

## Evolusi Pancaran Sinar-X Sagittarius A\* antara Tahun 1999 dan 2019 Berdasarkan Pemerhatian Observatori Sinar-X *Chandra*

(Evolution of Sagittarius A\* X-Ray Emission between 1999 and 2019 Based on Chandra X-Ray Observatory Observations)

AIMI AZIZAN<sup>1</sup>, MUHAMMAD EZZAT ABDUL HAMID<sup>1,2</sup> & ADLYKA ANNUAR<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>Jabatan Fizik Gunaan, Fakulti Sains dan Teknologi, Universiti Kebangsaan Malaysia, 43600 UKM Bangi, Selangor, Malaysia

<sup>2</sup>Jabatan Fizik Perubatan, Pusat Perubatan Universiti Malaya, Lembah Pantai, 59100 Kuala Lumpur, Malaysia

Diserahkan: 26 Oktober 2023/Diterima: 27 Februari 2024

### ABSTRAK

Kertas ini membentangkan pemerhatian Observatori Sinar-X *Chandra* terhadap Sagittarius A\* (Sgr A\*) yang diambil sepanjang dua dekad pertama operasi observatori tersebut antara tahun 1999 dan 2019. Spektrum sinar-X bagi 143 pemerhatian dianalisis untuk mengkaji evolusi sinar-X Sgr A\* sepanjang 20 tahun melalui ciri utamanya, iaitu kecerahan (luminositi), ketumpatan gas dan debu ( $N_{\text{H}}$ ) dan indeks foton ( $\Gamma$ ). Secara amnya, Sgr A\* berada dalam keadaan stabil sepanjang tempoh pemerhatian, dengan purata luminositi sinar-X intrinsik dalam julat tenaga 2 – 8 keV iaitu,  $L_{2-8 \text{ keV, int, kes}} = (3.69 \pm 4.25) \times 10^{33} \text{ erg s}^{-1}$ . Nilai ini tekal dengan purata luminositi sinar-X cerapan dalam jangka masa yang sama,  $L_{2-8 \text{ keV, int, kes}} = (2.24 \pm 2.12) \times 10^{33} \text{ erg s}^{-1}$ . Walau bagaimanapun, terdapat tujuh pemerhatian (~5%) yang mempunyai luminositi intrinsik melebihi nilai purata yang dianggarkan. Nilai  $N_{\text{H}}$  dan  $\Gamma$  yang diukur bagi kesemua pemerhatian dilihat tekal sepanjang tempoh kajian dengan nilai purata,  $N_{\text{H ukur}} = 0.90 \pm 0.35 \times 10^{23} \text{ cm}^{-2}$  dan  $\Gamma_{\text{ukur}} = 1.90 \pm 0.68$ . Ini mencadangkan bahawa kebolehubahan dalam luminositi yang diperhatikan bukan disebabkan oleh pengaburan atau perubahan besar dalam kadar penokokan. Selain itu, kajian ini juga mengukur luminositi sinar-X tertinggi bagi Sgr A\*,  $L_{2-8 \text{ keV, int, kes}} = 3.84^{+0.46}_{-0.37} \times 10^{34} \text{ erg s}^{-1}$ , yang berlaku pada 14 September 2013. Keputusan ini sejajar dengan suar yang paling terang pernah dikesan dalam kajian terdahulu. Ini diikuti dengan pemerhatian pada 19 Ogos 2019 dengan luminositi,  $L_{2-8 \text{ keV, int}} = 2.40^{+0.52}_{-0.36} \times 10^{34} \text{ erg s}^{-1}$ . Kajian ini memberikan gambaran menyeluruh terhadap evolusi pancaran Sgr A\* selama dua dekad pertama pengoperasian *Chandra* dan meningkatkan lagi pemahaman terhadap lohong hitam ini.

Kata kunci: Pusat Galaksi; Sgr A\*; sinar-X; spektroskopi

### ABSTRACT

This paper presents observations made by the *Chandra* X-ray Observatory on Sagittarius A\* (Sgr A\*) from 1999 to 2019. The X-ray spectra from 143 observations were analysed to investigate the X-ray evolution of Sgr A\* throughout 20 years focusing on its key characteristics, i.e., the luminosities, column density ( $N_{\text{H}}$ ), and photon index ( $\Gamma$ ). In general, this study found that Sgr A\* remained in a stable state throughout the observation period, with an average intrinsic X-ray luminosity in the 2 – 8 keV energy range of  $L_{2-8 \text{ keV, int, all}} = 3.69 \pm 4.25 \times 10^{33} \text{ erg s}^{-1}$ . This is consistent with the average observed X-ray luminosity,  $L_{2-8 \text{ keV, obs, all}} = (2.24 \pm 2.12) \times 10^{33} \text{ erg s}^{-1}$ . However, there were seven observations (~5%) that had intrinsic luminosities exceeding the estimated average value. The measured values of  $N_{\text{H}}$  and  $\Gamma$  for all observations, remained consistent throughout the study with average values of  $N_{\text{H meas}} = 0.90 \pm 0.35 \times 10^{23} \text{ cm}^{-2}$  and  $\Gamma_{\text{meas}} = 1.90 \pm 0.6$ . This suggests that the variability in the observed luminosity was not caused by obscuration or significant changes in accretion rate. Additionally, this study also measured the highest X-ray luminosity for Sgr A\*,  $L_{2-8 \text{ keV, int}} = 3.84^{+0.46}_{-0.37} \times 10^{34} \text{ erg s}^{-1}$  on 14th September 2013. This finding is in line with the brightest flare ever observed in past studies. This was followed by an observation on 19th August 2019, with a luminosity of  $L_{2-8 \text{ keV, int}} = 2.40^{+0.52}_{-0.36} \text{ erg s}^{-1}$ . This analysis provides a comprehensive overview of the evolution of Sgr A\*'s emissions during the first two decades of *Chandra*'s operation and further enhances our understanding of this black hole.

Keywords: Galactic center; Sgr A\*; spectroscopy; X-rays

## PENGENALAN

Di Pusat Galaksi Bima Sakti kita, terletak sebuah lohong hitam supermasif (*SMBH*) yang dikenali sebagai Sagittarius A\* (Sgr A\*) dengan jisim  $4.30 \times 10^6 M_{\odot}$  (Gillessen et al. 2009; Gravity Collaboration et al. 2022). Pada jarak 8.28 kiloparsek (kpc), Sgr A\* merupakan *SMBH* terdekat dengan Bumi. Ini memberikan persekitaran yang optimal untuk kita mengkaji fenomena astrofizik ekstrem seperti penokokan bahan ke dalam *SMBH* (Falcke & Markoff 2013).

