

LUBANG HITAM DI PUSAT GALAKSI BIMA SAKTI

Emanuel Sungging Mumpuni
Peneliti Bidang Matahari dan Antariksa, LAPAN

RINGKASAN

Lubang hitam adalah suatu benda dengan massa yang sangat masif, sehingga menyebabkan cahaya bisa tertarik dan terjebak ke dalamnya tanpa bisa melepaskan diri. Bila cahaya terjebak oleh lubang hitam, maka tidak akan mungkin ada informasi yang bisa diperoleh untuk membuktikan adanya lubang hitam secara langsung. Tetapi pengamatan akan perilaku benda-benda bergerak dan distribusi energi dari suatu lokasi bisa diterapkan untuk menentukan adanya distribusi massa dari suatu lokasi, dalam hal ini diterapkan untuk menentukan keberadaan lubang hitam.

Pengamatan resolusi tinggi pada berbagai rentang pengamatan dari obyek-obyek bergerak di arah pusat galaksi kita, yaitu galaksi Bima Sakti, pada arah Sagitarius A*, menunjukkan indikasi kuat adanya lubang hitam di pusat galaksi kita. Dengan pemahaman akan keberadaan lubang hitam tersebut, maka dapat dipelajari evolusi galaksi kita serta evolusi dari alam semesta secara keseluruhan.

1 PENDAHULUAN

Pada arah pusat Bima Sakti ditemukan adanya sumber radio, yang diberi nama Sagitarius A (Sgr A). Dengan meningkatnya resolusi pengamatan maka studi mendalam pada Sagitarius A bisa memberikan pemahaman yang mendalam dengan resolusi yang mencapai ~ 20 AU. Sumber radio yang kuat dari arah Sagitarius A dinyatakan sebagai Sagitarius A*, sering disingkat sebagai Sgr A*. Pengamatan menunjukkan luminositas radio Sgr A* mencapai 2.10^{34} erg/dt, dengan diameter kurang dari 20 AU.

Pada saat itu belum ditentukan secara pasti bahwa sumber radio ini dikaitkan dengan adanya lubang hitam super-cepat di pusat galaksi yang bermassa mencapai 2-4 juta massa matahari. Karena lubang hitam tidak teramati, maka pengamatan yang dilakukan pada daerah Sgr A* harus memanfaatkan pemahaman tentang dinamika benda-benda di sekitar lubang hitam serta fenomena energetik, sebagai penunjuk bahwa memang terdapat lubang hitam pada arah Sgr A*, alih-alih berasal dari obyek-obyek yang lain.

2 BUKTI ADANYA LUBANG HITAM DI PUSAT GALAKSI BIMA SAKTI

Konjektur adanya lubang hitam di suatu lokasi di alam semesta ditinjau dari keberadaan konsentrasi massa, dari sesuatu obyek yang

tidak teramati. Sejak ditemukannya *quasars* di pusat galaksi di luar galaksi Bima Sakti, maka keyakinan akan adanya lubang hitam semakin kuat. Bukti yang mendukung keyakinan ini harus mempunyai kesahihan secara fisis, karena konfigurasi konsentrasi massa terpusat bisa dijelaskan oleh berbagai model fisis. Oleh karena itu, penting mengetahui bentuk medan gravitasi yang sangat dekat dengan obyek pusat, sesuai dengan model yang dibangun dari teori relativitas umum. Kemudian harus didukung oleh pengamatan dengan resolusi tinggi tentang perilaku benda-benda (bintang) di sekitar konsentrasi pusat massa.

Indikasi awal keberadaan lubang hitam berawal dari ditemukan adanya konsentrasi massa terpusat dalam pusat galaksi; ditemukan pada akhir tahun tujuh puluhan dari pengamatan spektroskopi garis struktur halus mid-merah-infra Ne^+ (Wollman et al. 1977; Lacy et al. 1979). Pengukuran menunjukkan adanya pergeseran Doppler yang besar (± 250 km/dt) dari awan gas terionisasi, mengarah pada kerapatan bintang yang maksimum. Pengamatan interferometrik radio menemukan sumber radio kompak, non-termal pada wilayah yang sama (Balick & Brown 1974), yang diinterpretasikan sebagai laju gas dalam jumlah besar mengindikasikan gerak orbit di sekitar suatu konsentrasi massa yang sangat besar, mencapai jutaan massa matahari, sebagai kandidat

adanya lubang hitam, yang berhimpitan dengan letak Sgr A* (Lynden-Bell & Rees 1971).

