Gambar 4.1 Ilustrasi gelombang gravitasi dalam ruang-waktu**

Lubang hitam dan gelombang gravitasi adalah salah satu prakiraan yang paling menarik dari teori gravitasi Einstein. Pembuktiannya dilakukan bukan dengan observasi secara langsung. Pada dasarnya semua informasi

lain tentang lubang hitam diperoleh tidak langsung. Misal, pengamatan-pengamatan yang berasal dari pengaruhnya terhadap gas di lingkungan sekitar lubang hitam [Schutz, 2009]. Teori Einstein berimplikasi bahwa lubang hitam seharusnya memancarkan radiasi (gelombang) gravitasi. Gelombang gravitasi merupakan riak dalam struktur ruang-waktu disebabkan oleh peristiwa tertentu, seperti tumbukan antara bintang-bintang neutron dan lubang hitam.

Peristiwa yang paling mungkin untuk diamati adalah tabrakan antara lubang hitam supermasif di pusat galaksi. Pertanyaannya adalah, seberapa sering peristiwa ini terjadi, agar gelombang ini dapat teramati. Gelombang gravitasi dianggap akan membantu fisikawan dan astronom untuk memahami beberapa hukum yang paling dasar dalam fisika. Gelombang gravitasi juga akan memberitahu kita tentang dinamika peristiwa berskala besar di alam semesta seperti kematian kelahiran lubang hitam. Itulah sebabnya, astrofisikawan sangat tertarik pada gelombang gravitasi, karena gelombang ini menawarkan cara yang sama sekali baru untuk mempelajari alam semesta.



**Gambar 4.2 Bernard F. Schutz**

Pada tahun 1999, istilah "Gelombang Gravitasi" diusulkan Schutz sebagai objek pengamatan astronomi. Untuk menelaah gelombang gravitasi dengan model

Memasuki abad ke-21, para astrofisikawan berada di ambang penggunaan gelombang gravitasi untuk mendapatkan perspektif baru tentang alam semesta. Gelombang gravitasi diduga dapat menjadi proksi untuk melakukan pengamatan lubang hitam secara langsung.

matematis, diperlukan penyelesaian persamaan medan gravitasi Einstein yang diterapkan pada peristiwa keruntuhan (*collapses*) pada jenis-jenis lubang hitam [Stephani, 2003; Kerr, 2008].

Pada tahun 2002, Moreno dan Nunez telah menurunkan persamaan untuk dua bagian radiasi dari tensor Weyl menggunakan koordinat Kerr-Schild, dengan menyertakan sumber radiasi. Persamaan yang diperoleh telah diuji dalam kasus sederhana dan diperoleh hasil yang diharapkan, yaitu bahwa gangguan radial tidak menghasilkan radiasi. Analisis dan persamaan yang disajikan dalam karyanya melengkapi sejumlah hasil-hasil numerik yang sebelumnya ada. Selain itu, sejumlah model gelombang gravitasi diuji dalam model observatorium gravitasi seperti LISA dan LIGO [Moreno, 2002].

Saat ini jaringan detektor gelombang gravitasi *interferometri* beroperasi di seluruh dunia. Pencarian yang sedang dilakukan ditujukan pada deteksi langsung dari sumber radiasi gravitasi, seperti detektor gelombang gravitasi *Laser Interferometer Space Antenna* (LISA) [Rowan, 2006].

Detektor gelombang gravitasi yang beroperasi saat ini sedang berfokus untuk mencari beberapa macam sinyal gelombang gravitasi pada frekuensi puluhan Hertz sampai kilohertz. Salah satunya adalah tabrakan pasangan lubang hitam yang bermassa kira-kira 10 M. Terkadang antara sekarang dan sekitar 8 tahun dari sekarang, ada kemungkinan bahwa sinyal semacam ini

akan diamati. Hasilnya akan menjadi uji yang kuat bagi prakiraan dinamika relativitas umum dalam medan kuat.



**Gambar 4.3 Bintang Katai putih**

Hal pertama yang dilakukan adalah pengamatan pada tabrakan pasangan lubang hitam yang bermassa menengah (100 sampai 105  $M$ ) dan lubang hitam yang bermassa lebih tinggi pada pergeseran merah kira-kira  $z = 10$ . Hal ini akan memberikan informasi baru mengenai

awal terbentuknya dan pertumbuhan lubang hitam seperti yang ditemukan pada sebagian besar galaksi, dan hubungan antara pertumbuhan lubang hitam dan evolusi struktur galaksi. Tujuan kedua adalah pengamatan pada lubang hitam yang bermassa sekitar 10  $M$ , bintang neutron, dan katai putih. Selanjutnya pengamatan diteruskan pada lubang hitam yang jauh lebih besar yang berada pada inti galaksi. Kejadian-kejadian tersebut akan memberikan informasi rinci tentang objek-objek di daerah di sekitar pusat galaksi. Tujuan ketiga adalah penggunaan dua jenis pertama dalam pengamatan untuk menguji relativitas umum bahkan akan lebih kuat daripada detektor berbasis tanah [Bender, 2009].

## Penemuan Gelombang Gravitasi pada Tahun 2016

Penemuan tentang gelombang gravitasi memang menggemparkan dunia ilmiah. Lantas apakah gelombang gravitasi itu? Gelombang gravitasi merupakan riak atau gangguan dalam lengkung alam semesta yang bergerak berbentuk gelombang menjauhi sumbernya. Dapat diibaratkan sebagai riak dalam kolam yang tenang seperti saat kita mencelupkan dan menarik tangan kita di dalamnya. Akan tetapi, tidak seperti riak dalam kolam yang nampak jelas, riak kosmos ini sangat misterius dan tidak seorang pun mendengar, melihat atau merasakannya dengan “indera keenam” sekalipun.

Walaupun beberapa istilah menyebut gelombang ini sebagai “kicauan” alam semesta, namun gelombang ini bukan gelombang suara yang membutuhkan medium untuk merambat. Gelombang ini dapat merambat dengan jarak miliaran tahun cahaya hingga sampai ke bumi tanpa perantara.

Pada teori gravitasi Einstein, gelombang gravitasi digambarkan sebagai kerut-kerut yang timbul akibat benda yang melewati “kain” ruang empat dimensi. Gelombang ini dihasilkan oleh segala macam obyek di alam semesta yang mengalami perubahan arah maupun kecepatan. Besarnya gelombang bervariasi tergantung obyeknya. Gelombang gravitasi membawa energi dalam bentuk radiasi gravitasi. Suatu gelombang yang terbentuk karena invariasi Lorentz dalam relativitas umum yang menjelaskan bahwa semua pergerakan interaksi fisik dibatasi kecepatan cahaya.



Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger

B. P. Abbott et al.<sup>1</sup>

(LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration)  
(Received 21 January 2016; published 11 February 2016)

On September 14, 2015 at 09:50:45 UTC the two detectors of the Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory simultaneously observed a transient gravitational-wave signal. The signal sweeps upwards in frequency from 35 to 250 Hz with a peak gravitational-wave strain of  $1.0 \times 10^{-21}$ ; it matches the waveform predicted by general relativity for the inspiral and merger of a pair of black holes and the ringdown of the resulting single black hole. The signal was observed with a matched-filter signal-to-noise ratio of 24 and a false alarm rate estimated to be less than 1 event per 203 000 years, equivalent to a significance greater than 5.1 $\sigma$ . The source lies at a luminosity distance of  $410^{+160}_{-180}$  Mpc corresponding to a redshift  $z = 0.09^{+0.022}_{-0.011}$ . In the source frame, the initial black hole masses are  $36^{+3}_{-4} M_{\odot}$  and  $29^{+4}_{-4} M_{\odot}$ , and the final black hole mass is  $62^{+9}_{-8} M_{\odot}$ , with  $3.0^{+0.5}_{-0.7} M_{\odot} c^2$  radiated in gravitational waves. All uncertainties define 90% credible intervals. These observations demonstrate the existence of binary stellar-mass black hole systems. This is the first direct detection of gravitational waves and the first observation of a binary black hole merger.

DOI: 10.1103/PhysRevLett.116.061102

I. INTRODUCTION

In 1916, the year after the final formulation of the field equations of general relativity, Albert Einstein predicted the existence of gravitational waves. He found that the linearized weak-field equations had wave solutions; transverse waves of spatial strain that travel at the speed of light, generated by time variations of the mass quadrupole moment of the source [1,2]. Einstein understood that gravitational-wave amplitudes would be remarkably small; moreover, until the Chapel Hill conference in 1957 there was significant debate about the physical reality of gravitational waves [3].

Also in 1916, Schwarzschild published a solution for the field equations [4] that was later understood to describe a black hole [5,6], and in 1963 Kerr generalized the solution to rotating black holes [7]. Starting in the 1970s theoretical work led to the understanding of black hole quasinormal modes [8–10], and in the 1990s higher-order post-Newtonian calculations [11] preceded extensive analytical studies of relativistic two-body dynamics [12,13]. These advances, together with numerical relativity breakthroughs in the past decade [14–16], have enabled modeling of binary black hole mergers and accurate predictions of their gravitational waveforms. While numerous black hole candidates have now been identified through electromagnetic observations [17–19], black hole mergers have not previously been observed.

<sup>1</sup>Full author list given at the end of the article.

Published by the American Physical Society under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 license. Further distribution of this work must maintain attribution to the author(s) and the published article's title, journal citation, and DOI.

The discovery of the binary pulsar system PSR B1913+16 by Hulse and Taylor [20] and subsequent observations of its energy loss by Taylor and Weisberg [21] demonstrated the existence of gravitational waves. This discovery, along with emerging astrophysical understanding [22], led to the recognition that direct observations of the amplitude and phase of gravitational waves would enable studies of additional relativistic systems and provide new tests of general relativity, especially in the dynamic strong-field regime.