Secara umumnya, Sgr A\* sedang berada dalam keadaan senyap dan tidak menunjukkan perubahan besar dalam kadar penokokan bahan terhadapnya. Meskipun Sgr A\* dikelaskan sebagai dorman, kajian terdahulu mendapati bahawa Sgr A\* merupakan sebuah pusat galaksi aktif (*AGN*) yang sangat kuat pada masa lepas. Ini dapat dilihat melalui pelepasan satu letupan yang amat kuat (juga dikenali sebagai letupan Seyfert) dengan tenaga yang melimpah sebanyak  $10^{56-57}$  erg ( $1 \text{ erg} = 1 \times 10^{-7} \text{ J}$ ) (Bland-Hawthorn et al. 2019). Bukti yang kukuh menyokong pandangan ini termasuk kewujudan Gelembung Fermi, iaitu gelembung gas yang meliputi paksi galaksi (Su, Slatyer & Finkbeiner 2010) dengan foton bertenaga tinggi (sinar-X dan sinar gamma) yang masih dapat dikesan sehingga hari ini. Selain itu, pantulan pancaran sinar-X dari Sgr A\* ke atas gas padat di Pusat Galaksi memberikan peluang untuk mengkaji suar yang dilepaskan dalam jangka masa ratusan dan ribuan tahun terdahulu. Marin et al. (2023) telah mengesan pantulan pancaran sinar-X daripada suar yang dipancarkan oleh Sgr A\* 200 tahun yang lalu. Luminositi sinar-X yang diperhatikan ini adalah setanding dengan letupan Seyfert. Tambahan pula, dalam kajian jalur tenaga sinar ultralembayung (*UV*) pada Aliran Magellanic, Bland-Hawthorn et al. (2019) menemui bahawa sebahagian daripada aliran tersebut adalah terangsang, suatu kejadian yang hanya boleh berlaku melalui peristiwa bertenaga tinggi, seperti aktiviti *AGN*. Malah, dalam satu kajian terkini yang melibatkan pelbagai panjang gelombang, Cecil et al. (2021) mengenal pasti jet mini yang terhasil akibat penokokan bahan berjisim besar terhadap Sgr A\*. Penemuan jet mini ini yang juga merupakan salah satu ciri fizikal dalam model satuan *AGN*, menjadikan Sgr A\* berpotensi untuk kembali aktif suatu masa akan datang.

Pemerhatian pertama Observatori Sinar-X *Chandra* (*Chandra*) terhadap Sgr A\* pada 21 September 1999 menunjukkan luminositi sinar-X cerapan dalam julat tenaga 2 – 10 keV,  $L_{2-10 \text{ keV, cer}} = 2.4^{+3.0}_{-0.6} \times 10^{33} \text{ erg s}^{-1}$  (Baganoff et al. 2003). Lebih kurang setahun kemudian,

suar sinar-X daripada Sgr A\* dengan  $L_{2-10 \text{ keV, cer}} = (1.0 \pm 0.1) \times 10^{35} \text{ erg s}^{-1}$  dikesan buat pertama kalinya selama  $\sim 10$  ks menggunakan *Chandra* (Baganoff et al. 2001). Suar ini adalah  $\sim 45$  kali lebih tinggi daripada luminositi senyapnya pada masa itu,  $L_{2-10 \text{ keV, cer}} = 2.2^{+0.4}_{-0.3} \times 10^{35} \text{ erg s}^{-1}$ . Selepas pengesanan suar pertama, beberapa lagi suar sinar-X terang telah dikesan menggunakan *Chandra* dan *XMM-Newton* dengan  $L \geq 10^{34} \text{ erg s}^{-1}$  (Goldwurm et al. 2003; Haggard et al. 2019; Neilsen et al. 2013; Mossoux et al. 2015; Nowak et al. 2012; Porquet et al. 2008, 2003). Selain itu, kajian *NuSTAR* juga menunjukkan bahawa suar ini boleh dikesan pada julat tenaga sinar-X tinggi sehingga  $\sim 79$  keV (Barrière et al. 2014; Zhang et al. 2017).

Pada tahun 2012, Sgr A\* dipantau selama 3 Ms ( $\sim 35$  hari) melalui *X-ray Visionary Project (XVP)* menggunakan spektrometer resolusi tinggi *Chandra*, iaitu *High Energy Transmission Grating Spectrometer (HETGS)*; Canizares et al. 2005). Sepanjang tempoh *XVP*, Neilsen et al. (2013) mengesan 39 suar sinar-X daripada 38 pemerhatian dengan luminositi sinar-X intrinsik,  $L_{2-10 \text{ keV, int}} \geq 10^{34} \text{ erg s}^{-1}$ . Berdasarkan projek ini, Sgr A\* dianggarkan mengeluarkan purata  $1.1^{+0.2}_{-0.1}$  suar sehari. Suar paling kuat yang direkodkan semasa tempoh *XVP* adalah pada 9 Februari 2012 dengan luminositi,  $L_{2-10 \text{ keV, int}} = 1.92 \times 10^{35} \text{ erg s}^{-1}$ .

Pada 14 September 2013, suar sinar-X paling terang yang pernah dikesan daripada Sgr A\* telah diperhatikan oleh *Chandra* dengan luminositi,  $L_{2-10 \text{ keV, int}} = (1.23 \pm 0.03) \times 10^{36} \text{ erg s}^{-1}$  (Haggard et al. 2019), iaitu  $\sim 600$  kali lebih tinggi daripada luminositi senyapnya. Suar ini mempunyai dua puncak dan berlangsung selama  $\sim 5.7$  ks sebelum kembali kepada keadaan senyapnya. Haggard et al. (2019) juga mengesan suar sinar-X yang kedua paling terang pada 20 Oktober 2014 dengan luminositi,  $L_{2-10 \text{ keV, int}} = (4.91 \pm 0.15) \times 10^{35} \text{ erg s}^{-1}$ , iaitu  $\sim 245$  kali lebih tinggi daripada luminositi senyapnya dan berlangsung selama  $\sim 3.4$  ks.