Studi merah-infra dan radio lebih lanjut yang dilakukan pada tahun delapan puluhan memperkuat bukti dinamika gas sebagai bukti konsentrasi massa terpusat (Serabyn & Lacy 1985), kendati bukti-bukti yang ada belum benar-benar meyakinkan. Sebagai tambahan adanya gaya gravitasi, gas bisa dipengaruhi medan magnetik, tekanan radiasi, angin bintang dan friksi dengan komponen gas yang lain – yang semuanya diketahui ada di pusat galaksi – sehingga membuat interpretasi masih belum pasti. Pada akhir delapan puluhan beberapa grup peneliti mulai mengukur kecepatan radial beberapa tipe akhir bintang, yaitu seperti raksasa merah dan super raksasa (Rieke & Rieke 1988). Pengukuran-pengukuran tersebut mengkonfirmasi dan memperkuat bukti adanya pusat massa yang mencapai 3 juta massa matahari, pusat massa yang tidak bisa dihitung hanya dari gugus bintang di sekitar cahaya merah-infra-dekat.

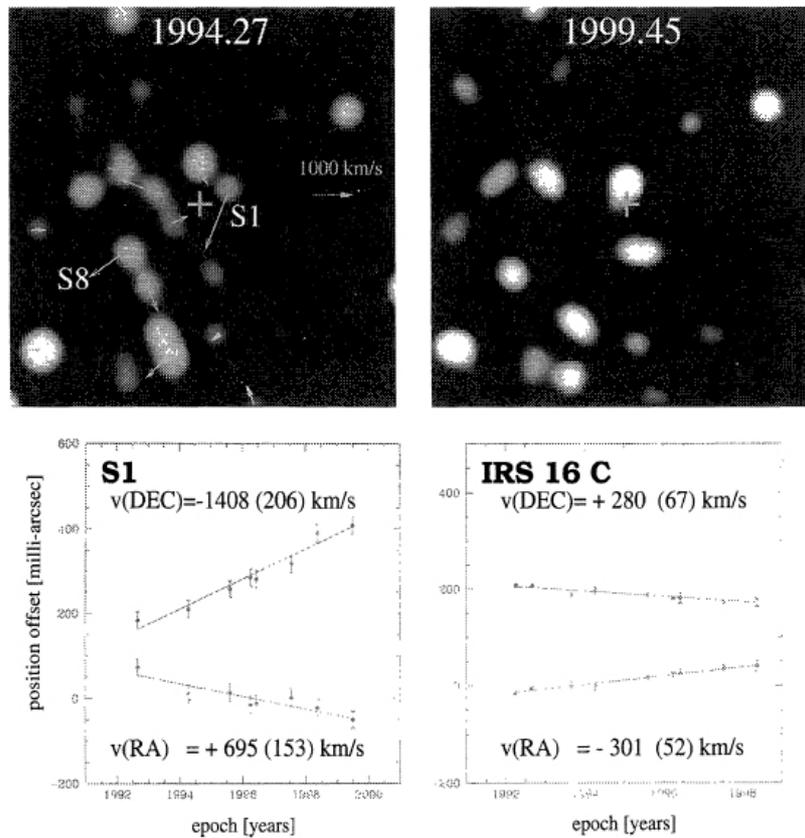
Dengan semakin meningkatnya resolusi pengamatan, maka pengamatan medan kecepatan bintang bisa mencapai ketelitian 5 hari cahaya, sehingga bisa memberikan pembatasan secara lebih pasti pada pengamatan gerak bintang di sekitar pusat galaksi. Kemajuan yang signifikan ini mungkin pada satu sisi dengan adanya penemuan *cluster* bintang dengan garis emisi panas dan benderang (disebut sebagai bintang HeI) oleh Allen et al. (1990) dan Krabbe et al. (1991). Bintang-bintang ini diyakini berumur beberapa juta tahun dan menghuni pusat galaksi, tetapi juga memberikan pengukuran kecepatan radial mencapai $\sim 1''$ (0.04 pc). Di sisi lain pengembangan yang paling penting adalah memungkinkannya pengukuran *proper motion* bintang secara lebih baik lagi.

Genzel et al. (1996) telah berhasil menentukan kecepatan radial sampai sekitar 220 bintang (Krabbe et al. 1995; Haller et al 1996). Dengan mengkombinasi 60 citra resolusi tinggi yang independen antara 1992-1997; Eckart &