Experiments to detect gravitational waves began with Weber and his resonant mass detectors in the 1960s [23], followed by an international network of cryogenic resonant detectors [24]. Interferometric detectors were first suggested in the early 1960s [25] and the 1970s [26]. A study of the noise and performance of such detectors [27], and further concepts to improve them [28], led to proposals for long-baseline broadband laser interferometers with the potential for significantly increased sensitivity [29–32]. By the early 2000s, a set of initial detectors was completed, including TAMA 300 in Japan, GEO 600 in Germany, the Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory (LIGO) in the United States, and Virgo in Italy. Combinations of these detectors made joint observations from 2002 through 2011, setting upper limits on a variety of gravitational-wave sources while evolving into a global network. In 2015, Advanced LIGO became the first of a significantly more sensitive network of advanced detectors to begin observations [33–36].

A century after the fundamental predictions of Einstein and Schwarzschild, we report the first direct detection of gravitational waves and the first direct observation of a binary black hole system merging to form a single black hole. Our observations provide unique access to the

Gambar 4.4. Laporan pertama penemuan gelombang gravitasi.

Namun sebaliknya, gelombang gravitasi tidak bisa terbentuk dengan teori gravitasi Newton yang menjelaskan bahwa interaksi fisik bergerak menggunakan kecepatan tidak terhingga. Sebelum pada akhirnya gelombang ini terdeteksi, sudah muncul bukti-bukti tidak langsung tentang keberadaannya. Sebagai

contoh, pengukuran sistem biner Hulse-Taylor yang menunjukkan jika gelombang gravitasi tidak hanya sekedar hipotesis.



**Gambar 4.5 Ilustrasi bintang neutron**

Gelombang gravitasi yang mampu terdeteksi diduga dari sistem bintang biner yang berupa katai putih, lubang hitam dan bintang neutron. Pada tahun 2016, beberapa pendeteksi gelombang gravitasi dibangun dan ada pula yang sudah beroperasi. Diantaranya yaitu *Advanced LIGO* yang berjalan pada bulan September 2015. Di Bulan Februari 2016, tim *LIGO* mengumumkan mereka telah berhasil mendeteksi gelombang gravitasi yang berasal dari proses menyatunya lubang hitam. Perlu diketahui bumi sendiri berputar mengelilingi matahari, kecepatan dan arahnya pun berbeda meski relatif konstan. Sehingga, bumi tempat kita berpijak ini juga menghasilkan gelombang gravitasi. Pada penemuan

terbaru, gelombang ini dihasilkan oleh 2 lubang hitam yang berukuran 36 dan 29 kali massa matahari.



**Gambar 4.6 Ilustrasi *black-hole* biner**

Kedua lubang tersebut telah berdekatan selama miliaran tahun dan semakin mendekat dari masa ke masa. Maknanya, kecepatan berputar satu sama lainnya terus berubah yang akhirnya menghasilkan gelombang gravitasi. Dua lubang hitam itu lalu “bersatu”

menjadi sebuah lubang hitam yang lebih besar dengan ukuran 62 kali massa matahari. Penyatuan tersebutlah yang memicu munculnya gelombang gravitasi. Bulan Februari 2016 menjadi tonggak sejarah bagi ilmuwan kosmologi. Setelah kurang lebih 100 tahun, prediksi Einstein mengenai adanya gelombang gravitasi akhirnya terbukti. Dalam makalah terkait, tim penelitian dari LIGO (*Laser Interferometer Gravitational Wave Observatory*) berhasil mendeteksi gelombang ini dari sumber sepasang lubang hitam yang bertumbukan. Lalu mengapa butuh waktu begitu lama untuk mencarinya?

Dalam ranah teori pun, gelombang gravitasi sangat kompleks untuk dimengerti. Padahal konsep teoretis sangat dibutuhkan untuk ranah eksperimen.

**Gambar 4.7 Sejarah penemuan gelombang gravitasi**  
(Sumber: <http://Sainspop/teori-teori Stephen Hawking>)

Tahun 1963, 4 dekade setelah teori Einstein dipublikasi, menjadi titik awal pencarian gelombang gravitasi.



Di ranah eksperimen, kesulitan utamanya adalah skala gelombang ini yang sangat kecil sehingga dibutuhkan alat yang sensitif dan teliti untuk

mendeteksinya. Bertahun-tahun beragam alat diciptakan untuk tujuan ini. Secara umum, alat pendeteksi gelombang gravitasi dibagi menjadi dua kategori, yaitu batang *resonansi* dan *interferometer*.

## Dua Tipe Detektor Gelombang Gravitasi

Percobaan untuk mendeteksi gelombang gravitasi dimulai oleh Weber (1960) menggunakan batang resonansi. Alat ini terdiri dari batang padat yang dapat beresonansi karena gelombang gravitasi. Osilasi dari batang diamplifikasi secara elektronik agar dapat membaca osilasi gravitasi yang kecil. Cara ini digunakan oleh peneliti lain di seluruh dunia. Namun, setelah bertahun-tahun tidak ada pendeteksian yang konsisten dan memuaskan. Sensitivitas alat tidak cukup untuk mendeteksi riak gelombang gravitasi yang terlalu kecil.

Selain menggunakan batang resonansi, cara lain adalah dengan *interferometer*. Alat ini terdiri dari laser yang disusun sedemikian rupa. Apabila gelombang gravitasi melewati alat ini, akan terbentuk beda fasa yang menghasilkan pola interferensi. *Interferometer* sendiri bukan barang baru. Michelson dan Morley pernah menggunakannya untuk mencari kecepatan absolut cahaya.



Gambar 4.8 Rainer Weiss

Ide menggunakan interferometer untuk mendeteksi gelombang ini dikembangkan juga oleh Weber walaupun sebelumnya juga diusulkan oleh Pirani (1956) atau

Gertsenshtein dan Pustovoit (1962). Weber sendiri memilih untuk mengabaikan *interferometer* dan fokus pada detektor batang resonansi. Walaupun kalah populer, *interferometer* diwacanakan lagi pada tahun 1970. Rainer Weiss dari MIT merancang desain *prototipe* serta studi teknis *interferometer* detektor gelombang gravitasi. Desain *prototipe* ini masih digunakan sampai sekarang. Namun sayang waktu itu Weiss tidak mendapat sokongan dana yang dapat membantu penelitiannya.

Rancangan Weiss menarik perhatian kelompok peneliti di Munich dan Glassgow. Dua kelompok ini kemudian mengembangkan detektor *interferometer*. Detektor *interferometer* terlihat semakin menjanjikan. Pada tahun 1983 kelompok Munich dan Glassgow, yang disusul Caltech dan MIT bergabung dalam proyek raksasa membangun observatorium *interferometer* gelombang gravitasi (*Laser Interferometer Gravitational Wave Observatory/L.I.G.O.*).

*LIGO* sendiri selesai baru dibangun pada tahun 2002 setelah sebelumnya terhambat masalah teknis dan pendanaan. Setelah lebih dari sedekade setelah beroperasi, *LIGO* akhirnya berhasil mendeteksi gelombang gravitasi untuk pertama kalinya pada tahun 2016. Temuan ini mengantarkan hadiah Nobel Fisika bagi Weiss beserta dua koleganya, Kip Thorne dan Barry Barish, sekaligus membuka cakrawala baru alam semesta.

## Prinsip Instrumentasi detektor Gelombang Gravitasi

*LIGO* adalah observatorium gelombang gravitasi terbesar di dunia dan keajaiban teknik presisi. Terdiri dari dua *interferometer laser* besar yang berjarak ribuan kilometer, *LIGO* mengeksplorasi sifat fisik cahaya dan ruang itu sendiri untuk mendeteksi dan memahami asal-usul gelombang gravitasi.

*LIGO* (dan detektor lain seperti itu) tidak seperti observatorium lainnya di Bumi. Seseorang diminta untuk menggambar sebuah observatorium dan kemungkinan mereka akan menggambar kubah teleskop putih berkilau yang bertengger di puncak gunung. Sebagai observatorium gelombang gravitasi, *LIGO* tidak memiliki kemiripan dengan ini sama sekali, seperti yang diilustrasikan foto udara *interferometer LIGO Livingston*.

Lebih dari sebuah observatorium, *LIGO* adalah percobaan fisika yang luar biasa pada skala dan kompleksitas beberapa akselerator partikel raksasa di dunia dan laboratorium fisika nuklir. Meskipun misinya adalah untuk mendeteksi gelombang gravitasi dari beberapa proses paling ganas dan energik di Semesta.

Data yang dikumpulkan *LIGO* mungkin memiliki efek luas pada banyak bidang fisika termasuk gravitasi, relativitas, astrofisika, kosmologi, fisika partikel, dan nuklir fisika. Namun demikian, karena "O" dalam *LIGO* adalah singkatan dari "*observatory*", di bawah ini kami menggambarkan perbedaannya dengan observatorium yang dibayangkan kebanyakan orang. Tiga hal



**Gambar 4.9 LIGO Livingston. Lengan yang Anda lihat sebenarnya adalah struktur beton yang melindungi tabung vakum, yang berada tepat di dalamnya. 'Selungkup' beton melindungi tabung vakum yang sangat penting dari kemungkinan kerusakan lingkungan. (sumber : Caltech / MIT / LIGO Lab)**

membedakan *LIGO* dari observatorium astronomi 'tradisional': *LIGO* buta, tidak bulat, dan detektor tunggal.

*LIGO* buta, seperti yang telah disebutkan di atas, tidak seperti teleskop optik atau radio. Alasan sederhana kenapa observatorium ini disebut sebagai *LIGO* buta, yang membedakan dengan observatorium lain yaitu, *LIGO* tidak melihat radiasi elektromagnetik (mis., Cahaya tampak, gelombang radio, gelombang mikro). walaupun gelombang gravitasi bukan bagian dari spektrum elektromagnetik, bukan berarti gelombang gravitasi tidak dapat dideteksi oleh *LIGO*, Mereka adalah

fenomena yang sama sekali berbeda. Faktanya, radiasi elektromagnetik sangat tidak penting bagi *LIGO* sehingga komponen detektornya sepenuhnya terisolasi dan terlindung dari dunia luar.