Sehingga kini, proses fizikal di sebalik pancaran suar daripada Sgr A\* masih belum difahami sepenuhnya. Namun, suar ini telah dihipotesiskan terhasil daripada beberapa proses fizikal dan mekanisme. Antara proses fizikal yang dicadangkan ialah penyambungan semula medan magnet, renjatan jet lohong hitam menerusi penokokan bahan, dan peristiwa gangguan pasang surut disebabkan asteroid (Čadež, Calvani & Kostić 2008; Kostić et al. 2009; Liu, Petrosian & Melia 2004; Zubovas, Nayakshin & Markoff 2012). Manakala bagi mekanisme pula, antaranya ialah Compton songsang, Compton-kendiri sinkrotron dan sinkrotron langsung

(Dodds-Eden et al. 2009; Marrone et al. 2008; Yusef-Zadeh et al. 2012).

Kebanyakan kajian terdahulu terhadap Sgr A\* dalam panjang gelombang sinar-X telah memberi tumpuan kepada pengesanan peristiwa suar dan memahami proses fizikal di sebalik kejadian suar ini yang masih tidak jelas. Dalam kertas ini, kami akan menumpukan kepada analisis spektrum terhadap 143 pemerhatian sinar-X Sgr A\* yang dicerap oleh *Chandra* dari tahun 1999 hingga 2019 untuk menentukan ciri utama sinar-X objek tersebut, iaitu luminositi, ketumpatan gas dan debu (NH), dan indeks foton ( $\Gamma$ ). Ini bagi melihat evolusi pancaran sinar-X Sgr A\* sepanjang dua dekad pertama operasi *Chandra* dan menyiasat punca sebarang kebolehubahan yang ada melalui ciri utama yang ditentukan. Bagi mencapai matlamat ini, seluruh pemerhatian diambil kira tanpa memisahkan komponen suar dan komponen senyap. Ini berbeza daripada pendekatan kajian lepas dan kajian pemantauan sinar-X jangka panjang oleh Azizan, Abdul Hamid dan Annuar (2024), yang memisahkan komponen suar dan senyap untuk menganalisis perubahan dalam ciri spektrum sinar-X Sgr A\*. Pendekatan ini diharapkan dapat memberikan pandangan umum mengenai evolusi sinar-X Sgr A\* sepanjang tahun-tahun pemerhatian dan mungkin dapat mendedahkan peristiwa unik seperti kehadiran suar terang.

## KAEDAH KAJIAN

### PEMERHATIAN DAN PEMROSESAN DATA *CHANDRA*

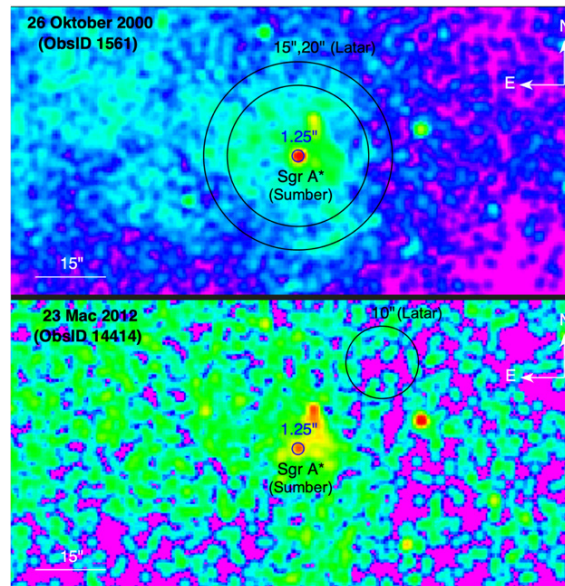
*Chandra* digunakan dalam kajian ini kerana resolusi pegimejannya yang tinggi, iaitu 0.5 arkasaat ( $''$ ). Keupayaan ini membolehkan penghasilan imej yang tajam dan jelas. Sgr A\* telah diperhatikan dengan tempoh dedahan selama 6.5 Ms ( $\sim 75$  hari) menggunakan instrumen *Advanced CCD Imaging Spectrometer (ACIS)* dari tahun 1999 hingga 2019, merangkumi sebanyak 143 pemerhatian. Dalam kertas ini, kami memberi tumpuan kepada pemerhatian hingga tahun 2019 untuk mengkaji evolusi sinar-X Sgr A\* selama dua puluh tahun, sejajar dengan Ulang Tahun ke-20 *Chandra*. Data yang digunakan dalam kajian ini telah diperolehi menggunakan pengesan *ACIS*, yang dikenali dengan resolusi imej dan spektrumnya yang bagus. Semua data mentah daripada 143 pemerhatian telah diperolehi dan dimuat turun daripada *High Energy Astrophysics Science Archive Research Center (HEASARC)* (<https://heasarc.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/W3Browse/w3browse.pl>), yang

berperanan sebagai arkib data utama untuk pelbagai misi bertenaga tinggi oleh *National Aeronautics and Space Administration (NASA)* dan agensi angkasa lain.

Kami telah menggunakan *Chandra Interactive Analysis of Observations (CIAO)* versi 4.12 dan pangkalan data kalibrasi (*CALDB*) versi 4.9.0 (Fruscione, Silva & Doxsey 2006) untuk memproses data mentah melalui skrip `CHANDRA_REPRO` dalam *CIAO*. Skrip ini bertujuan untuk memastikan data dikemaskini mengikut ubah suai kalibrasi yang terkini. Seterusnya, kami menggunakan skrip `DMCOPY` untuk menapis imej dalam julat tenaga 2 – 8 keV. Tujuannya adalah untuk mengurangkan pencemaran daripada sumber sinar-X lain yang biasanya mendominasi pada tenaga di bawah 2 keV (aktiviti bintang). Pada tahun 2013, satu letupan magnetar telah dikesan berhampiran Sgr A\*. Walau bagaimanapun, dalam analisis ini, kami tidak mempertimbangkan pencemaran daripada sumber tersebut kerana sumbangannya hanya kurang daripada  $\sim 3\%$  terhadap kawasan pengekstrakan Sgr A\* (Ponti et al. 2015).