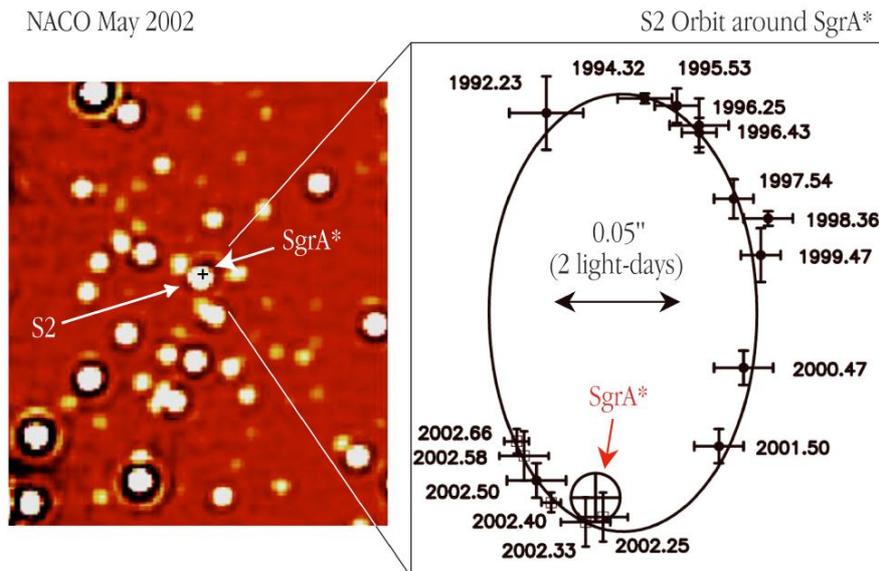
Genzel (1996, 1997) dan Genzel et al. (1997) telah menurunkan gerak-diri (relatif) dari sekitar 70 bintang (Gambar 2-1). Bagian atas menggambarkan gerak-diri yang diturunkan (tanpa garis galat) serta diplot untuk sejumlah bintang dengan citra resolusi tinggi; mengasumsikan jarak Matahari – Pusat galaksi 8 kpc.

Pada sekitar Sgr A* dari Gambar 2-1 bagian atas, dengan diameter $\sim 1''$ terdapat konsentrasi bintang yang redup (disebut sebagai gugus Sgr A*), memperlihatkan gerak diri lebih dari 1000 km/dt, sementara konsentrasi bintang yang semakin menjauh mencapai beberapa ratus km/dt. Konsentrasi bintang yang tercepat (~ 1400 km/dt) juga memperlihatkan posisi terdekat ($\sim 0.13''$) dari Sgr A*. Temuan ini sesuai dengan asumsi bahwa Sgr A* berkesesuaian dengan adanya massa kompak yang sangat besar. Perlu juga dipastikan bahwa pergerakan bintang yang teramati tersebut berada pada medan gravitasi terpusat, yang berpusat di pusat galaksi.

Pengamatan dengan instrumen NACO yang dimulai dari 2001 memanfaatkan teleskop YEPUN VLT 8.2-m, memberikan posisi bintang-bintang pada pusat galaksi secara lebih akurat (Gambar 2-2). Dengan demikian, dapat diyakini secara pasti bahwa terdapat suatu konsentrasi massa terpusat dengan adanya bintang (diberi nama S2) yang mengorbit pusat massa tersebut. Dari pengamatan NACO diperoleh informasi bahwa bintang S2 mencapai jarak terdekat (*perenigricon*) dari Sgr A* pada 2002, dan berjarak hanya 17 jam-cahaya dari sumber radio, bergerak dengan kecepatan 5000 km/jam. Periode orbit 15.2 tahun, bentuk orbit eliptis dengan eksentrisitas 0.87, yang berarti jarak terjauhnya (*aponigricon*) adalah 10 hari-cahaya dari pusat massa. Bintang S2 merupakan bintang dengan massa 15 kali Matahari dan ukuran 7 kali Matahari. Perhitungan menunjukkan bahwa jarak orbit minimal dimana bintang terhindar dari gaya pasang-surut adalah sekitar 16 menit-cahaya. Perhitungan model lubang hitam di pusat galaksi memberikan perkiraan massa mencapai 2.6 ± 0.2 juta massa Matahari.



Gambar 2-1: Perubahan posisi bintang-bintang di sekitar Sgr A* (tanda +), diamati dari perubahan sudut-nya (ordinat) terhadap epoch pengamatan, dibandingkan pada bintang S1 dan IRS 16 (Eckart, A., Genzel, R., 1999)