Karena *LIGO* tidak perlu mengumpulkan cahaya dari bintang, maka *LIGO* tidak dirancang berbentuk seperti cermin teleskop optik atau antena teleskop radio, yang keduanya memfokuskan radiasi EM untuk menghasilkan gambar, sehingga bentuk *LIGO* tidak bulat seperti observatorium lainnya. Lalu *LIGO* dibangun dengan Setiap detektor *LIGO*, yang terdiri dari dua tabung vakum baja selebar 1,2 m dengan panjang 4 km (2,5 mil) yang disusun dalam bentuk "L", dan ditutupi oleh tempat berlindung beton setinggi 10 kaki, 12 kaki yang melindungi tabung dari lingkungan.



**Gambar 4.10** Segmen yang terbuka dari tabung vakum *LIGO* Livingston. (sumber: Caltech / MIT / *LIGO* Lab) yang sangat penting dari kemungkinan kerusakan lingkungan. (sumber : Caltech / MIT / *LIGO* Lab)

Detektor *LIGO* tunggal tidak dapat mengkonfirmasi gelombang gravitasi sendiri. Sementara sebuah observatorium astronomi dapat berfungsi dan mengumpulkan data dengan baik sendiri (meskipun beberapa tidak, dengan pilihan), detektor gelombang gravitasi tunggal tidak dapat membuat

penemuan sendiri. Getaran lokal yang acak (sesuatu yang kita sebut "*noise*") dapat membuat sinyal yang terlihat seperti gelombang gravitasi. Jadi satu-satunya cara untuk memverifikasi deteksi gelombang gravitasi adalah beroperasi bersamaan dengan detektor lain.



**Gambar 4.11** Salah satu 'lengan' LIGO Hanford (tabung vakum berada di dalam penutup beton). "*Mid-station*" (setengah jalan ke ujung lengan) hampir tidak terlihat sejauh 2 km. (sumber: Kim Fetrow / Imageworks)

Ada kasus-kasus khusus di mana detektor gelombang gravitasi tunggal dapat membuat penemuan, tetapi masih membutuhkan bantuan dari komunitas astronomi elektromagnetik.

Sebagai contoh, sebuah pendeteksi *LIGO* dapat merasakan gelombang gravitasi dari *supernova* (bintang yang meledak).

Tetapi bahkan dalam kasus ini, sinyal elektromagnetik kebetulan dari beberapa jenis juga harus dibuat oleh sebuah observatorium astronomi (berbasis darat atau luar angkasa), memverifikasi deteksi.

## Tentang *aLIGO*

Saat membaca atau mendengar berita tentang *LIGO*, Anda mungkin bertanya-tanya mengapa kami sering menyebut instrumen sebagai "*LIGO Lanjutan*",

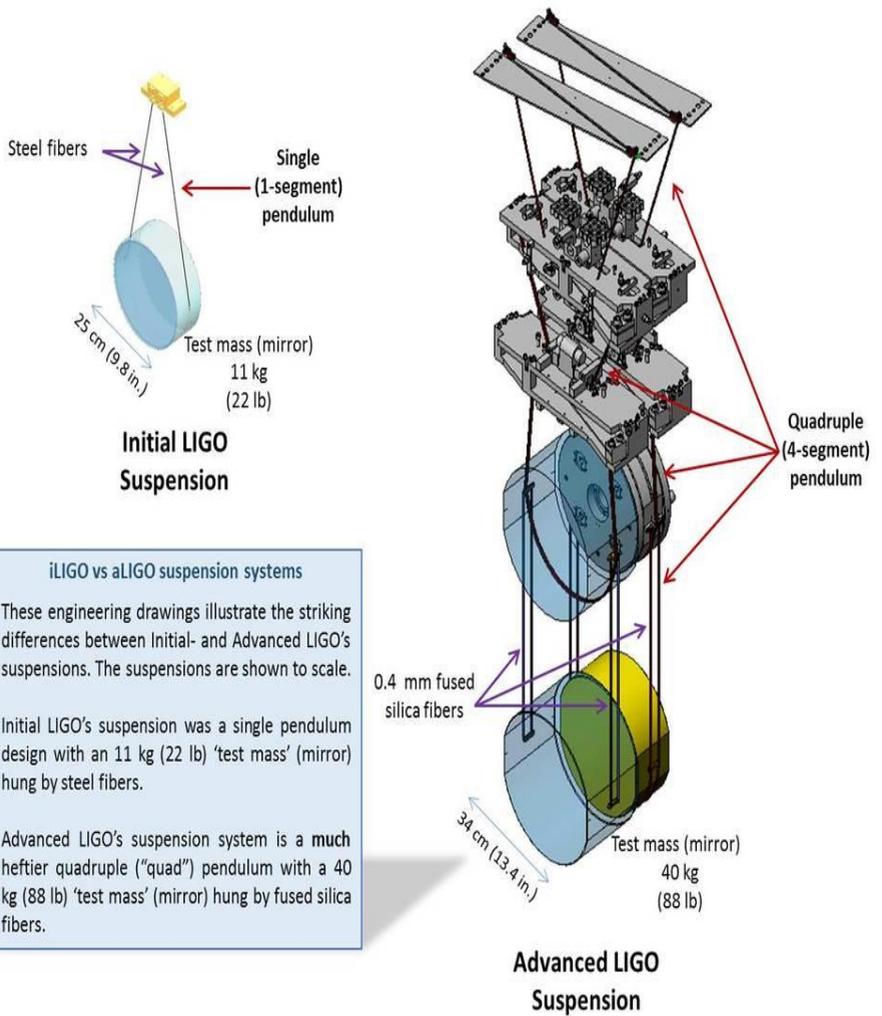
atau "*aLIGO*". *LIGO* sebenarnya sudah ada selama lebih dari 20 tahun, dan interferometer kami telah mengalami banyak perubahan dan peningkatan pada waktu itu. Faktanya, putaran pertama pengumpulan data *LIGO*, yang berlangsung antara tahun 2002 dan 2010, menggunakan apa yang kita sebut "*LIGO* Awal". Seperti namanya, *LIGO* awal mengacu pada versi pertama interferometer yang dibangun pada awal pencarian *LIGO* untuk mendeteksi gelombang gravitasi.

Ketika *LIGO* disetujui untuk didanai pada tahun 1990, dapat dipahami bahwa dibutuhkan waktu bertahun-tahun, bahkan puluhan tahun bagi observatorium untuk mencapai potensi penuhnya. Versi pertama interferometer *LIGO*, "Initial *LIGO*" (singkatnya *iLIGO*) tidak hanya akan secara aktif mendengarkan gelombang gravitasi, tetapi juga akan berfungsi sebagai testbed yang digunakan untuk menguji dan memacu penemuan teknologi yang lebih baik yang diperlukan untuk membuat *LIGO* mencapai potensi penuh.

Secara keseluruhan, *iLIGO* beroperasi selama 9 tahun tetapi tidak pernah mendeteksi gelombang gravitasi. Ini bukan hal yang tidak terduga, dan pelajaran yang didapat tentang bagaimana mengoperasikan, memelihara, dan meningkatkan salah satu alat pengukur teknologi paling tinggi di dunia, tidak terhitung. Konstruksi komponen yang ditingkatkan *LIGO* (*aLIGO*) mulai pada tahun 2008, dua tahun sebelum *iLIGO* pensiun. Tugas awal *LIGO* berakhir pada 2010, di mana pada saat itu dibongkar untuk memberi jalan bagi

detektor *LIGO* Lanjutan yang baru dan lebih baik. Konstruksi, persiapan, pemasangan, dan pengujian *aLIGO* memakan waktu 7 tahun (dari 2008 hingga 2015).

Gambar di bawah menggambarkan perbedaan antara *LIGO* Awal dan *LIGO* Lanjutan. Pada akhirnya, perubahan ini akan membuat *LIGO* Lanjutan 10 kali lebih sensitif daripada *LIGO* Awal.



**Gambar 4.13 Sistem suspensi iLIGO dan aLIGO(Sumber: LIGO)**

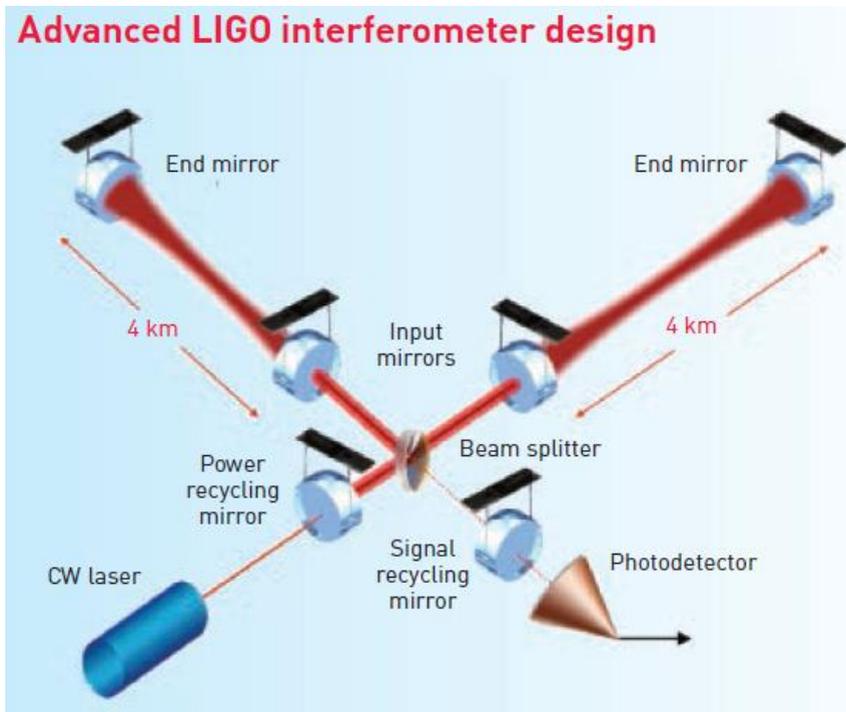
## Apa itu *Interferometer*?