### ANALISIS SPEKTRUM

Dalam bahagian ini, kami akan menerangkan prosedur analisis spektrum sinar-X bagi semua pemerhatian, serta model yang digunakan untuk menjelaskan ciri spektrum sinar-X Sgr A\*. Rajah 1 menunjukkan contoh bagaimana rantau sumber dan latar belakang pada imej sinar-X Sgr A\* dihasilkan dengan menggunakan perisian pengimejan astronomi dan visualisasi data, iaitu *SAO Image Deep Space 9 (SAOImageDS9)*; Joye & Mandel 2003). Rantau sumber diekstrak daripada bulatan dengan jejari 1.25'' yang berpusat pada kedudukan radio Sgr A\*, iaitu peningkatan kanan,  $R.A. = 17:45:40.0409$  dan keserongan,  $Dec. = 29:00:28.118$  (Reid & Brunthaler 2004). Kelebihan menggunakan saiz rantau sumber yang kecil ini adalah untuk mengurangkan pencemaran daripada sumber lain berdekatan dengan *SMBH*. Rantau latar belakang diekstrak menggunakan anulus dengan jejari 15'' (dalam) dan 20'' (luar) yang juga berpusat pada kedudukan yang sama dengan sumber. Tujuannya adalah untuk mengambil kira sumbangan latar belakang dalam spektrum yang diekstrak (Coti Zelati et al. 2017; Haggard et al. 2019). Sekiranya sumber sinar-X lain dikesan dalam kawasan anulus tersebut, satu bulatan dengan jejari 10'' atau 15'' digunakan untuk mengekstrak rantau latar belakang daripada kawasan yang bebas daripada sumber berdekatan Sgr A\*. Kemudian, spektrum diekstrak menggunakan skrip *CIAO*, iaitu `SPEXTRACT`.



RAJAH 1. Paparan contoh rantau sumber dan latar belakang menerusi perisian *SAOImageDS9* daripada dua pemerhatian berbeza yang digunakan untuk mengekstrak spektrum Sgr A\*

Selepas spektrum diekstrak, bilangan foton dibincang menggunakan skrip GRPPHA kepada sekurang-kurangnya 20 foton per bin bagi kiraan foton melebihi 200 untuk membenarkan penggunaan statistik  $\chi^2$ . Bagi kiraan foton kurang daripada 200, foton dibincang kepada sekurang-kurangnya 1 foton per bin dan kaedah statistik *Poisson C* (Cash 1979) digunakan untuk mengoptimalkan pemodelan.

#### PEMODELAN SPEKTRUM SINAR-X

Spektrum yang telah dibina kemudian dianalisis menggunakan *X-ray Spectral Fitting Package (XSPEC)* versi 12.10.1f (Arnaud 1996) daripada *High Energy Astrophysics Software (HEASoft)* versi 6.26.1. Spektrum sinar-X dianalisis menggunakan model yang terdiri daripada tiga komponen utama, iaitu *POWERLAW*, *TBNEW* dan *FGDUST*. Komponen model *POWERLAW* digunakan untuk mengukur kecerunan spektrum (iaitu, indeks foton,  $\Gamma$ ). Sementara itu, komponen model *TBNEW* digunakan untuk mengukur ketumpatan gas dan debu ( $N_H$ ) di sepanjang garis pandangan antara Bumi dan Sgr A\*. Hampir semua parameter *TBNEW* (selain  $N_H$ ) ditetapkan kepada nilai piawai. Ini termasuk keratan rentas kefotoionan daripada Verner et al. (1996) dan kelimpahan unsur daripada Wilms, Allen dan McCray (2000). Parameter anjakan merah ( $z$ ) pula ditetapkan kepada  $z = 1.89 \times 10^{-6}$  (Ghez et al. 2008).

Oleh kerana Bumi berada di paksi galaksi yang sama dengan Sgr A\*, garis pandangan terhadap Pusat Galaksi terlindung akibat lapisan tebal gas dan debu (serapan visual,  $A_V \sim 30$  magnitud dalam cahaya tampak dan UV; Morris & Serabyn 1996). Oleh itu, sinar-X yang dipancarkan oleh Sgr A\* boleh mengalami serakan yang memberi kesan terutamanya pada nilai  $N_H$  yang diperhatikan (Corrales et al. 2017, 2016; Jin et al. 2017; Smith, Valencic & Corrales 2016). Bagi mempertimbangkan serakan debu yang berlaku antara Bumi dan Pusat Galaksi semasa proses pemodelan spektrum, komponen model *FGDUST* (Jin et al. 2017) digunakan. Walaupun model ini asalnya dibangunkan untuk mengkaji dedua sinar-X (*X-ray binary*) AX J1745.6-2901 yang terletak di Pusat Galaksi, ia juga dapat digunakan untuk Sgr A\* kerana lokasinya yang berdekatan dengan objek tersebut (87''). Berikut adalah penerangan mengenai model asas yang digunakan dalam pencirian spektrum Sgr A\* dalam *XSPEC*, yang terdiri daripada tiga komponen utama:

$$\text{Model asas} = \text{FGDUST} \times \text{TBNW} \times \text{POWERLAW} \quad (1)$$

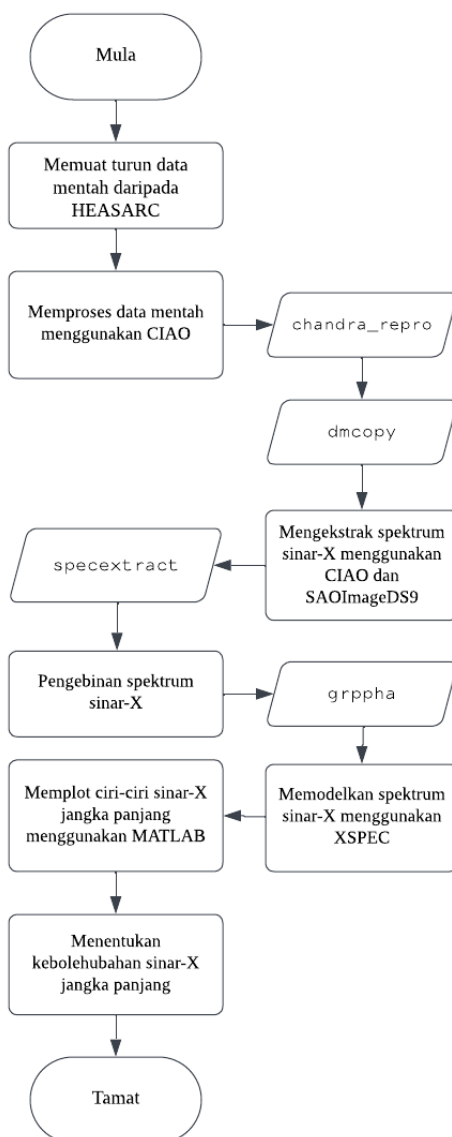
Kehadiran garis pancaran pada  $\sim 6.43$  keV menandakan kewujudan ferum (Fe)  $K\alpha$ , yang mencadangkan bahawa terdapat pengaburan signifikan terhadap *SMBH*. Jika garis ini terlihat dalam spektrum,

komponen GAUSSIAN ditambahkan kepada model asas untuk mensimulasikan garis pancaran ini. Parameter lebar garis pancaran ( $\sigma$ ) ditetapkan pada 0.05 keV.