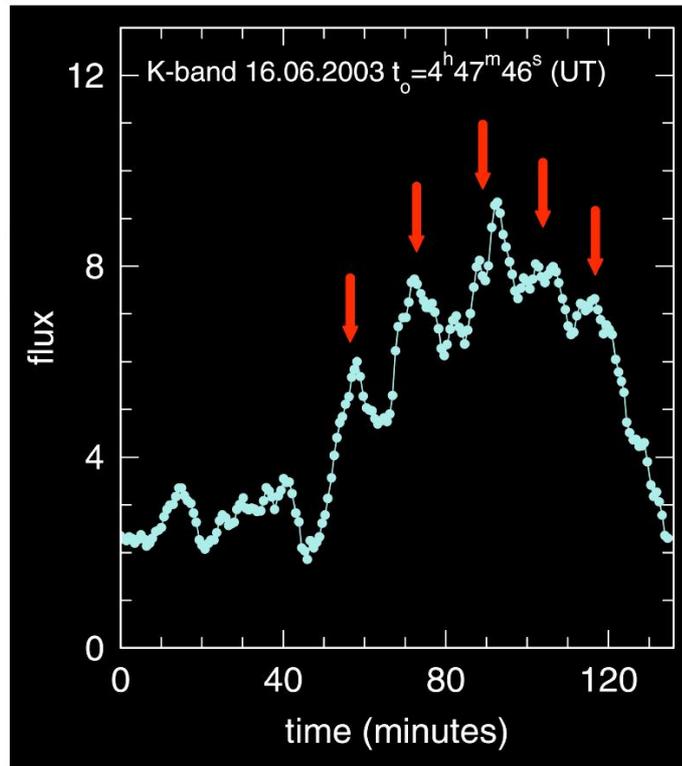
The Motion of a Star around the Central Black Hole in the Milky Way

ESO PR Photo 23c/02 (9 October 2002)

© European Southern Observatory



Gambar 2-2: SgrA* dan S2 diidentifikasi di panel kiri. Panel kanan memperlihatkan orbit S2 yang teramati antara 1992 - 2002, relatif terhadap SgrA* (ditandai dengan lingkaran). Posisi S2 pada setiap epoch diindikasikan dengan tanda plus dengan tanggal dalam fraksi tahun diperlihatkan pada setiap titik. Ukuran tanda plus mengindikasikan besarnya galat. Kurva solid adalah fitting terbaik orbit eliptis - satu titik fokus adalah posisi SgrA* (Sumber: ESO)



Near-IR Flare from Galactic Centre (Lightcurve)
(VLT YEPUN + NACO)

ESO PR Photo 29b/03 (29 October 2003)

© European Southern Observatory



Gambar 2-3: Variabilitas yang teramati pada pengamatan merah-infra dari arah pusat galaksi (Sumber ESO)

Walaupun bukti adanya lubang hitam bisa dilihat dari gerak benda-benda di sekitar suatu konsentrasi massa terpusat yang sangat besar, tetapi lubang hitam tidak akan pernah terlihat. Seberapa besar ukuran lubang hitam itu sendiri tidak dapat diketahui. Sehingga keberadaan lubang hitam masih bisa disanggah jika ada model lain yang memberi penjelasan tentang konsentrasi massa yang sangat padat. Teori relativitas umum telah memprediksi bahwa massa lubang hitam tersimpan dalam *event horizon*, dimana tidak ada informasi yang bisa keluar dari dalamnya. Sedemikian pekat gravitasi dalam *event horizon*, sehingga cahayapun tidak dapat lepas. Akibat kecepatan gravitasi lubang hitam, maka materi di sekitar lubang hitam akan terhisap ke dalamnya. Ketika materi tepat pada 'tepi' event horizon, dimana kelajuannya menuju laju cahaya, maka akan mengalami pemanasan sangat tinggi, dan melepaskan emisi yang sangat intens. Dengan demikian, jika ditemukan adanya *flare* (semburan)

berenergi tinggi, maka bisa ditentukan bahwa materi tepat akan masuk ke dalam *event horizon* dari lubang hitam, dan akhirnya hilang sama sekali dari pengamatan.

Pengamatan lebih lanjut NACO tahun 2003 menunjukkan adanya semburan energi berkekuatan tinggi pada merah-infra, yang memperkuat bukti adanya lubang hitam di pusat galaksi (Gambar 2-3).

Gambar 2-3 memperlihatkan kurva cahaya dari flare yang teramati pada pusat galaksi, diamati pada 16 Juni 2003 di pita K (panjang gelombang $2.2 \mu\text{m}$). Flare memperlihatkan variabilitas pada skala waktu periodisitas 17 menit (tanda panah). Variabilitas yang besar ini menunjukkan bahwa emisi merah-infra berasal tepat diluar *event horizon* lubang hitam. Jika puncak aktivitas terjadi dalam periode 17 menit, maka keseluruhan *event horizon* yang memberikan sumbangan pada emisi (mempunyai ukuran tidak lebih besar dari cahaya yang ditempuh dalam 17 menit) yaitu sekitar dua kali

jarak Matahari-Bumi. Hal ini bersesuaian dengan perhitungan bahwa, untuk bintang terhindar dari gaya pasang-surut harus berjarak paling tidak 16 menit cahaya.

3 ASAL USUL LUBANG HITAM DI PUSAT GALAKSI BIMA SAKTI

Lubang hitam super pepadat bisa saja terbentuk jika sejumlah besar bintang terkungkung dalam suatu lokasi pada akhir masa hidupnya yang menjadi lubang hitam, lalu lubang hitam seukuran bintang mengalami fusi menjadi benih lubang hitam besar di pusat galaksi; atau bisa saja terbentuk seketika pada awal alam semesta, sebagai primordial lubang hitam.