*Interferometer* merupakan alat investigasi yang digunakan dalam banyak bidang sains dan teknik. Mereka disebut *interferometer* karena mereka bekerja dengan menggabungkan dua atau lebih sumber cahaya untuk menciptakan pola interferensi, yang dapat diukur dan dianalisis; karenanya '*Interfere-meter*'. Pola interferensi yang dihasilkan oleh interferometer berisi informasi tentang objek atau fenomena yang sedang dipelajari.

Mereka sering digunakan untuk melakukan pengukuran sangat kecil yang tidak dapat dicapai dengan cara lain. Inilah sebabnya mengapa mereka sangat kuat untuk mendeteksi gelombang gravitasi - *interferometer LIGO* dirancang untuk mengukur jarak 1 / 10.000 lebar proton.

Banyak digunakan hari ini, interferometer sebenarnya diciptakan pada akhir abad ke-19 oleh Albert Michelson. *Interferometer Michelson* digunakan pada tahun 1887 dalam "Eksperimen Michelson-Morley", yang bertujuan untuk membuktikan atau menyangkal keberadaan *Luminiferous Aether* - suatu zat yang pada saat itu dianggap menembus Semesta. Semua interferometer modern telah berevolusi dari yang pertama ini sejak itu menunjukkan bagaimana sifat-sifat cahaya dapat digunakan untuk membuat pengukuran terkecil. Penemuan laser telah memungkinkan *interferometer* untuk membuat pengukuran terkecil yang dapat dibayangkan, seperti yang disyaratkan oleh

LIGO. Hebatnya, struktur dasar interferometer LIGO sedikit berbeda dari *interferometer* yang dirancang Michelson lebih dari 125 tahun yang lalu, tetapi dengan beberapa fitur tambahan, dijelaskan dalam *Interferometer LIGO*.

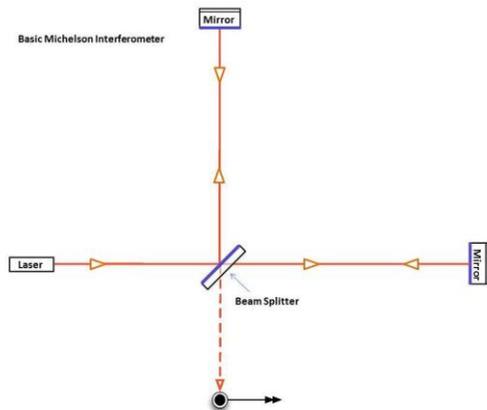


**Gambar 4.14** Skema dasar interferometer LIGO dengan gelombang gravitasi masuk yang digambarkan datang langsung dari atas detektor. (sumber: LIGO)

### Seperti apa *Interferometer* itu?

Karena aplikasinya yang luas, *interferometer* datang dalam berbagai bentuk dan ukuran. Mereka

digunakan untuk mengukur segala sesuatu dari variasi terkecil pada permukaan organisme mikroskopis, hingga struktur bentangan gas dan debu yang sangat besar di alam semesta yang jauh, dan sekarang, untuk mendeteksi gelombang gravitasi. Terlepas dari desain mereka yang berbeda dan berbagai cara penggunaannya, semua *interferometer* memiliki satu kesamaan: mereka memasang balok cahaya untuk menghasilkan pola interferensi. Konfigurasi dasar *interferometer laser Michelson* ditampilkan di sebelah kanan. Ini terdiri dari laser, pembagi berkas, serangkaian cermin, dan *photodetector* (titik hitam) yang merekam pola interferensi.

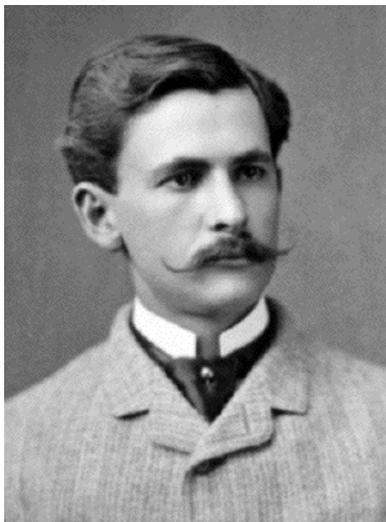


**Gambar 4.14** Layout dari interferometer laser Michelson dasar. (Sumber : LIGO)

### Cara kerja *LIGO* (*Interferometer*)

Dalam *interferometer Michelson*, sinar laser melewati *beam splitter* yang membelah balok tunggal asli

menjadi dua balok terpisah. Pembagi balok memungkinkan setengah dari cahaya untuk melewati, sambil memantulkan setengah lainnya 90 derajat dari yang pertama. Setiap balok kemudian bergerak turun lengan interferometer. Di ujung setiap lengan ada cermin.



**Gambar 4.15 Albert Abraham Michelson**

Cermin ini memantulkan setiap sinar ke belakang sepanjang jalur awalnya menuju pembagi berkas, di mana, sekarang datang dari arah yang berlawanan, kedua balok tersebut digabungkan kembali menjadi satu balok. Ketika mereka bertemu, ombak mereka saling mengganggu sebelum melakukan perjalanan ke *photodetector* yang mengukur kecerahan balok

yang direkombinasi saat kembali. *Interferometer LIGO* diatur sedemikian rupa, selama lengan tidak berubah panjang saat balok bergerak, ketika kedua balok bergabung kembali, gelombang cahayanya membatalkan satu sama lain (mengganggu secara destruktif) dan tidak ada cahaya mencapai *photodetector*.

Tetapi apa yang terjadi jika jarak yang ditempuh laser tidak berubah saat mereka melewati *interferometer*?

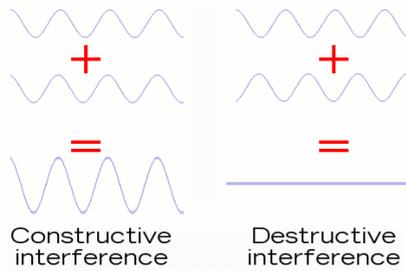
Jika satu lengan lebih panjang dari yang lain, satu sinar laser harus bergerak lebih jauh dari yang lain dan butuh lebih lama untuk kembali ke pembagi balok. Meskipun balok memasuki *inferometer* pada saat yang sama, mereka tidak kembali ke pembagi balok pada saat yang sama, sehingga gelombang cahaya mereka akan diimbangi ketika mereka bergabung kembali. Ini mengubah sifat gangguan yang mereka alami.

Alih-alih mengganggu secara total destruktif, sehingga tidak ada cahaya yang keluar dari *interferometer*, sedikit cahaya akan 'bocor' dan dilihat oleh fotografer. Jika lengan berubah panjang selama periode waktu tertentu (katakanlah dengan lewatnya gelombang gravitasi), pola cahaya yang keluar dari *interferometer* juga akan berubah seiring dengan pergerakan lengan.

Pada dasarnya, secercah cahaya muncul. Dalam *interferometer*, setiap perubahan intensitas cahaya menunjukkan bahwa sesuatu terjadi untuk mengubah jarak yang ditempuh oleh satu atau kedua sinar *laser*. Secara kritis, bentuk pola interferensi yang muncul dari interferometer selama periode waktu tertentu dapat digunakan untuk menghitung dengan tepat berapa banyak perubahan panjang yang terjadi selama periode tersebut. *LIGO* mencari karakteristik yang sangat spesifik (bagaimana pola interferensi berubah dari waktu ke waktu) untuk menentukan apakah telah menangkap gelombang gravitasi.

## Apa itu Pola Gangguan?

Untuk lebih memahami cara kerja *interferometer*, ada baiknya Anda memahami lebih lanjut tentang 'gangguan'. Jika Anda pernah melempar batu ke kolam atau kolam yang datar seperti kaca dan menyaksikan apa yang terjadi, Anda sudah tahu tentang gangguan. Ketika batu menghantam air, mereka menghasilkan gelombang konsentris yang menjauh dari titik masuk batu. Dan di mana dua atau lebih dari gelombang konsentris berpotongan, mereka saling mengganggu, titik persimpangan menjadi lebih besar atau lebih kecil atau sepenuhnya membatalkan satu sama lain. Pola yang terlihat terjadi ketika gelombang berpotongan membentuk pola "interferensi".



**Gambar 4.16** Ketika puncak dua gelombang bertemu, puncaknya bertambah. Ketika puncak dari satu gelombang memenuhi lembah yang lain, mereka membatalkan.

Prinsip-prinsip interferensi mudah dipahami. Gambar di bawah menunjukkan dua jenis interferensi spesifik: interferensi *konstruktif* total dan interferensi *destruktif* total. Dalam interferensi konstruktif total, ketika puncak satu gelombang bergabung dengan puncak gelombang lain, mereka menambahkan

bersama dan 'membangun' gelombang yang lebih besar.

Dalam gangguan *destruktif total*, puncak satu gelombang bertemu dengan lembah gelombang yang sama, dan mereka benar-benar membatalkan satu sama lain (mereka 'saling menghancurkan').

Di alam, puncak dan lembah dari satu gelombang tidak akan selalu dengan sempurna memenuhi puncak atau lembah dari gelombang lain seperti yang ditunjukkan oleh ilustrasi. Terlepas dari bagaimana mereka bergabung, ketinggian gelombang yang dihasilkan dari interferensi selalu sama dengan jumlah ketinggian gelombang penggabungan. Ketika gelombang tidak bertemu dengan sempurna, sebagian gangguan konstruktif atau *destruktif* terjadi. Animasi di atas menggambarkan efek ini.



**Gambar 4.17** Pola interferensi dalam air. "Gangguan" terjadi di daerah di mana gelombang melingkar yang mengembang dari berbagai sumber berpotongan. (sumber: Wikimedia

Jika Anda mengamati dengan seksama, Anda akan melihat bahwa gelombang hitam melewati berbagai ketinggian dari dua kali lebih tinggi dan dalam (di mana gangguan *konstruktif* total terjadi) menjadi datar (di mana gangguan *destruktif* total terjadi) ketika gelombang merah dan biru melewati 'satu sama lain (menggangu). Dalam contoh ini, gelombang hitam adalah pola interferensi. Perhatikan bagaimana ia terus berubah selama gelombang merah dan biru terus berinteraksi.

