

ASTRONOMI

Eksistensi Lubang Hitam

Dari Persamaan Matematis Hingga Inti Galaksi

Oleh

A. Faturahman | Pussainsa
LAPAN

Lubang hitam dipandang sebagai salah satu objek yang paling menarik dan misterius di alam semesta, khususnya bagi para fisikawan. Sampai saat ini masih banyak teka-teki yang menyelimutinya. Para ilmuwan pun tidak berhenti berusaha menguak misteri lubang hitam ini. Meskipun istilah lubang hitam sudah sering terdengar, tetapi bagi para ilmuwan sendiri terdapat beberapa definisi yang berkaitan dengannya. Secara umum, kita dapat mendefinisikan istilah lubang hitam menjadi tiga kategori, yaitu lubang hitam matematis, lubang hitam fisis, dan lubang hitam astrofisis.

Lubang hitam matematis didefinisikan sebagai solusi vakum persamaan medan Einstein dari sebuah objek titik, dengan massa objek tersebut terkonsentrasi secara penuh di pusatnya, disebut sebagai titik singularitas. Titik singularitas didefinisikan sebagai titik dengan kerapatan massa tak hingga. Objek tersebut dikelilingi batas yang disebut sebagai cakrawala peristiwa (*event horizon*). Cakrawala peristiwa membatasi 'dunia luar' dengan lubang hitam, 'komunikasi' dalam bentuk apapun tidak bisa melewati cakrawala peristiwa ini. Oleh karena itu, pengamat dari luar tidak akan bisa mengamati titik singularitas. Selain itu, telah dibuktikan bahwa objek semacam ini hanya memiliki tiga



Gambar 1. Gambar Lubang Hitam Skala Horizon Pertama (Sumber: apod.nasa.gov oleh *Event Horizon Telescope Collaboration*)

parameter saja yaitu massa, momentum sudut (*spin*), dan muatan.

Lubang hitam fisis didefinisikan sebagai objek dengan seluruh massa dan muatannya berada di dalam cakrawala peristiwa tanpa memperhatikan distribusi materi tersebut di dalamnya. Teorema Birkhoff memastikan, orang yang berada di luar cakrawala peristiwa tidak akan bisa membedakan, apakah massa dan muatan objek tersebut terkonsentrasi pada titik singularitas atau terdistribusi di dalam cakrawala peristiwa. Oleh karena itu, lubang hitam fisis belum tentu merupakan lubang hitam matematis karena mungkin saja lubang hitam fisis tidak memiliki titik singularitas di dalamnya. Definisi yang terakhir, lubang hitam astrofisis merupakan lubang hitam yang terbentuk akibat proses

astrofisis di alam semesta. Proses astrofisis yang memungkinkan untuk terbentuknya lubang hitam ini adalah peristiwa keruntuhan gravitasi (*gravitational collapse*). Keruntuhan gravitasi merupakan peristiwa pada saat massa suatu objek terkonsentrasi dalam suatu wilayah kecil sehingga objek tersebut tidak dapat menahan kekuatan gaya gravitasinya sendiri, bahkan cahaya di sekitarnya pun tidak bisa lepas.

Adanya objek yang memiliki gravitasi sangat kuat sebenarnya telah diprakirakan sebelumnya, jauh sebelum teori relativitas umum dikembangkan Einstein. Perhitungan ini dilakukan oleh astronom Inggris, John Michell tahun 1783 dan ilmuwan Perancis Pierre-Simon Laplace sekitar tahun 1796 dan 1799. Mereka berdua mengembangkan

perhitungannya dengan kerangka mekanika Newton/klasik. Michelle menghitung, apabila suatu bintang memiliki kerapatan yang sama dengan Matahari, tetapi memiliki radius 500 kali lebih besar maka bintang tersebut akan memiliki tarikan gravitasi sangat kuat, cahaya pun akan terperangkap dan tidak akan bisa lepas. Sementara itu, Laplace, secara mandiri mengembangkan perhitungan matematis dengan meninjau bintang dengan kerapatan yang sama dengan Bumi, tetapi memiliki radius 250 kali radius Matahari. Objek yang ditinjau oleh Michelle dan Laplace ini sekarang diklasifikasikan sebagai lubang hitam supermasif, dengan massa berada di antara objek kompak di pusat galaksi kita dan kandidat lubang hitam di pusat M87.

Teori Relativitas Umum dan Eksistensi Lubang Hitam

Setelah Einstein berhasil menyelesaikan teori relativitas umum pada tanggal 18 November 1915, kurang dari dua bulan kemudian Astronom Jerman, Karl Schwarzschild, berhasil memublikasikan solusi persamaan medan Einstein

dalam teori relativitas umum. Solusi persamaan yang dikerjakan oleh Schwarzschild meninjau ruang-waktu di sekitar objek bermassa yang bersimetri bola (*spherical symmetric*) dan tidak berotasi/statis. Solusi persamaan medan Einstein ini dikenal sebagai metrik Schwarzschild.