Genzel *et al.* (1997) menunjukkan bagaimana hubungan kestabilan jika terdapat suatu massa dengan 2.6 juta massa matahari, dengan kerapatan 2.10^1 pc^{-3} , tidak akan stabil lebih dari 10 juta tahun, apabila massa dinyatakan sebagai gugus gelap (*dark cluster*) dengan komposisi bintang katai putih (*white dwarf star*), bintang neutron, lubang hitam akibat kematian bintang, atau entitas sub-stellar yang lain. Akan tetapi mayoritas bintang di pusat galaksi berumur lebih $10^8 - 10^9$ tahun.

Konsentrasi massa gelap juga tidak mungkin berasal dari keadaan runtuh gugus yang berkembang secara dinamis. Karena pada kasus ini, walaupun intinya sangat rapat mempunyai lapisan kulit yang lunak, quasi-isotermal, tidak seperti yang teramati pada pusat galaksi. Kemungkinan lain, jika konjektur massa gelap tersusun dari gas fermion terdegenerasi, maka massa fermion tidak bisa lebih besar dari massa elektron. Konfigurasi yang paling realistis tanpa adanya muatan listrik adalah karena plasma elektron-positron, akan tetapi, segera musnah, melalui garis radiasi pemusnahan/anihilasi.

Terdapat dua argumen yang memperkuat bahwa pusat galaksi memang merupakan lubang hitam. Genzel (1997) menunjukkan bahwa Sgr A* mempunyai *proper motion* kurang dari 16 km/dt. Jika pusat galaksi sangat rapat, bintang-bintang yang bergerak di

sekitar Sgr A* dan pada Sgr A* haruslah mempunyai energi kinetik yang sama. Perbedaan yang mencapai faktor 100 pada pergerakan teramati, disertai dengan penentuan massa dari bintang-bintang yang bergerak menunjukkan bahwa paling tidak Sgr A* 10^4 kali lebih masif daripada bintang-bintang di sekitarnya. Jika diasumsikan bahwa massa Sgr A* paling tidak terkonsentrasi hanya pada emisi radio (radius $\leq 1.5 \cdot 10^{13}$ cm), maka kerapatan Sgr A* mencapai $10^{20.5}$ matahari. Batas bawah ini berorde lima lebih kecil untuk kerapatan yang ekuivalen untuk $2.6 \cdot 10^6$ massa matahari, dengan lubang hitam mempunyai radius Schwarzschild $\sim 10^{12}$ cm.

Argumen kedua menurut Melia (1992), jika Sgr A* dengan massa saat ini memancarkan radiasi, dari energi massa diam diubah menjadi radiasi, efisiensi konversi mencapai $10^{-5} - 10^{-6}$, dengan mempertimbangkan akresi dari gas angin bintang yang berasal dari lingkungan. Satu-satunya penjelasan adalah pada kondisi yang murni radial (Bondi-Hoyle) atau pada kerapatan rendah, aliran non-radial dari energi massa diam aliran akresi teradveksi kedalam, alih-alih diradiasikan keluar (Melia 1992; Narayan *et al.* 1995, 1997). Penjelasan ini membutuhkan adanya suatu *event horizon* dan konfigurasi yang paling mungkin adalah lubang hitam (Narayan *et al.* 1997). Dengan demikian, kesimpulan yang paling bisa diterima saat ini adalah terdapat lubang hitam yang masif dan tidak aktif di pusat galaksi.

Penjelasan mengenai asal-usul lubang hitam di pusat galaksi, dikaitkan dengan penjelasan terbentuknya galaksi. Menurut Waller & Hodge (2003), konfigurasi galaksi ditentukan bagaimana awan proto-galaksi membentuk identitas gravitasi, melalui instabilitas gas pre-galaksi. Galaksi terbentuk ketika proto-galaksi mengalami kontraksi. Sesuai dengan theorem Virial, jika kerapatan awan protogalaksi terdistribusi secara seragam selama kontraksi, energi gravitasi akan dilepaskan seiring dengan mengecilnya radius. Temperatur, akan cenderung tetap, setengah energi gravitasi di konversi menjadi radiasi yang dipancarkan keluar. Ketika kerapatan

material sangat besar, yaitu ketika menjadi sangat kepadatan, awan tidak bisa lagi meradiasikan energi yang dihasilkan dari kontraksi gravitasi. Ketika terjadi maka energi termal awan gas (sejumlah energi yang direpresentasikan dari gerak partikel gas) naik dengan semakin mengecilnya radius. Pada suatu titik (yang disebut sebagai *radius-termal*), energi termal awan bisa menghentikan kontraksi. Demikian juga, ketika radius mengecil maka energi rotasi bisa mengimbangi energi gravitasi, yang dinyatakan sebagai *radius-rotasi*. Dan pada suatu ukuran kritis, bintang-bintang terbentuk sebagai akibat kondensasi gas dan awan gas membentuk dirinya sebagai bintang-bintang anggota galaksi. Titik ini disebut sebagai *radius-kondensasi*. Konfigurasi awan proto-galaksi berkontraksi bergantung pada ketiga ukuran radius kritis, yaitu rotasi, kondensasi, dan termal.