V  
PENGAMATAN CITRA  
BAYANGAN *BLACK*  
*HOLE*

## **Black Hole dari galaksi M87 gambar pertama dapat dilihat**

Astronom mengabadikan gambar pertama dari Lubang Hitam. Setidaknya ada 2 lubang hitam, satu di inti galaksi Bima Sakti, dan di galaksi Messier 87. Tetapi lubang hitam di tengah galaksi kita yang disebut



**Gambar 5.1 Messier 87**

*Sagittarius A* tidak menghasilkan gambar. Yang berhasil ada di tengah galaksi *Messier 87* Kolaborasi internasional menghadirkan

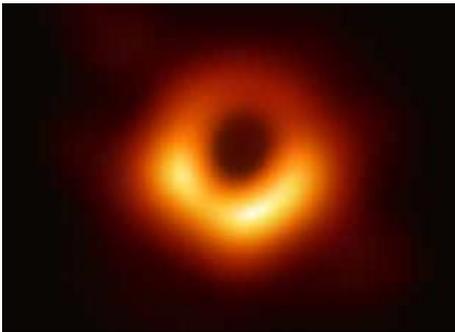
pengamatan pergeseran paradigma lubang hitam raksasa di jantung galaksi *Messier 87* Galaksi *Messier 87* atau dikenal dengan *Virgo A* atau *NGC 4486*

Adalah sebuah galaksi besar berbentuk *elips* di rasi bintang *Virgo*.

Diperkirakan disana terdapat 1 triliun bintang, dan belum termasuk jumlah planet. Lubang hitam disana mengeluarkan jet dari kedua kutub, ketika melemparkan materi sepanjang 5000 tahun cahaya. Ukuran galaksi M87 berbeda seperti galaksi *Bima Sakti*, dengan radius 60.000 tahun cahaya dan bentuk *elips*. Disana lebih sedikit kandungan debu galaksi dibanding galaksi kita dan galaksi memiliki bentuk elips lebih padat. Mengapa galaksi M87 yang diamati? Peneliti mengatakan disana

terdapat lubang hitam yang sangat besar. Dan menembakan aliran *jet* begitu jauh.

M87 disebut juga sebagai galaksi dengan inti yang aktif. Karena kecerahan yang tampak dari radiasi X-ray, radio dan panjang gelombang cahaya lain. Menjadi salah satu galaksi sangat besar memancarkan gelombang radio di salah sebuah *local group* galaksi atau kumpulan galaksi terdekat di wilayah nya. Disana terdapat 12 ribu kelompok bintang/*globular cluster*. Perbandingan galaksi Bima Sakti sekitar 150-200 *Globular Cluster*. Galaksi M87 menjadi salah satu target para astronom, serta menjadi objek sinyal radio paling besar. Di tengah galaksi terdapat sebuah lubang hitam atau kelas *Supermassive Black-Hole*. Gambar pertama diteliti tahun 2017 oleh teleskop *Event Horizon*. Tapi membutuhkan waktu sampai selesai pengambilan pada April 2019.



**Gambar 5.2 Bayangan lubang hitam**

Gambar di samping ini disebut Shadow of Black Hole, atau bayang lubang hitam. Tetapi bentuk lubang hitam sendiri tidak terlihat,

dipastikan berada di bagian tengah. Pada bagian ring Lubang hitam disana, terdapat gas akresi (lingkaran api yang berputar). Yang berputar dengan kecepatan 1000 km

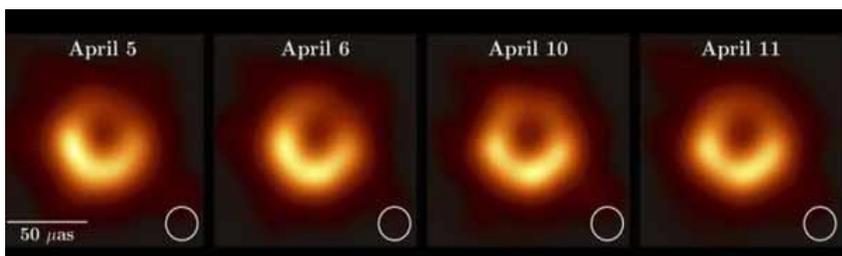
perdetik. Dan membentang dengan luas sejauh 0,39 tahun cahaya. Ada yang menyebut seperti lubang ekstrem atau berada di tepian ruang dan waktu. Pada batas tengah, dari batas lingkaran kuning ke arah hitam yang menuju lubang hitam. Disana yang disebut *Event Horizon* yang artinya semua akan tertarik masuk, baik cahaya pun tidak dapat keluar dari bulatan tengah berwarna hitam.

Sebesar apa lubang hitam pada gambar tersebut. Kira-kira memiliki jari jari 18-20 miliar km atau ring kuning tersebut mencapai 38 miliar km. Area berwarna kuning di lubang hitam yang tertangkap tersebut adalah area *Event Horizon* atau batas cakrawala, dimana benda apapun yang berada disekitarnya tidak dapat lepas dari kekuatan gravitasi lubang hitam. Jangan melihat ukuran lubang hitam saja, tapi bayangkan sebuah benda bulat dengan kepadatan sangat tinggi dan menjadi inti sebuah galaksi. Dengan area sangat luas dan akan menarik apapun masuk ke dalam.

*Event Horizon Telescope* (disingkat EHT) - adalah tipe ruang observasi teleskop radio dari delapan teleskop *array* dan bekerja bersama-sama dari teleskop yang ada di beberapa Negara Dirancang khusus untuk bekerja sama dan menangkap gambar lubang hitam. Membentuk ukuran teleskop raksasa seukuran lingkaran bumi. Bisa di bayangkan akresi dari cincin berwarna kuning, terlihat bergeser dari waktu ke waktu hanya dalam hitungan hari.

Salah satu bukti di luar angkasa adalah matematika yang tidak dapat dipahami oleh siapapun. Disanalah ilmu fisika dunia hancur, atau tidak berlaku lagi. Dimana di dalam cincin tersebut adalah sebuah singularitas, awalnya dipercaya bila semua akan terkompresi menjadi sebuah titik kecil tidak terhingga. Sekarang kita mengetahui teori relativitas umum belum lengkap. Jadi apa yang ada di tengah cincin tersebut, tidak ada yang tahu.

**Gambar 5.3 Tahapan pengambilan bayangan lubang hitam**  
(Sumber : Caltech/ MIT)



10 April 2019 dalam konferensi pers terkoordinasi di seluruh dunia, tim EHT mengungkapkan bahwa mereka berhasil, bukti visual langsung pertama dari lubang hitam *supermasif* dan bayangannya. Sebelumnya gambar Lubang Hitam tidak dapat dilihat secara langsung dengan teleskop biasa. Lubang hitam di tengah galaksi M87 berada 55 juta tahun cahaya dari Bumi dan memiliki massa 6,5 miliar kali Matahari.

**Gambar 5.4 Tim EHT**



EHT menghubungkan teleskop di seluruh dunia untuk membentuk teleskop *virtual* seukuran Bumi agar sensitivitas dan resolusi dapat ditingkatkan dan belum pernah dilakukan sebelumnya. Tujuannya membuat gambar lebih tajam dan lebih kuat dengan mengabungkan beberapa gambar dari teleskop berbeda tempat. EHT kolaborasi internasional selama bertahun-tahun, dan menawarkan para ilmuwan cara baru untuk mempelajari objek paling ekstrem di Semesta yang diprediksi oleh relativitas umum Einstein selama tahun seratus tahun.

"Kami telah mengambil gambar pertama dari *Black-Hole*," kata direktur proyek EHT Sheperd S. Doeleman dari *Center for Astrophysics* Harvard & Smithsonian. "Ini adalah prestasi ilmiah luar biasa yang dicapai oleh tim yang terdiri dari lebih dari 200 peneliti."

Benda kosmik yang luar biasa dengan massa sangat besar (Lubang Hitam) tetapi ukurannya sangat kompak. Kehadiran benda-benda ini mempengaruhi

lingkungan mereka dengan cara yang ekstrim, melengkungkan ruang waktu dan pemanasan akan terjadi pada materi yang berada di sekitarnya.

"Jika melihat bagian lebih dalam, seperti cakram gas bercahaya, kami berharap lubang hitam dapat menciptakan daerah gelap yang mirip dengan bayangan - sesuatu yang diprediksi relativitas umum Einstein yang belum pernah kita lihat sebelumnya," jelas ketua *EHT Science*. Council Heino Falcke dari Radboud University, Belanda. "Bayangan ini disebabkan oleh pembengkokan gravitasi dan penangkapan cahaya di daerah *Event Horizon*"

"Setelah kami yakin bahwa kami telah mencitrakan bayangan itu, dapat membandingkan pengamatan kami dengan model komputer yang mencakup fisika ruang yang di bengkok, materi yang sangat panas dan medan magnet yang kuat di sekitar lubang hitam. Banyak fitur gambar yang diamati cocok dengan pemahaman teoretis kami dengan sangat baik," kata Paul TP Ho, anggota Dewan EHT dan Direktur Observatorium Asia Timur.

Pengamatan EHT menggunakan teknik *interferometri baseline* yang sangat panjang (VLBI) dan menyinkronkan fasilitas teleskop di seluruh dunia serta memanfaatkan rotasi planet untuk membentuk satu teleskop ukuran Bumi yang sangat besar. Dan hanya mengamati panjang gelombang 1,3 mm. VLBI memungkinkan EHT untuk mencapai resolusi sudut 20 mikro-detik – cukup untuk membaca surat kabar di New

York dari kafe di Paris. Teleskop yang membantu lainnya adalah pusat observasi teleskop *ALMA*, *APEX*, *IRAM* 30-meter teleskop, James Clerk Maxwell Teleskop, Large Millimeter Teleskop Alfonso Serrano, *Submillimeter Array*, Submillimeter Teleskop, dan *South Pole Telescope*.