Salah satu masalah yang sering dihadapi oleh *Chandra* dan teleskop sinar-X lain adalah *pileup*, iaitu dua atau lebih foton dikesan sebagai satu foton pada satu piksel peranti cas terdanding (CCD) yang mengakibatkan kadar kiraan foton yang lebih rendah daripada nilai sebenar. Ini boleh mempengaruhi indeks foton dan fluks yang diukur dalam pemodelan spektrum. Walau bagaimanapun, masalah ini boleh diatasi dengan memasukkan komponen model PILEUP (Davis 2001)

dalam pemodelan spektrum. Dalam kajian ini, kami menganggap bahawa kesan *pileup* menjadi signifikan apabila kadar kiraan foton bersih melebihi 0.04 kiraan  $s^{-1}$  (Ponti et al. 2015). Dua pemerhatian dalam kajian ini melebihi nilai ini, iaitu pada 14 September 2013 (ObsID 15043) dengan kadar kiraan,  $(6.88 \pm 0.12) \times 10^{-2}$  kiraan  $s^{-1}$  dan pada 19 Ogos 2019 (ObsID 20751) dengan kadar kiraan,  $(4.58 \pm 0.14) \times 10^{-2}$  kiraan  $s^{-1}$ . Carta alir yang dibentangkan dalam Rajah 2 meringkaskan analisis yang dilakukan dalam kajian ini.

Ciri sinar-X Sgr A\* seperti  $N_H$ ,  $\Gamma$  serta fluks ditentukan untuk semua 143 pemerhatian berdasarkan



RAJAH 2. Carta alir analisis

spektrum yang dimodelkan. Dua jenis fluks, iaitu fluks cerapan dan fluks intrinsik diperoleh melalui model konvolusi *cFLUX*. Fluks cerapan merujuk kepada fluks diterima yang boleh dipengaruhi oleh medium penyerapan (gas dan debu yang berada di antara Sgr A\* dengan Bumi). Sementara itu, fluks intrinsik adalah fluks sebenar yang tidak dipengaruhi oleh medium penyerapan. Setelah memperoleh kedua-dua nilai fluks ini, nilai luminositi intrinsik dan luminositi cerapan juga dihitung berdasarkan nilai fluks yang diperoleh. Ciri yang diukur kemudiannya digambarkan dalam bentuk graf untuk mengkaji evolusi mereka sepanjang dua dekad pertama misi *Chandra*.

## HASIL KAJIAN

### PEMODELAN SPEKTRUM SINAR-X

Hasil analisis yang dilakukan menunjukkan bahawa pemodelan spektrum berjaya memberikan padanan yang baik bagi sebahagian besar spektrum dengan nilai  $\chi^2$  dan statistik-C terkurang, iaitu nisbah antara  $\chi^2$  atau statistik-C dengan darjah kebebasan hampir dengan nilai 1. Namun, terdapat lima pemerhatian (~4%) tidak sejajar dengan model yang digunakan, memberikan nilai  $\chi^2$  melebihi 2. Untuk pemerhatian ini, bin foton dikurangkan kepada 1 kiraan foton per bin, walaupun pemerhatian ini mempunyai lebih daripada 200 kiraan, bagi melihat sama ada padanan yang lebih baik dapat diperoleh. Langkah ini berjaya menghasilkan padanan yang lebih baik dengan statistik-C/darjah kebebasan ~1. Oleh itu, hasil daripada padanan ini digunakan dalam analisis seterusnya.

Dalam pemodelan spektrum, kebanyakan nilai  $\Gamma$  dibiarkan sebagai parameter bebas. Walau bagaimanapun, 40 daripada spektrum sinar-X yang dimodelkan (~28%) menunjukkan nilai  $\Gamma$  yang tidak terhad, iaitu  $\Gamma > 3.0$ , melebihi nilai keadaan senyap (Nowak et al. 2012). Untuk pemerhatian ini, parameter  $\Gamma$  ditetapkan pada nilai purata indeks foton bagi *SMBH* aktif, iaitu  $\Gamma = 1.80$  (Ricci et al. 2017). Selain itu, nilai

$N_H$  bagi 58 pemerhatian (~41%) tidak dapat diukur sepenuhnya dan hanya memberikan nilai had atas ( $N_{H, \text{had atas}}$ ) atau had bawah ( $N_{H, \text{had bawah}}$ ). Sementara itu, 17 pemerhatian (~12%) menunjukkan garis pancaran dalam julat 6 dan 7 keV yang mencadangkan kewujudan garis ferum yang boleh menjadi bukti pengaburan yang ketara ke arah *SMBH* semasa pemerhatian tersebut. Namun begitu, nilai  $N_H$  yang diukur bagi pemerhatian ini agak rendah berbanding nilai yang dijangkakan. Ini mungkin mencadangkan bahawa nilai  $N_H$  yang diukur adalah lebih rendah daripada nilai sebenar. Salah satu faktor yang mungkin mempengaruhi perbezaan ini adalah kualiti data yang digunakan.