Sekitar tahun 1939, untuk pertama kalinya, Robert Oppenheimer bersama mahasiswanya melakukan perhitungan keruntuhan sebuah bintang masif. Bintang masif merupakan bintang dengan massa yang sangat besar, gambarannya bisa beberapa kali lipat massa Matahari. Secara fisis, ketika bintang masif kehabisan bahan bakar maka bintang tersebut akan meledak, kemudian sisa-sisanya ‘runtuh’ menjadi objek yang sangat padat. Gaya gravitasi objek tersebut menarik semuanya bahkan cahaya sekalipun. Pada perhitungan ini mereka menggunakan asumsi bintang yang ditinjau merupakan materi bersimetri bola tidak berotasi sehingga ruang-waktu di sekitar bintang tersebut dapat dimodelkan dengan metrik

Schwarzschild. Dengan perhitungan ini mereka mengidentifikasi keberadaan cakrawala peristiwa yang merupakan karakteristik eksistensi dari lubang hitam.

Namun, ironisnya, Einstein sendiri sebagai pencetus teori relativitas umum, pada tahun yang sama, meragukan perhitungan keberadaan cakrawala peristiwa ini. Banyak fisikawan berpendapat bahwa tanpa asumsi simetri bola, pada akhirnya peristiwa keruntuhan gravitasi dapat menjadi sesuatu yang berbeda sama sekali. Apabila sistemnya tidak benar-benar bersimetri bola, mungkin saja keruntuhan gagal dan materi objek terhambur kembali, alih-alih memadat karena kekuatan gravitasinya.

Sekitar tahun 1963 pertanyaan tentang eksistensi lubang hitam kembali muncul. Hal ini ditandai dengan penemuan quasar, objek yang paling terang di alam semesta. Sejak quasar ditemukan, fisikawan beranggapan mungkin saja lubang hitam supermasif ditemukan dalam sebagian galaksi besar, termasuk galaksi kita, Bimasakti. Namun sampai saat ini belum ada yang bisa menjelaskan bagaimana lubang hitam supermasif tersebut dapat terbentuk di inti galaksi. Dugaan ini bukan tanpa alasan sama sekali. Hasil observasi menunjukkan bahwa di pusat galaksi Bimasakti terdapat sumber gelombang radio kuat yang kemudian dinamakan Sagittarius A*. Penelitian berlanjut sampai dipastikan dengan jelas bahwa Sagittarius A* ini memang berada di pusat galaksi Bimasakti dan semua bintang di galaksi mengorbit padanya. Namun, resolusi