**Gambar 5.5 Observatorium Haystack MIT**

Tidak seperti gambar yang dibuat dalam bentuk animasi dan rekaan. Data berukuran 5 Petabyte data mentah dari teleskop digabungkan oleh superkomputer sangat khusus dari tim Institut Max Planck untuk Radio Astronomi dan Observatorium Haystack MIT. 5 PB setara 5000 TB, bila menggunakan *harddisk* 10TB maka pengumpulan data setara 500 unit *harddisk*. Data yang

didapat sebesar 5PB hanya dalam 2 minggu saja selama proses menangkap gelombang radio dari lubang hitam. Sampai pengolahan data dapat melihat seperti apa bentuk di sekitar Lubang Hitam yang sementara ini tidak ada yang dapat melihat.

## **Lubang Hitam Berwarna Kuning**

Penjelasan foto *Black Hole* berwarna kuning tidak seperti gambaran yang didapat. Teleskop radio dapat menangkap frekuensi yang ada di alam semesta. Lubang hitam juga mengeluarkan frekuensi, seperti *jet* atau semburan dari lubang hitam dapat diabadikan menggunakan teleskop radio. *Jet* yang keluar dari lubang hitam mengeluarkan frekuensi lebih rendah. Cahaya berwarna kuning tersebut adalah *emisi* radio yang tertangkap dengan frekuensi lebih tinggi. Ketika teleskop radio mengamati dari frekuensi tinggi dan semakin tinggi, maka muncul bagian *Event-Horizon* di sebuah *Black-Hole*.

## **Mengapa gambar yang didapat berwarna kuning?**

Lubang hitam benda yang sangat padat. Mirip seperti magnet yang sangat kuat, dan dikelilingi *Matter/materi* berbentuk *plasma*. *Plasma* adalah gas tapi bukan gas seperti oksigen, atau hidrogen. Di alam semesta terdapat beberapa materi dari padat, cair, gas dan terakhir *plasma*. *Plasma* seperti petir, terlihat ketika terjadi lompatan listrik yang sangat tinggi dari langit ke bumi. Plasma juga ada di produk konsumen seperti

lampu *neon* atau TV Plasma sampai pembangkit fusi nuklir menggunakan materi plasma yang amat sangat panas.

Plasma terbentuk dari media *elektrik netral* dari partikel positif dan negatif tapi tidak saling terkait dan terlihat berbentuk seperti gas. Ukuran cukup besar adalah matahari, ketika memancarkan suar atau muncul kilatan. Sebenarnya yang keluar adalah *plasma* dengan suhu sangat tinggi. *Plasma* tidak berbentuk diam, tapi di sisi *Black-Hole* maka plasma dapat stabil dan berbentuk lingkaran. Sebagai contoh lampu neon berisi gas, ketika dialirkan listrik maka magnet akan mengalir di dalam tabung lampu. Dan lampu terlihat menyala. Lubang hitam memiliki medan magnet yang sangat kuat, benda tersebut berputar dan mengeluarkan magnetik. Disekitar lubang hitam terdapat gas yang mengitari dan disebut akresi disk, dan gas terionisasi oleh medan magnet super dasyat tersebut muncul seperti bulatan/lingkaran.

Ketika gas terionisasi akan mengeluarkan frekuensi, dan frekuensi yang dihasilkan adalah frekuensi rendah. Teleskop radio dapat memisahkan untuk menangkap frekuensi yang dikeluarkan oleh plasma. Teleskop radio dalam proyek *Event Horizon* inilah yang menangkap plasma dari Lubang Hitam. Sehingga terbentuk gambar atau citra seperti gambar donat.

**Apakah lubang hitam berputar?**

Melihat gambar pertama lubang hitam secara langsung ini disebut *Shadow of Black Hole* ada bayang lubang hitam. Ada sisi gelap dan terang antara bagian atas dan bawah. Gambar tersebut menunjukkan plasma yang mengitari lubang hitam ikut berputar akibat putaran dari lubang hitam. Peneliti mengatakan gambar yang ditangkap tersebut adalah lubang hitam dengan putaran searah jarum jam. Berapa kecepatan putaran lubang hitam. Sementara tidak diketahui, ilmuwan kesulitan untuk menghitung karena semua yang ada disekitar lubang hitam terserap dan tidak dapat terdeteksi. Sementara ini, hanya diketahui lubang hitam di tengah galaksi berputar dan arah putaran saja yang diketahui oleh peneliti.

### **Mengapa di bagian dalam lebih gelap?**

Pada bagian dalam terlihat gambar sangat hitam. Tepat antara batas hitam dan kuning mungkin disebut sebagai di lingkaran *Event Horizon*, yang artinya kekuatan gravitasi tidak dapat dihindari lagi oleh apapun karena begitu kuat. Menjadi tempat dimana waktu dan ruang berhenti, atau tempat ketika tidak ada yang dapat pulang. Pancaran frekuensi radio juga menghilang di bagian tersebut, dan lebih ke dalam lagi atau tepatnya ditengah. Disanalah terletak lubang hitam, dan belum ada cara untuk melihat atau belum diketemukan cara untuk melihat bentuk dari lubang hitam sendiri.

Karena kekuatan gravitasi lubang hitam begitu kuatnya. Cahaya, frekuensi radio akan berbelok ketika

melintas, bahkan masuk kedalam dan tidak keluar lagi. Artinya dengan terbatasnya teknologi saat ini, tidak mampu melihat emisi apapun yang terlalu dekat dengan lubang hitam. Membuat sebuah lubang hitam tidak dapat terlihat bentuk, aktivitas atau ukurannya, sementara hanya dapat mendapatkan jejak yang ada sekeliling benda tersebut.

### **Citra Bayangan *Black-Hole***

Kita melihat dari dekat lubang hitam supermasif. diatur dengan latar belakang gas terang. lubang hitam adalah tarikan gravitasi besar yang membelokkan cahaya ke dalam cincin. namun ini bukan foto asli. tetapi rendering grafik komputer, interpretasi artistik dari apa yang tampak seperti lubang hitam. seratus tahun yang lalu, albert einstein menerbitkan teorinya tentang relativitas umum. pada tahun-tahun sejak itu, para ilmuwan telah memberikan banyak bukti untuk mendukungnya. tetapi satu hal yang diprediksi dari teori ini, (*black hole*), masih belum diobservasi secara langsung.



**Gambar 5.6 Katie Bouman**

“Meskipun kami memiliki beberapa ide seperti apa lubang hitam itu, kami belum pernah benar-benar mengambil foto sebelumnya. Namun Anda mungkin terkejut mengetahui bahwa hal itu akan segera berubah” ucap Bouman. Kita mungkin akan melihat foto pertama tentang lubang hitam dalam beberapa tahun mendatang. Mendapatkan gambar pertama ini akan datang ke tim ilmuwan internasional teleskop seukuran bumi dan suatu algoritma yang menyusun gambar akhir. Penelitiannya dilakukan di laboratorium sains komputer yang berfungsi membuat komputer melihat melalui gambar, hari ini dia akan menunjukkan kepada kita, bagaimana dia dapat berkontribusi pada proyek yang menarik ini. Jika Anda melewati cahaya kota yang terang malam ini, Anda mungkin cukup beruntung untuk melihat pemandangan yang menakjubkan dari galaksi Bimasaktidan jika Anda dapat memperbesar jutaan

bintang masa lalu 26000 tahun cahaya menuju jantung *milky way* spiral.

Kita akhirnya akan mencapai sekelompok bintang tepat di tengah. Mengintip dari balik debu galaksi dengan teleskop inframerah. Astronom telah menyaksikan bintang-bintang ini selama 16 tahun, tetapi yang tidak mereka lihat itulah yang paling spektakuler. Bintang-bintang ini tampaknya mengorbit objek yang tak terlihat dengan melacak jejak bintang-bintang ini. Astronom telah menyimpulkan bahwa satu-satunya hal kecil dan cukup berat untuk menyebabkan gerakan ini adalah lubang hitam supermasif.

Sebuah objek yang sangat padat sehingga menyedot apa pun yang menjelajah terlalu dekat bahkan cahaya. Tetapi apa yang terjadi jika kita di sini memperbesar lebih jauh? apakah mungkin melihat sesuatu yang menurut definisi, tidak mungkin untuk dilihat? baik ternyata jika kita memperbesar pada panjang gelombang radio. Kita akan mengharapkan untuk melihat cincin cahaya yang disebabkan oleh lensa gravitasi plasma panas *zip* di sekitar lubang hitam. Kata lain, lubang hitam membentuk bayangan pada latar belakang material terang ini, mengukir bidang kegelapan.

Cincin cerah ini mengungkapkan lubang hitam adalah Horizon Peristiwa di mana tarikan gravitasi menjadi sangat besar sehingga bahkan cahaya pun tidak bisa lepas. Pernyataan Einstein memprediksi ukuran dan bentuk cincin ini, jadi memotret nya tidak hanya akan

sangat keren, itu juga akan membantu untuk memverifikasi bahwa persamaan ini bertahan dalam kondisi ekstrim di sekitar lubang hitam. Namun lubang hitam ini begitu jauh dari kita, bahwa dari bumi, cincin ini tampak sangat kecil dengan ukuran yang sama dengan kita sebagai jeruk di permukaan bulan, yang membuat pengambilan gambar menjadi sangat sulit. Baik itu semua turun ke persamaan sederhana karena difraksi fenomenal.

Ada batas-batas fundamental untuk objek terkecil yang mungkin bisa kita lihat. Persamaan yang mengatur ini mengatakan bahwa untuk melihat yang kecil dan lebih kecil, kita perlu membuat teleskop kita lebih besar dan lebih besar, tetapi dengan teleskop optik paling kuat di bumi ini, kita bahkan tidak bisa mendekati resolusi yang diperlukan untuk gambar di permukaan bulan. Sebenarnya di sini adalah bagaimana salah satu gambar tertinggi, bahkan diambil dari bulan dari bumi itu berisi sekitar 13000 piksel, dan setiap piksel akan berisi lebih dari 1,5 juta jeruk. jadi seberapa besar teleskop yang kita butuhkan agar permukaan bulan dan dengan memperluas lubang hitam kita?