### EVOLUSI SINAR-X JANGKA PANJANG

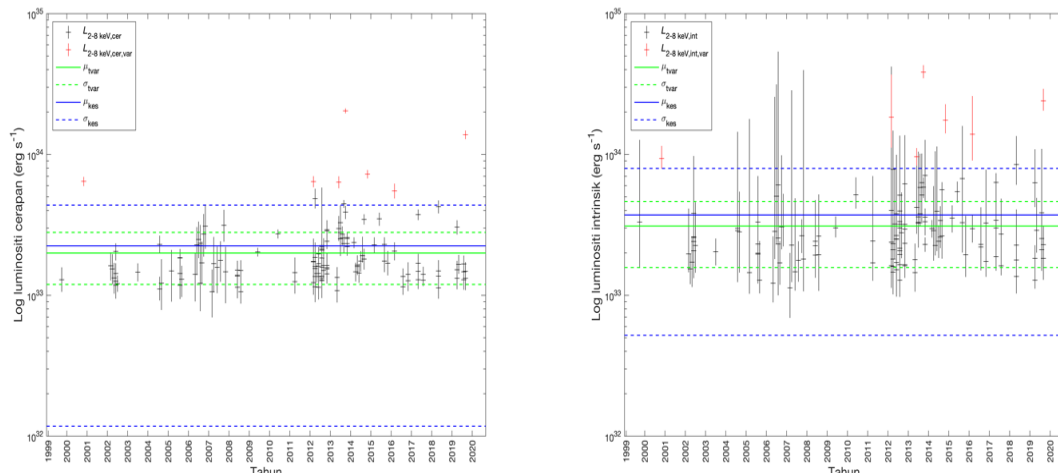
Tumpuan utama kertas kajian ini adalah untuk meneliti evolusi pancaran sinar-X Sgr A\* sepanjang dua dekad pertama operasi *Chandra* melalui ciri utama sinar-X, iaitu luminositi cerapan dan intrinsik ( $L_{2-8 \text{ keV, cer}}$  dan  $L_{2-8 \text{ keV, int}}$ ),  $N_H$  dan  $\Gamma$ . Jadual 1 merangkumi statistik ciri sinar-X Sgr A\* yang diperoleh daripada analisis ini.

Nilai purata ( $\mu$ ) bagi  $\Gamma$  dan  $N_H$  dibahagikan kepada dua, iaitu purata keseluruhan, ( $\Gamma_{\text{kes}}$  dan  $N_{H, \text{kes}}$ ), serta purata yang diukur yang mengecualikan pemerhatian dengan nilai  $\Gamma$  yang telah ditetapkan kepada 1.80 dan juga nilai  $N_{H, \text{had atas}}$  dan  $N_{H, \text{had bawah}}$ , ( $\Gamma_{\text{ukur}}$  dan  $N_{H, \text{ukur}}$ ). Nilai purata luminositi cerapan dan intrinsik juga dibahagikan kepada dua, iaitu purata luminositi cerapan dan intrinsik bagi keseluruhan pemerhatian ( $L_{2-8 \text{ keV, cer, kes}}$  &  $L_{2-8 \text{ keV, int, kes}}$ ) dan purata luminositi cerapan dan intrinsik tanpa pemerhatian yang menunjukkan kebolehubahan atau variasi ( $L_{2-8 \text{ keV, tvar}}$  &  $L_{2-8 \text{ keV, int, tvar}}$ ). Dalam kajian ini, kami menggunakan sisihan piawai ( $\sigma$ ) pada  $1\sigma$ , untuk mengenal pasti sebarang variasi yang signifikan pada ciri sinar-X.

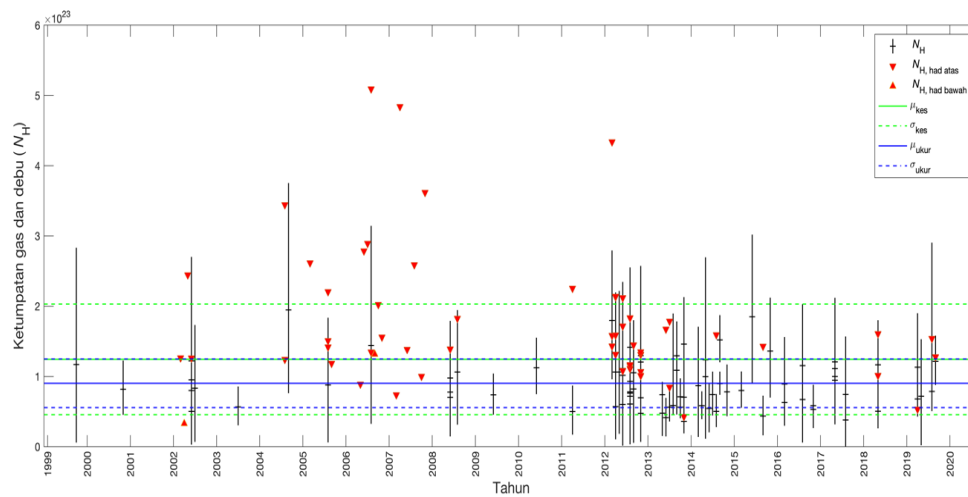
Ciri utama sinar-X Sgr A\* diplotkan sebagai fungsi tahun pemerhatian dalam Rajah 3, 4 dan 5. Rajah 3 menunjukkan lengkung cahaya cerapan dan intrinsik sebagai fungsi tahun pemerhatian. Manakala, Rajah 4 dan 5 pula menunjukkan  $N_H$  dan  $\Gamma$  sebagai fungsi tahun pemerhatian.