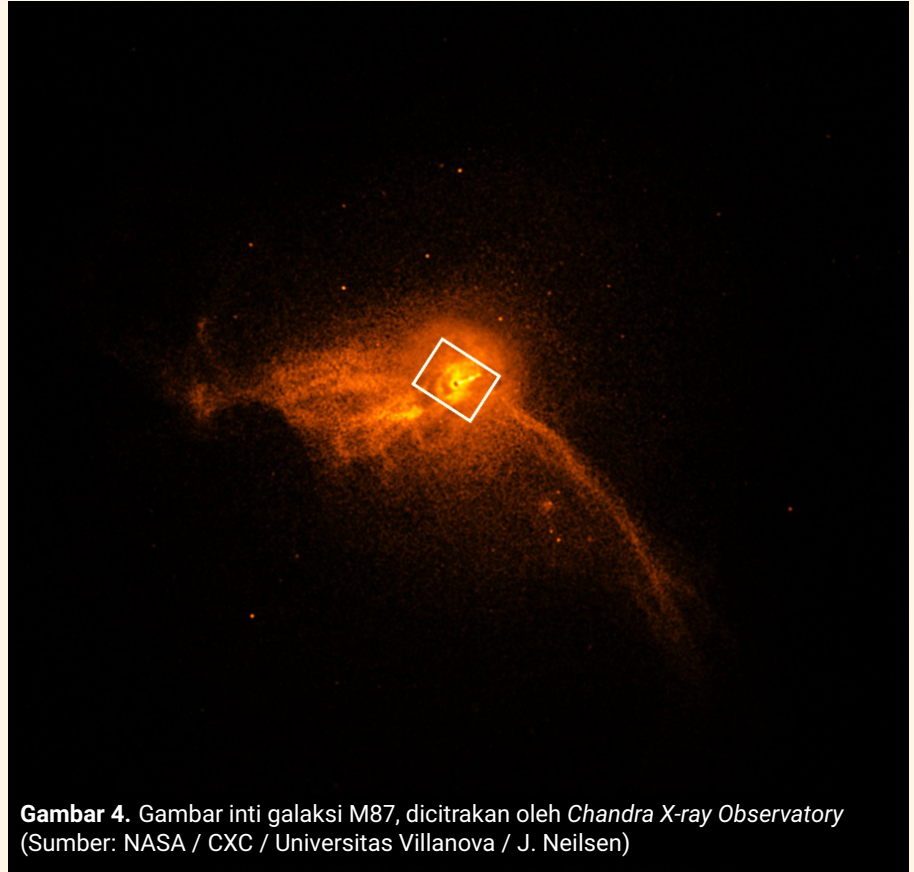


Gambar 2. Galaksi Bimasakti, jika dilihat dari atas bentuknya menyerupai cakram datar dengan diameter sekitar 100.000 tahun cahaya. Lengan spiralnya tersusun dari gas, debu, dan beberapa ratus miliar bintang (Sumber: Johan Jarnestad/The Royal Swedish Academy of Sciences)

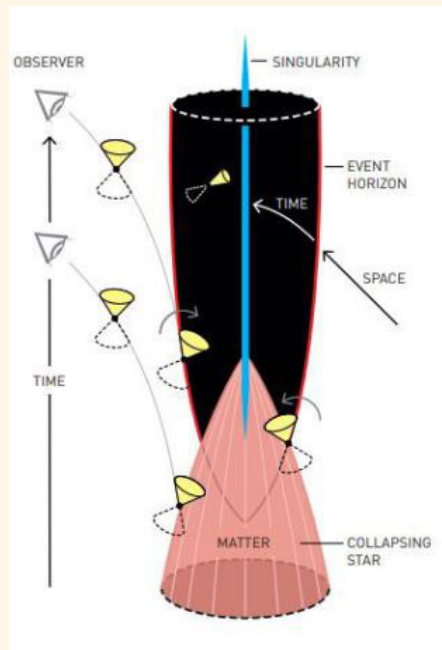
teleskop, bahkan sampai awal tahun 1990-an, belum mampu mendeteksi kemungkinan adanya lubang hitam supermasif tersebut.

Walaupun resolusi teleskop belum mampu mendeteksinya, teknik pengamatan lain dapat digunakan. Pengamatan pada bintang yang mengorbit di sekitar pusat galaksi dapat membantu menentukan potensial gravitasi akibat objek di pusat galaksi tersebut. Kemudian dari hasilnya dapat dilakukan perhitungan untuk menyimpulkan apakah objek tersebut bintang neutron, bintang katai putih, atau lubang hitam.

Sampai pada akhirnya, hal yang paling spektakuler terkait eksistensi lubang hitam ini muncul di tahun 2019 setelah tim EHT (*Event Horizon Telescope*) dengan teknik VLBI (*Very Long Baseline Interferometer*) berhasil memotret citra lubang hitam.



Gambar 4. Gambar inti galaksi M87, dicitrakan oleh *Chandra X-ray Observatory* (Sumber: NASA / CXC / Universitas Villanova / J. Neilsen)



Gambar 3. Diagram pada makalah Penrose (1965) yang menggambarkan keruntuhan materi menjadi lubang hitam. Pada *trapped surface*, kerucut cahaya mengarah ke dalam yang menunjukkan pembentukan singularitas tidak dapat dihindari.

Teknik ini menghubungkan delapan teleskop radio astronomi dari Eropa, Amerika, Pasifik (Hawaii), Amerika Latin, dan Antarktika (Kutub Selatan). Tim EHT berhasil memotret citra lubang hitam supermasif dengan jarak 55 juta tahun cahaya pada galaksi Messier 87 (M87).

Teorema Singularitas

Perhitungan yang dilakukan oleh Oppenheimer dan mahasiswanya memerlukan asumsi bahwa objek yang mengalami keruntuhan gravitasi harus memenuhi syarat simetri bola. Pertanyaan yang muncul, bagaimana jika seandainya objek yang ditinjau tidak bersimetri bola? Mengingat pada kenyataannya, objek astrofisika yang sepenuhnya bersimetri bola sulit ditemukan di dunia nyata. Bermula dari permasalahan ini, Penrose berusaha untuk memecahkannya dengan asumsi lain, yaitu bahwa materi yang runtuh harus

memiliki kerapatan energi positif. Untuk menerapkan asumsi ini Penrose menemukan konsep matematika baru sekaligus memanfaatkan konsep topologi tentang *trapped surface*.