Jika kita dapat membangun teleskop seukuran bumi ini, kita bisa mulai membuat cincin cahaya yang khas yang menunjukkan cakrawala peristiwa lubang hitam. Meskipun gambar ini tidak akan berisi semua detail yang kita lihat dalam rendering grafik komputer, itu akan memungkinkan kita untuk aman melihat sekilas pertama dari lingkungan langsung di sekitar lubang

hitam namun seperti yang anda bayangkan membangun teleskop antena tunggal ukuran bumi tidak mungkin. Tetapi kata-kata terkenal Mick Jagger "Anda tidak selalu bisa mendapatkan yang anda inginkan. Tetapi jika Anda mencoba, kadang-kadang anda mungkin mendapatkan yang Anda butuhkan". dan dengan menghubungkan teleskop dari seluruh dunia sebuah kolaborasi internasional yang disebut Teleskop Horizon peristiwa menciptakan teleskop komputasi seukuran bumi yang mampu menyelesaikan struktur pada skala lubang hitam bahkan horizon.

Jaringan teleskop ini dijadwalkan untuk mengambil gambar lubang hitam pertamanya tahun depan. Setiap teleskop di jaringan di seluruh dunia bekerja bersama. Terkait melalui waktu yang tepat dari jam atom, tim peneliti di setiap situs membekukan cahaya dengan mengumpulkan ribuan *terabyte* data.

Data ini kemudian diproses di laboratorium di sini di Massachusetts. jadi bagaimana ini bekerja? ingat baik-baik jika kita ingin melihat lubang hitam di pusat galaksi kita, kita perlu membuat teleskop ukuran bumi yang luar biasa besar ini? jadi untuk sesaat mari kita berpura-pura kita bisa membangun teleskop seukuran bumi. ini akan sedikit seperti memutar ini akan sedikit seperti mengubah bumi menjadi bola disko berputar raksasa yang masing-masing cermin akan mengumpulkan cahaya yang kemudian kita bisa gabungkan bersama untuk membuat gambar. Namun sekarang katakanlah kita menghapus beberapa cermin itu sehingga hanya

beberapa yang tersisa. “Kami masih akan mencoba menggabungkan informasi ini bersama-sama, tetapi sekarang ada banyak lubang” ucap Bouman.

Cermin yang tersisa ini mewakili lokasi di mana kita memiliki teleskop ini adalah jumlah pengukuran yang sangat kecil untuk membuat gambar, tetapi meskipun kami hanya mengumpulkan cahaya di beberapa lokasi teleskop saat bumi berputar. Kita bisa melihat pengukuran baru lainnya. Dengan kata lain, ketika bola disko berputar, cermin-cermin itu mengubah lokasi dan kita dapat mengamati bagian-bagian berbeda dari gambar algoritma pencitraan yang kami kembangkan mengisi celah yang hilang dari bola disko, untuk merekonstruksi gambar lubang hitam yang mendasarinya. jika kita memiliki teleskop yang terletak di mana-mana di dunia. dengan kata lain, seluruh bola disko ini akan sepele. Namun kami hanya melihat beberapa sampel, dan untuk alasan itu, ada jumlah gambar tak terbatas yang sangat konsisten dengan pengukuran teleskop kami.

Namun, tidak semua gambar dibuat sama dengan beberapa dari gambar-gambar itu lebih mirip dengan apa yang kita pikirkan sebagai gambar daripada yang lain dan sebagainya. Peran bouman dalam membantu mengambil gambar pertama dari lubang hitam adalah merancang algoritma yang menemukan gambar paling masuk akal yang juga sesuai dengan pengukuran teleskop seperti halnya perancang sketsa forensik menggunakan deskripsi terbatas pada

potongan-potongan yang ada di gambar menggunakan pengetahuan mereka tentang struktur wajah algoritma pencitraan, ia (KatieBouman) mengembangkan teleskop terbatas kami untuk membimbing kita ke gambar yang juga terlihat seperti barang-barang di alam semesta kita.

Menggunakan algoritma ini, kami dapat menyatukan gambar dari ruang ini data yang berisik. Jadi dia menunjukkan kepada kita rekonstruksi sampel dilakukan menggunakan data simulasi ketika kita berpura-pura mengarahkan teleskop kita ke lubang hitam di pusat galaksi kita. Meskipun ini hanya simulasi, rekonstruksi seperti ini memberi kita harapan bahwa kita akan segera dapat mengambil gambar pertama dari *Black Holedan* menentukan ukuran cincinnya.

“Karena ada jumlah tak terbatas dari gambar yang mungkin menjelaskan dengan sempurna pengukuran teleskop kami, kami harus memilih di antara mereka di suatu tempat, kami melakukan ini dengan peringkat gambar”. Ucap mahasiswi MIT ini.

Berdasarkan kemungkinan mereka menjadi gambar lubang hitam dan kemudian memilih yang kemungkinan besar, tetapi ketika datang ke gambar, dari lubang hitam, kita berpose dengan teka-teki nyata kita tidak pernah melihat lubang hitam sebelumnya.

Dalam hal itu, apa yang kemungkinan menjadi citra lubang hitam, dan yang harus kita asumsikan tentang struktur lubang belakang? kita bisa mencoba menggunakan satu gambar dari simulasi yang telah kita lakukan seperti gambar lubang hitam dari *“Interstellar”*.

tetapi jika kita melakukan ini, itu dapat menyebabkan beberapa masalah serius, apa yang akan terjadi jika teori-teori einstein tidak berlaku? Jika kita menggunakan persamaan einstein terlalu banyak ke dalam algoritma kita, kita hanya akan melihat apa yang kita harapkan untuk dilihat. Salah satu cara kita dapat mencoba untuk menerapkan fitur gambar yang berbeda adalah dengan menggunakan potongan-potongan gambar yang ada. "Jadi kami mengambil banyak koleksi gambar dan kami memecahnya menjadi patch gambar kecil mereka" Ucap Katie Bouman. Kita kemudian dapat memperlakukan setiap patch gambar sedikit seperti potongan *puzzle*. "Dan kami menggunakan potongan *puzzle* yang biasa dilihat untuk menyatukan gambar yang juga sesuai dengan pengukuran teleskop kami". Ucap Bouman. Berbagai jenis gambar memiliki set potongan *puzzle* yang sangat khas.

Jika Anda keluar malam ini Anda mungkin melihat gugus dan *konstelasi virgo* dan jika Anda memperbesar ke arah kepala virgo sebenarnya ada galaksi elips raksasa yang disebut M87 dan 55 juta tahun cahaya jauhnya dan jika kita bisa memperbesar sangat jauh ke arah pusat dari m87 dengan teleskop radio UAD kita akan melihat *jet-jet* ini, memukul-mukul lengan jet dan apa yang dikatakan jet ini kepada kita, inilah inti dari hal itu. Inilah yang disebut dengan *Supermassive Black Hole*.

Jadi tempat di mana tidak ada yang bisa lolos bahkan cahaya dan meskipun kita belum pernah bisa

melihat lubang hitam ini, kita melihat efeknya di dalam jet. “Dan apa yang kami coba lakukan dengan teleskop bahkan cakrawala adalah melihat sesuatu sekecil titik kecil di sana. Kami telah mencoba untuk membayangkan inti dari lubang hitam, area langsung di sekitar lubang hitam itu. Kami percaya bahwa jika kami memperbesar tampilan akan melihat cahaya yang dicelupkan ke sekitar dan menekuk karena tarikan gravitasi besar dari lubang hitam” Ucap Katie Bouman. Jadi jika Einstein benar dengan relativitas umum, cahaya ini akan menekuk dirinya menjadi sebuah cincin, dalam hal ini Anda akan memiliki titik gelap di tengah. daerah paling terang dari cincin itu disebut cincin foton, di mana anda memiliki foton yang pada dasarnya mengorbit terus-menerus atau dekat orbit kontinu. Tapi apa pun area hitam di sini disebut bayangan lubang hitam. Inilah yang disebut sebagai bayangan lubang hitam dalam simulasi turbulen. Bayangan lubang hitam itu memberi tahu kita tentang relativitas umum melalui ukuran dan bentuknya. Jadi kita akan mengharapkan putaran dan massa tertentu yang akan menentukan seperti apa lubang hitam itu.

## DAFTAR PUSTAKA

- Abbott, B. P., *et al* (2016). Observation of Gravitational Wave from a Binary Black Hole Merger. *Physical Review Letters*, 116(6).
- Anugraha, R. 2005. *Pengantar Teori Relativitas dan Kosmologi*. Yogyakarta: Gajah Mada University Press.
- Chalmers, A.F. (1986). The heuristic role of Maxwell's mechanical model of electromagnetic phenomena. *Studies in History and Philosophy of Science Part A*, 17(4), 415–427. doi:10.1016/0039-3681(86)90002-6
- Ducheyne, S. (2009). Understanding (in) Newton's argument for universal gravitation. *Journal for General Philosophy of Science*, 40, 227–258.
- Ducheyne, S. (2011). Newton on action at a distance and the cause of gravity. *Studies in History and Philosophy of Science Part A*, 42(1), 154–159. doi:10.1016/j.shpsa.2010.11.003
- Elton, J. (2009). A Light to Lighten our Darkness: Lighthouse Optics and the Later Development of Fresnel's Revolutionary Refracting Lens 1780–1900. *The International Journal for the History of Engineering & Technology*, 79(2), 183–244. doi:10.1179/175812109x449612
- Gingerich, O. (1975). 10.9. The origins of Kepler's Third Law. *Vistas in Astronomy*, 18, 595–601. doi:10.1016/0083-6656(75)90141-5