JADUAL 1. Statistik ciri sinar-X jangka panjang Sgr A\*

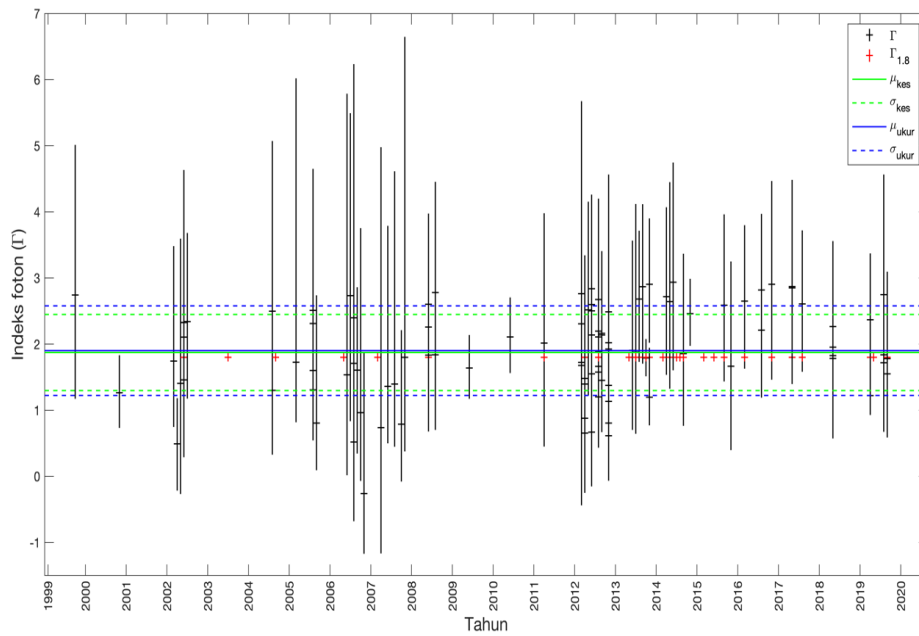
Ciri sinar-X	Unit	$\mu$	$\sigma$
$\Gamma_{\text{kes}}$	...	1.87	0.58
$\Gamma_{\text{ukur}}$	...	1.90	0.68
$N_{H, \text{kes}}$	$10^{23} \text{ cm}^{-2}$	1.24	0.79
$N_{H, \text{ukur}}$	$10^{23} \text{ cm}^{-2}$	0.90	0.35
$L_{2-8 \text{ keV, cer, kes}}$	$10^{33} \text{ erg s}^{-1}$	2.24	2.12
$L_{2-8 \text{ keV, int, kes}}$	$10^{33} \text{ erg s}^{-1}$	3.69	4.25
$L_{2-8 \text{ keV, cer, tvar}}$	$10^{33} \text{ erg s}^{-1}$	1.99	0.80
$L_{2-8 \text{ keV, int, tvar}}$		3.07	1.54



RAJAH 3. Lengkung cahaya sinar-X cerapan,  $L_{2-8 \text{ keV, cer}}$  (kiri) dan intrinsik,  $L_{2-8 \text{ keV, int}}$  (kanan) Sgr A\* dalam skala log pada julat tenaga 2 – 8 keV yang dicerap oleh *Chandra* dari tahun 1999 - 2019. Penanda + ialah luminositi (warna merah bagi cerapan yang menunjukkan sifat kebolehubahan atau variasi), garis lurus biru ialah nilai purata keseluruhan ( $\mu_{\text{kes}}$ ), garis putus-putus biru ialah nilai sisihan piawai keseluruhan ( $\sigma_{\text{kes}}$ ), garis lurus hijau ialah nilai purata tanpa pemerhatian yang menunjukkan variasi ( $\mu_{\text{var}}$ ) dan garis putus-putus hijau ialah nilai sisihan piawai tanpa pemerhatian yang menunjukkan variasi ( $\sigma_{\text{var}}$ ). Berdasarkan kedua-dua lengkung cahaya sinar-X cerapan dan intrinsik, terdapat 7 pemerhatian menunjukkan kebolehubahan yang jelas iaitu ketara daripada nilai  $\mu_{\text{kes}}$



RAJAH 4. Graf ketumpatan gas dan debu ( $N_{\text{H}}$ ) Sgr A\* yang dicerap oleh *Chandra* dari tahun 1999 - 2019. Penanda + ialah  $N_{\text{H}}$ , penanda  $\nabla$  merah ialah  $N_{\text{H}}$  had atas, penanda  $\Delta$  merah ialah  $N_{\text{H}}$  had bawah, garis lurus hijau ialah nilai purata keseluruhan ( $\mu_{\text{kes}}$ ), garis putus-putus hijau ialah nilai sisihan piawai keseluruhan ( $\sigma_{\text{kes}}$ ), garis lurus biru ialah nilai purata yang diukur ( $\mu_{\text{ukur}}$ ) dan garis putus-putus biru ialah nilai sisihan piawai yang diukur ( $\sigma_{\text{ukur}}$ ). Berdasarkan graf ini, nilai  $N_{\text{H}}$  Sgr A\* tidak menunjukkan sebarang perubahan yang ketara sepanjang 20 tahun



RAJAH 5. Graf indeks foton ( $\Gamma$ ) Sgr A\* yang dicerap oleh *Chandra* dari tahun 1999 – 2019. Penanda + ialah  $\Gamma$  (warna merah bagi  $\Gamma = 1.80$ ), garis lurus hijau ialah nilai purata keseluruhan ( $\mu_{kes}$ ), garis putus-putus hijau ialah nilai sisihan piawai keseluruhan ( $\sigma_{kes}$ ), garis lurus biru ialah nilai purata yang diukur ( $\mu_{ukur}$ ), dan garis putus-putus biru ialah nilai sisihan piawai yang diukur ( $\sigma_{ukur}$ ). Berdasarkan graf ini, nilai  $\Gamma$  Sgr A\* tidak menunjukkan sebarang perubahan yang ketara sepanjang 20 tahun

Rajah 3 (kiri) memaparkan lengkung cahaya sinar-X cerapan Sgr A\* dari tahun 1999 hingga 2019. Secara amnya, pancaran sinar-X cerapan Sgr A\* berada dalam keadaan stabil, dengan  $L_{2-8 \text{ keV, cer, kes}} = (2.24 \pm 2.12) \times 10^{33} \text{ erg s}^{-1}$ . Walau bagaimanapun, terdapat tujuh pemerhatian ( $\sim 5\%$ ) yang melebihi nilai purata keseluruhan apabila mengambil kira ralat dan sisihan piawai. Apabila tujuh pemerhatian yang menunjukkan kebolehubahan ini dikecualikan, purata luminositi cerapan adalah  $L_{2-8 \text{ keV, cer, tvar}} = (1.99 \pm 0.80) \times 10^{33}$ . Antara tujuh pemerhatian ini, pemerhatian pada 14 September 2013 mencatatkan luminositi tertinggi,  $L_{2-8 \text{ keV, cer}} = (2.04 \pm 0.08) \times 10^{34} \text{ erg s}^{-1}$ , diikuti dengan pemerhatian pada 19 Ogos 2019 dengan  $L_{2-8 \text{ keV, int, cer}} = (1.38 \pm 0.01) \times 10^{34} \text{ erg s}^{-1}$ . Perincian lanjut mengenai tujuh pemerhatian ini boleh dirujuk dalam Jadual 2.