Jika radius rotasi yang paling dominan, maka kontraksi dihentikan oleh rotasi. Gaya sentrifugal berlaku hanya pada suatu bidang datar, sedemikian sehingga kontraksi berlangsung tegak lurus bidang sampai terbentuknya piringan tipis. Pada kasus ketika radius-kondensasi dominan pembentukan bintang mulai ketika efek rotasi belum menjadi penting pada penghentian kontraksi. Seiring naiknya kerapatan, rasio formasi bintang menjadi penting dan keseluruhan gas digunakan dalam pembentukan bintang. Ketika kontraksi terhenti pada suatu batas, sedikit sekali gas tersisa untuk efisiensi disipasi gas. Pada keadaan ini piringan tidak terbentuk, dan protogalaksi berhenti kontraksi pada suatu keadaan yang berbentuk menuju bola. Pada kasus ketiga, ketika radius-termal paling dominan, awan proto-galaksi berkontraksi menjadi semakin kecil dan semakin kecil, karena rotasi dan kondensasi tidak berperan untuk menghentikan kontraksi dan akhirnya runtuh menjadi obyek supermasif. Maka kombinasi ketiga nilai batas tersebut, bisa memberikan penjelasan tentang bagaimana terbentuknya galaksi dan adanya pusat yang sangat masif (lubang hitam) di pusat galaksi.

4 PENENTUAN MASSA LUBANG HITAM

Dari teori relativitas umum, penentuan massa lubang hitam bisa dilihat dari efek gravitasi objek-objek yang bergerak, terhadap suatu pusat massa yang tidak teramati. Sebagaimana pengamatan tata surya, planet-planet bergerak terhadap pusat massa (Matahari), maka hubungannya dapat ditinjau dari *hukum-III Kepler* untuk mendapatkan massa dominan.

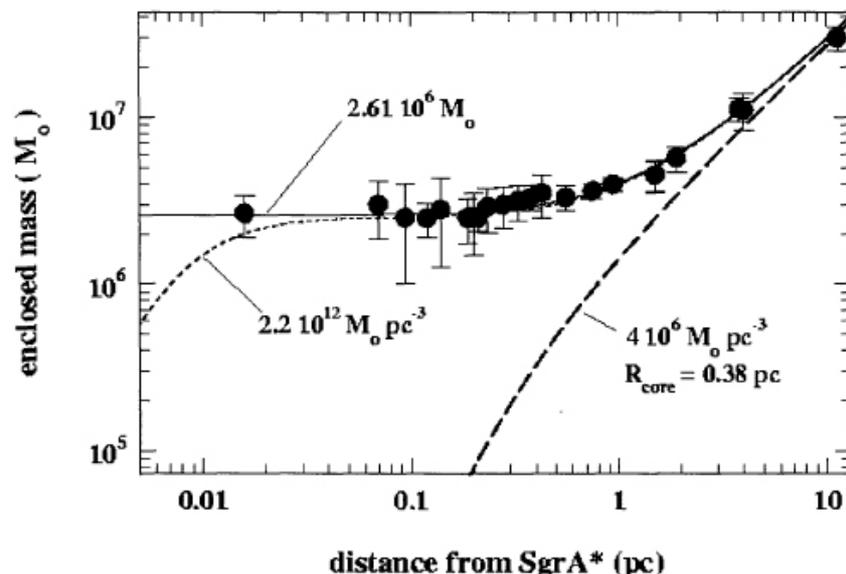
Eckart & Genzel (1999) memberikan analisa awal berdasarkan dispersi kecepatan diproyeksikan dari sejumlah bintang pada anulus tertentu diproyeksikan pada radius p dan naik dengan rasio $p^{-1/2}$, antara $p \sim 1\text{pc}$ dan $p \sim 0.01\text{ pc}$, sebagaimana diduga dari potensial pusat massa (diturunkan dari Hukum Kepler). Lokasi kecepatan bintang terbesar (pusat dinamika), kerapatan bintang maksimum dan posisi Sgr A* (*Menten et al. 1997* memberikan relatif terhadap bintang sebesar '30 mili-arc detik), berkesesuaian dengan $\pm 0.004\text{ pc}$ (0.1" oleh *Ghez et al. 1997*). Antara $5'' \geq p \geq 1''$ ketika data radial dan proper motion tersedia untuk bintang yang sama – dispersi kecepatan untuk ketiga arah mempunyai galat yang kecil. Ini artinya orbit bintang cenderung isotropis, dan orbit-orbit bintang disekitar Sgr A* cenderung Keplerian (*Eckart & Genzel, 1996, 1997*).