- Harper, W. (2007). Newton's Methodology and Mercury's Perihelion Before and After Einstein. *Philosophy of Science*, 74(5), 932–942. doi:10.1086/525634
- Hidayat, T. (2010). *Teori Relativitas Einstein Sebuah Pengantar*. Bandung: PenerbitITBpp.247-287.
- Hubbell, J. G. dan Smith, R. W (1992). – Neptune in America –Negotiating a Discovery-History of *Astronomy Journal* V.23, NO. 4/NOV, P.261.
- Jacob D. Bekensteint. (1972). *Black-Hole and Entropy*. *Journal Physical review*. 7(8). 1.
- Kenneth Krane. (1992). *Fisika Modern*. Jakarta: UI Press
- Michelson, A.A. 1881. The relative motion of the Earth and of the luminiferous ether *Am J Sci* August 1881 Series 3 Vol. 22:120-129
- Newton, I. (1999 [1726]). *The principia, mathematical principles of natural philosophy*(I.B. Cohen, A. Whitman, Trans.). Berkeley: University of California Press.
- Ohanian, H.C. 1976. *Gravitation and Space Time*. New York: W.W. Norton & Company.
- Grøn, Ø danHervik, S. 2007. *Einstein's General Theory of Relativity: With Modern Applications in Cosmology*.Spreinger
- Park, R. S., Folkner, W. M., Konopliv, A. S., Williams, J. G., Smith, D. E., & Zuber, M. T. (2017). Precession of Mercury's Perihelion from Ranging to theMESSENGERSpacecraft. *The Astronomical Journal*, 153(3), 121. doi:10.3847/1538-3881/aa5be2

- Pourciau, B. (2007). Force, deflection, and time: Proposition VI of Newton's Principia. *Historia Mathematica*, 34(2), 140–172. doi:10.1016/j.hm.2006.08.005
- R. Adler, M. Bazin, and M. Schiffer. (1975). *Introduction to General Relativity*. 2nd ed., McGraw-Hill, New York
- Ring, E. F. J. (2000). The discovery of infrared radiation in 1800. *The Imaging Science Journal*, 48(1), 1–8. doi:10.1080/13682199.2000.11784339
- Russel, B. 2006. *Teori Relativitas Einstein*. Yogyakarta: Pustaka Pelajar.
- Schliesser, E. (2011). Newton's Challenge to Philosophy: A Programmatic Essay. *HOPOS: The Journal of the International Society for the History of Philosophy of Science*, 1(1), 101–128. doi:10.1086/658906
- Secret, N. J., Satyapal, S., Gliozzi, M., Cheung, C. C., Seth, A. C., and T. Böker. (2012). "The Chandra view of NGC 4178: The lowest mass black hole in a bulgeless disk galaxy?" *ApJ*, 753, 38.
- Smith, G. E. (1998). Newton's study of fluid mechanics. *International Journal of Engineering Science*, 36(12-14), 1377–1390. doi:10.1016/s0020-7225(98)00038-x
- S.W. Hawking,; Penrose, R. (1970). "The Singularities of Gravitational Collapse and Cosmology". *Proc. Royal Soc. A*. **314** (1519): 529–548.

- S.W. Hawking. (1975). "Particle Creation by Black Holes". *Commun. Math. Phys.* **43** (1975): 199-220.
- Thorne, K. (1987). "Gravitational Radiation". in *Three hundred years of gravitation*. ed. Hawking, S., Israel, W. Cambridge: Cambridge University Press, pp.330-458.
- Thrower, N.J.W. (1969). Edmond halley as a thematic geo-cartographer1. *Annals of the Association of American Geographers*, 59(4), 652–676. doi:10.1111/j.1467-8306.1969.tb01805.x
- Weinberg, Steven. 1972. *Gravitation and Cosmology: Principles and Applications of The General Theory Relativity*. USA: John Wiley & Sons.
- Wospakrik, Hans J. 1978. *Berkenalan dengan Teori Kerelatifan Umum Einstein & Biografi Albert Einstein*. Bandung: ITB.
- Ligo Caltech. (2018). Black Hole. (<https://www.ligo.caltech.edu/mit/video/ligo2018/12/03black-hole>.) diakses pada tanggal (20 juni 2020)
- Ligo Caltech. (2018). Gravitational Waves. (<https://www.ligo.caltech.edu/page/gravitational-waves>.) Diakses pada tanggal (20 juni 2020)
- David Darling. (2017). Reissner Nordstrom\_black\_hole ([http://www.daviddarling.info/encyclopedia/R/Reissner/Nordstrom\\_black\\_hole.html](http://www.daviddarling.info/encyclopedia/R/Reissner/Nordstrom_black_hole.html)) Diakses pada tanggal (20 juni 2020)
- David Darling. (2017). Schwarzschild\_black\_hole (<http://www.daviddarling.info/encyclopedia/S/Sch>

- warzschild\_black\_hole.html) Diakses pada tanggal 21 juni 2020
- David Darling. (2017). event\_horizon ([http://www.daviddarling.info/encyclopedia/E/event\\_horizon.html](http://www.daviddarling.info/encyclopedia/E/event_horizon.html)) Diakses pada tanggal 21 juni 2020
- David Darling. (2017). supermassive\_black\_hole [http://www.daviddarling.info/encyclopedia/S/supermassive\\_black\\_hole.html](http://www.daviddarling.info/encyclopedia/S/supermassive_black_hole.html). Diakses pada tanggal 21 juni 2020
- No Name. (2017) BABII Dasar Teori Relativitas Umum (file:///C:/Users/Hp/Downloads/BABII/DASAR/TEORI//Relativitas/Umum/Einstein.pdf) diakses pada tanggal 18 juni 2020
- Ligo Caltech. (2018). Interferometer. (<https://www.ligo.caltech.edu/page/ligo-gw-interferometer>) Diakses pada tanggal 18 juni 2020
- Ligo Caltech. (2018). What Is Ligo. (<https://www.ligo.caltech.edu/page/what-is-ligo>) Diakses pada tanggal 19 juni 2020
- Ligo Caltech. (2018). What Is Interferometer. (<https://www.ligo.caltech.edu/page/what-is-interferometer>) Diakses pada tanggal 19 juni 2020
- Sains Pop. (2016). Teori Stephen Hawking. (<https://sainspop.com/teori-teori-stephen-hawking/>) Diakses pada tanggal 18 juni 2020



**Aqsa Brilianza**, dilahirkan di Kutabuloh II, pada 26 september 1998. Anak pertama dari 3 bersaudara dari pasangan Irwadi dan Haslinda. Setelah melewati jenjang pendidikan, SD Teladan Kutabuloh II, MTs Al-Munjiya, dan SMAN Unggul Aceh Selatan, sekarang sedang menempuh perkuliahan di UIN Ar-Raniry, Pendidikan fisika angkatan 2016. Selain menggemari fisika, juga menggemari ilmu-ilmu luar angkasa, seperti ilmu kosmologi. Mahasiswa yang akrab dipanggil Aqsa ini, telah menggemari ilmu yang berbau luar angkasa sejak kelas 6 SD. Selain belajar dikampus, ia juga seorang Asisten Laboratorium Pendidikan Fisika yang telah bergabung sejak 2017.



**Misbahul Jannah, M.Pd., Ph.D** dilahirkan di Pidie Jaya, Aceh pada 04 Maret 1982. Penulis adalah Dosen Tetap di Fakultas Tarbiyah dan Keguruan UIN Ar-Raniry (2005-sekarang). Selama menyelesaikan program Doktor di UKM Malaysia, penulis pernah bekerja sebagai *Graduate Research Assistant* (GRA) (2011-2013) dan juga pernah menjadi fasilitator STEM (*Science Technology Engineering and Mathematics*) bidang energi dan robotic untuk mengajar guru-guru, mahasiswa dan siswa di Sekolah Kebangsaan di Malaysia dan Kamboja (2013-2016). Sejak 2009 sampai saat ini, penulis rutin melakukan riset, menulis artikel dan buku yang diterbitkan baik nasional maupun internasional. Tulisan tulisannya

sebagian besar membahas tentang pembelajaran Sains, pendidikan lingkungan, pengembangan modul dan STEM. Penulis juga merupakan salah seorang reviewer di beberapa jurnal dan reviewer Nasional Litapdimas.



**Dr. Abdullah Mujahid Hamdan, M.Sc.** lahir di Sinjai, Sulawesi Selatan pada 13 Desember 1989. Pada tahun 2018, penggemar matematika ini menyelesaikan disertasi dengan judul *Magnetic Properties of Nickel Hyperaccumulating Plants from Ultramafic Region*. Sejak tahun 2014 penulis telah aktif menjadi pengajar di UIN Ar-Raniniry Banda Aceh. Beberapa mata kuliah yang diampu adalah Fisika Matematika, Fisika Modern, Matriks dan Ruang Vektor, Fisika Dasar, Matematika Rekayasa, Fisika Statistik, Fisika Kuantum dan Listrik-Magnet. Saat ini penulis juga masih aktif melakukan riset yang berkaitan dengan magnetisme lingkungan.

Pengetahuan diharapkan dapat menjadi salah satu pilar yang meresap dalam kehidupan beragama dalam tingkat yang lebih luas dan dalam. Menurut hemat kami, kosmologi dan astrofisika sangat dekat bahkan berdampingan dengan nilai-nilai religius kita sebagai manusia. Kosmologi dan astrofisika, bahkan secara eksplisit disebutkan dalam teks kitab-kitab suci agama yang ada di Indonesia. Itulah sebabnya, mengapa pengetahuan dasar ini harus diperkenalkan lebih luas pada masyarakat di berbagai tingkatan. Buku ini adalah secuil karya untuk menyemarakkan pengetahuan negeri. Kami berharap pengetahuan populer terhadap teori-teori fundamental fisika bukan menjadi sesuatu yang asing. Buku ini diharapkan menjadi api kecil untuk memantik gelombang eforia pengetahuan di dalam negeri. Besar harapan, kami mendapat masukan dan saran dari pembaca sekalian, demi penyempurnaan tulisan ini. Tulisan ini adalah hasil penelitian yang dilakukan oleh penulis dalam tugas untuk memenuhi kurikulum di Pendidikan Fisika UIN Ar-Raniry Banda Aceh.