Trapped surface didefinisikan sebagai permukaan tertutup dua-dimensi yang memiliki sifat semua sinar cahaya yang tegak lurus ke permukaannya akan bertemu pada suatu titik di masa depan. Dengan gagasan ini, Penrose membuktikan, tanpa asumsi apapun terkait simetri, ketika *trapped surface* terbentuk tidak mungkin untuk mencegah keruntuhan gravitasi sampai akhirnya terbentuk singularitas. Hal ini berlaku dalam kerangka teori relativitas umum dan asumsi bahwa objek memiliki kerapatan energi positif. Penemuan Penrose ini dianggap sebagai salah satu penemuan yang signifikan setelah hasil yang dipublikasikan oleh Einstein, dalam relativitas umum.

Istilah ‘lubang hitam’ sendiri mulai dikenal luas setelah penemuan Penrose ini. Robert Dick dalam kuliahnya di Princeton dan Wheeler yang membuat istilah ‘lubang hitam’ semakin populer.

Seperti yang telah disebutkan sebelumnya, fisikawan beranggapan mungkin saja lubang hitam supermasif ditemukan dalam sebagian galaksi besar. Kandidat yang diduga sebagai lubang hitam supermasif ini adalah Sagittarius A* di galaksi kita, Bimasakti. Baru pada tahun 1990-an, teleskop yang lebih besar dengan peralatan yang lebih mutakhir memungkinkan penelitian yang lebih sistematis terkait Sagittarius A* ini. Pada tahun tersebut Reinhard Genzel dan Andrea Ghez memulai proyek untuk melihat apa yang terjadi di sekitar inti galaksi Bimasakti. Mereka, dengan masing-masing grup risetnya, mengembangkan

teknis pengamatan, membangun instrumen, dan berkomitmen untuk melakukan riset yang panjang. Sampai pada akhirnya mereka berhasil memantau gerak bintang yang mengorbit pusat galaksi kita selama hampir 30 tahun. Ghez dengan timnya menggunakan teleskop di Observatorium Keck di Hawaii, sedangkan Genzel dan koleganya menggunakan teleskop di Chile yang dioperasikan oleh ESO (*European Southern Observatory*).

Dari hasil pemantauan tersebut, kedua tim Ghez dan Genzel, menyimpulkan bahwa di pusat galaksi kita terdapat objek yang terkonsentrasi dengan massa mendekati 4 juta kali lipat massa Matahari. Interpretasi dari hasil ini cocok dengan dugaan bahwa objek kompak tersebut merupakan lubang hitam supermasif. Selain itu, fakta pendukung lainnya adalah adanya gelombang inframerah-dekat dan

flare sinar-X teramati dari posisi yang sama. Hal ini dapat dianggap berasal dari variasi aliran akresi menuju lubang hitam masif tersebut.

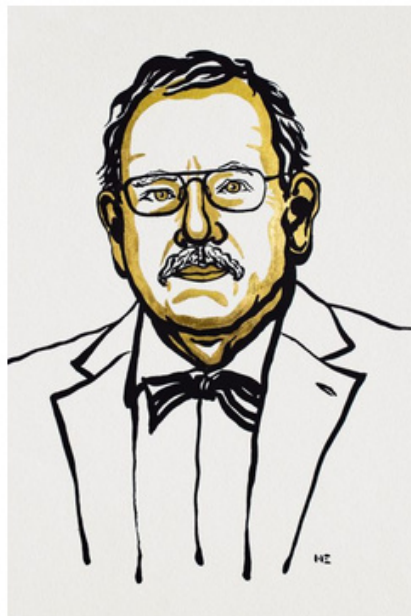
Hasil inilah yang mengantarkan Reinhard Genzel dan Andrea Ghez menjadi pemenang hadiah Nobel Fisika tahun 2020. Hadiah ini diberikan atas penemuan mereka terkait objek kompak di pusat galaksi Bimasakti kita. Reinhard Genzel dan Andrea Ghez berhak mendapatkan setengah dari total hadiah Nobel Fisika 2020. Sementara itu, setengah bagian hadiah diberikan kepada Roger Penrose, atas kontribusinya terhadap penemuan lubang hitam sebagai salah satu bukti kuat prediksi teori relativitas umum. Hal ini, salah satunya, terkait dengan teorema singularitas yang telah dipaparkan di atas.



© Nobel Media. Ill. Niklas Elmehed.

Roger Penrose

Prize share: 1/2



© Nobel Media. Ill. Niklas Elmehed.

Reinhard Genzel

Prize share: 1/4



© Nobel Media. Ill. Niklas Elmehed.

Andrea Ghez

Prize share: 1/4

Gambar 5. Ilustrasi pemenang Nobel Fisika tahun 2020.