Distribusi massa yang tercakup sebagai fungsi dari radius yang sebenarnya dari Sgr A*, diperlihatkan pada Gambar 4-1, sebagai hasil dari penerapan persamaan 'Jeans', juga dengan memproyeksikan penentu massa untuk semua data radial dan proper motion yang tersedia, seperti diperlihatkan pada Tabel 4-1, (*Genzel et al. 1997*). Data di *fit* dengan sangat baik dengan kombinasi massa titik pusat ($2.61[\pm 0.15_{\text{stat.}}, \pm 0.35_{\text{stat+sys}}] \times 10^6$ massa matahari) dan gugus bintang hampir isothermal dengan radius inti $\sim 0.38\text{ pc}$ dengan kerapatan inti $4 \times 10^6, \text{ pc}^{-3}$. Ini berkesesuaian dengan *fit* distribusi bintang dengan pita 2 μm dengan rasio massa-luminositas 2 (garis putus-putus tebal pada Gambar 4-1).

Tabel 4-1: DISPERSI KECEPATAN YANG DITURUNKAN DAN MASSA YANG TERCAKUP DI DALAMNYA (Genzel et al. 1997)

p (arcsec)	number of proper motions	σ (km/s)
0.27" (interval: 0-0.7")	24	560±90
1.15" (0.7-1.5")	22	275±42
2.0" (1.5-2.5")	44	171±19
3.4" (2.5-6")	36	132±16

R (pc)	M(R) ($\times 10^6 M_\odot$)	method	reference
0.016	2.65±0.76	prop.mot., projected mass estimators	this paper
0.07	2.8±1.1	prop.mot., Jeans	"
0.094	2.5±1.5	rad.mot., Jeans	Genzel et al.96
0.12	2.54±0.6	prop.mot., Jeans	this paper
0.14	2.8±1.5	rad.mot., Jeans	Genzel et al.96
0.19	2.5±0.75	"	"
0.21	2.51±0.4	prop.mot., Jeans	this paper
0.24	2.9±0.87	rad.mot., Jeans	Genzel et al.96
0.28	3.0±0.84	"	"
0.33	3.15±0.75	"	"
0.38	3.3±0.56	"	"
0.56	3.3±0.56	"	"
0.75	3.6±0.36	"	"
0.94	3.95±0.38	"	"
1.5	4.5±0.95	rotating gas disk	Guesten et al.87
1.9	5.7±0.97	rad.mot., Jeans	Genzel et al.96
3.8	11.2±1.9	"	"
4	11±2.8	rotating gas disk	Guesten et al.87
11.3	30±4.8	rad.mot., Jeans	Genzel et al.96



Gambar 4-1: Model massa dari proper motion bintang dan gerak radial. Lingkaran penuh adalah berbagai massa yang diperlihatkan pada Tabel 4-1, dengan asumsi Matahari – Pusat galaksi berjarak 8 kpc. Garis tebal menyatakan kurva yang menggunakan model bintang teramati. Garis tipis lurus jumlah gugus bintang ditambah titik massa 2.61×10^6 massa Matahari, garis putus tipis adalah jumlah gugus bintang teramati ditambah $\alpha = 5$ model Plummer untuk gugus gelap dengan kerapatan pusat $2.2 \times 10^{12} \text{ pc}^{-3}$ dan $R_0 = 0.0065 \text{ pc}$ (Eckart, A., Genzel, R., 1999)

Pusat massa 'gelap', karena harusnya mempunyai rasio massa-luminositas 100 atau lebih. Jika titik pusat massa digantikan oleh gugus gelap kerapatan pusatnya harus lebih dari 2.10^1 pc^{-3} untuk bisa tetap konsisten dengan data, sekitar 5.10^5 kali lebih besar daripada gugus yang tampak.

5 KESIMPULAN

Kendati lubang hitam adalah fenomena alam yang tidak bisa diamati, karena tidak akan ada cahaya yang bisa keluar darinya, tetapi dengan meningkatnya kemampuan pengamatan, dari pengamatan radio, pencitraan merah-infra sampai spektroskopi resolusi tinggi telah menunjukkan adanya pergerakan bintang-bintang yang mengitari suatu sumber radio dengan periode di bawah lima hari, pada suatu pusat berjarak 3 pc, dan perhitungan menunjukkan pusat massa yang dikitari oleh bintang-bintang tersebut mempunyai massa mencapai 2.61×10^6 massa Matahari.

Massa yang sangat pekat tersebut tidak akan mungkin berasal dari gugus bintang stabil, guguran bintang, atau sisa-sisa bintang generasi sebelumnya. Penjelasan yang paling bisa diterima adalah massa tersebut adalah sebuah lubang hitam pekat yang berada pada pusat galaksi Bima Sakti.

DAFTAR RUJUKAN

Allen, D. A., Hyland, A. R., Hillier, D. J., 1990. *The Source of Luminosity at the Galactic Centre*, Mon. Not. Astr. Soc., 244, 706.

Balick, B., Brown, R. L., 1974. *Intense Sub-Arcsecond Structure in the Galactic Center*, Astrophys. J., 194, 265.

Carrol, B. W., Ostlie, D. A., 1996. *An Introduction to Modern Astrophysics*, Addison-Wesley Publishing Company, Inc.

Eckart, A., Genzel, R., 1996. *Observations of Stellar Proper Motions the Galactic Centre*, Nature., 383, 415.

Eckart, A., Genzel, R., 1997. *Stellar Proper Motions in the Central 0.1 pc of the Galaxy*, Mon. Not. R. Astr. Soc., 284, 576.

Eckart, A., Genzel, R., 1999. *The Massive Black Hole at the Galactic Center*, J. Astrophys. Astr., 20, 187-196.

Genzel, R., Eckart, A., Ott, T., Eisenhauer, F., 1997. *On the Nature of the Dark Mass in the Centre of the Milky way*, Mon. Not. R. Astr. Soc., 291, 219.

Genzel, R., et. al., 2003. *Messages from the Abyss - VLT Observes Infrared Flares from Black Hole at Galactic Centre*, ESO Press Release 26/03, < <http://www.eso.org/outreach/press-rel/pr-2003/pr-26-03.html>>.

Ghez, A., Klein, B., Morris, M., Becklin, E., 1998. *High Proper Motion Stars in the Vicinity of Sagittarius A*: Evidence for a Supermassive Black Hole at the Center of Our Galaxy*, Astrophys. J., 509, 678.

Haller, J. W., Rieke, M. J., Rieke, G. H., Tamblyn, P., Close, L., Melia, F., 1996. *Stellar Kinematics and the Black Hole in the Galactic Center*, Astrophys. J., 456, 194.

Krabbe, A., Genzel, R., Drapartz, S., Rotaciuc, V., 1991. *A Cluster of He I Emission-Line Stars in the Galactic Center*, Astrophys. J., 382, L19.

Lacy, J. H., Baas, F., Townes, C. H., Geballe, T. R., 1979. *Observations of the Motion and Distribution of the Ionized Gas in the Central Parsec of the Galaxy*, Astrophys. J., 227, L17.

Lynden-Bell, D., Rees, M., 1971. *On Quasars, Dust & the Galactic Centre*, Mon. Not. R. Astr. Soc., 152, 461.

Melia, F. 1992. *An Accreting Black Hole Model for Sagittarius A**, Astrophys. J., 387, L25.

Menten, K. M., Reid, M., Eckart, A., Genzel, R. 1997. *The Position of Sagittarius A*: Accurate Alignment of the Radio and Infrared Reference Frames at the Galactic Center*, Astrophys. J., 475, L111.

Narayan, R., Mahadevan, R., Grindlay, J., 1998. *Advection-Dominated Accretion Model of*

- Sagittarius A* : Evidence for a Black Hole at the Galactic Center*, *Astrophys. J.*, 492, 554.
- Narayan, R., Yi, I., Mahadevan, R., 1995. *Explaining the Spectrum of Sagittarius A* with a Model of an Accreting Black Hole*, *Nature*, 374, 623.
- Novikov, I., 1990. *Black Hole and the Universe*, Cambridge University Press.
- Rieke, G. H., Rieke, M. J. 1988. *Stellar Velocities and the Mass Distribution in the Galactic Center*, *Astrophys. J.*, 330, L33.
- Schödel, R., et al., 2002. *Surfing a Black Hole – Star Orbiting Massive Milky Way Centre Approaches to within 17 Light-Hour*, ESO Press Release 17/02, < <http://www.eso.org/outreach/press-rel/pr-2002/pr-17-02.html>>.
- Serabyn, E., Lacy, J. 1985. *[Ne II] Observations of the Galactic Center: Evidence for a Massive Black Hole*, *Astrophys. J.*, 293, 445.
- Waller, W. H., Hodge, P. W., 2003. *galaxies and the cosmic Frontier*, Harvard University Press.
- Wollman, E. R., Geballe, T. R., Lacy, J. H., Townes, C. H., Rank, D. M. 1977. *Ne II 12.8 Micron Emission from the Galactic Center*, *Astrophys. J.*, 218, L103.