Sementara itu, Rajah 3 (kanan) memaparkan lengkung cahaya sinar-X intrinsik Sgr A\* dalam jangka masa yang sama. Dalam rajah ini, pancaran sinar-X intrinsik Sgr A\* juga secara amnya berada dalam keadaan stabil, dengan  $L_{2-8 \text{ keV, int, kes}} = (3.69 \pm 4.25) \times 10^{33} \text{ erg s}^{-1}$ . Nilai ini selari dengan luminositi purata

yang dihitung bagi luminositi purata cerapan dalam julat ketidakpastiannya. Walau bagaimanapun, sifat kebolehubahan boleh dilihat dalam tujuh pemerhatian ( $\sim 5\%$ ) yang melebihi nilai purata apabila mengambil kira ralat dan sisihan piawai. Pemerhatian ini adalah sama dengan tujuh pemerhatian yang dikenal pasti dalam lengkung cahaya cerapan. Apabila tujuh pemerhatian yang menunjukkan kebolehubahan ini dikecualikan, purata luminositi intrinsik adalah  $L_{2-8 \text{ keV, int, tvar}} = (3.07 \pm 1.54) \times 10^{33}$ . Antara tujuh pemerhatian ini, pemerhatian yang direkodkan pada 14 September 2013 mempunyai luminositi tertinggi,  $L_{2-8 \text{ keV, int}} = 3.84^{+0.46}_{-0.37} \times 10^{34} \text{ erg s}^{-1}$ , diikuti oleh pemerhatian yang direkodkan pada 19 Ogos 2019 dengan luminositi,  $L_{2-8 \text{ keV, int}} = 2.40^{+0.52}_{-0.36} \times 10^{34} \text{ erg s}^{-1}$ .

Berdasarkan analisis ini, kami mendapati bahawa pemerhatian pada 14 September 2013 mempunyai luminositi cerapan dan intrinsik tertinggi. Ini selari dengan luminositi suar tertinggi yang dilaporkan oleh Haggard et al. (2019). Pemerhatian pada 19 Ogos 2019 pula mencatatkan luminositi kedua tertinggi yang diukur. Terdapat dua teori utama yang mencadangkan



punca peningkatan dalam luminositi ini. Pertama, kemungkinan adanya asteroid yang mendekati Sgr A\* dan dihancurkan oleh daya gravitinya yang kuat. Teori kedua pula mencadangkan bahawa garisan medan magnet yang terpintal dalam aliran gas menuju Sgr A\* mungkin mengalami penyusunan semula, menyebabkan pelepasan sinar-X yang terang (Haggard et al. 2015).

Beberapa faktor yang boleh menyumbang kepada variasi dalam tujuh pemerhatian pada lengkung cahaya sinar-X cerapan dan intrinsik termasuk perubahan dalam nilai ketumpatan gas dan debu di antara Bumi dan Sgr A\* ( $N_H$ ), serta perubahan dalam kadar penokokan bahan terhadap lohong hitam Sgr A\* yang boleh dilihat melalui perubahan dalam nilai indeks foton ( $\Gamma$ ). Berdasarkan Rajah 4, nilai  $N_H$  (keseluruhan dan diukur) bagi kesemua 143 cerapan menunjukkan tiada perubahan yang signifikan dalam kadar pengaburan antara Bumi dan Sgr A\* sepanjang 20 tahun pencerapan. Nilai purata yang diperoleh adalah  $N_{H \text{ kes}} = 1.24 \pm 0.79 \times 10^{23}$  dan  $N_{H \text{ ukur}} = 0.90 \pm 0.35 \times 10^{23}$ . Kedua-dua nilai purata ini adalah

tekal antara satu sama lain dalam julat ralat ( $1\sigma$ ). Peratus perbezaan ( $\% \Delta$ ) antara nilai  $N_H$  bagi tujuh pemerhatian yang menunjukkan kebolehubahan dan purata  $N_H$  keseluruhan dan ukur, seperti yang dilihat dalam Jadual 2, tidak menunjukkan nilai yang signifikan ( $<20\%$ ). Ini menandakan bahawa kebolehubahan dalam luminositi bagi pemerhatian ini tidak berkait dengan  $N_H$ .

Berdasarkan Rajah 5, nilai  $\Gamma$  (keseluruhan dan diukur) bagi kesemua 143 cerapan mencadangkan tiada perubahan kadar penokokan bahan terhadap lohong hitam Sgr A\* sepanjang 20 tahun pencerapan. Nilai purata yang diperoleh adalah  $\Gamma_{\text{kes}} = 1.87 \pm 0.5$  dan  $\Gamma_{\text{ukur}} = 1.90 \pm 0.6$ . Kedua-dua nilai purata ini adalah tekal antara satu sama lain dalam julat ralat ( $1\sigma$ ). Peratus perbezaan ( $\% \Delta$ ) antara nilai  $\Gamma$  bagi tujuh pemerhatian yang menunjukkan kebolehubahan dan purata  $\Gamma$  keseluruhan dan ukur seperti yang dilihat dalam Jadual 2 tidak menunjukkan nilai yang signifikan ( $\lesssim 10\%$ ). Ini menandakan bahawa kebolehubahan dalam luminositi bagi pemerhatian ini tidak berkait dengan  $\Gamma$ .

JADUAL 2. Cerapan yang menunjukkan sifat kebolehubahan menerusi lengkung cahaya sinar-X cerapan dan intrinsik jangka panjang Sgr A\*

ObsID	Tarikh (hh/bb/tttt)	$N_H$ ( $10^{23} \text{ cm}^{-2}$ )	$\% \Delta$ $N_{H \text{ kes}}$	$\% \Delta$ $N_{H \text{ ukur}}$	$\Gamma$	$\% \Delta$ $\Gamma_{\text{kes}}$	$\% \Delta$ $\Gamma_{\text{ukur}}$	$L_{2-8 \text{ keV, cer}}$ ( $10^{33} \text{ erg s}^{-1}$ )	$L_{2-8 \text{ keV, int}}$ ( $10^{33} \text{ erg s}^{-1}$ )
1561	26/10/2000	$0.82^{+0.40}_{-0.36}$	10.35	2.87	$1.26^{+0.57}_{-0.53}$	9.78	10.14	$6.44^{+0.49}_{-0.48}$	$9.36^{+2.14}_{-1.41}$
14392	09/02/2012	$1.80^{+1.00}_{-0.84}$	9.05	16.18	$2.76^{+1.03}_{-0.89}$	9.57	9.21	$6.42^{+0.59}_{-0.57}$	$18.40^{+18.50}_{-7.24}$
14702	12/05/2013	$0.74^{+0.18}_{-0.17}$	12.78	5.42	1.80 $f$	0.99	1.37	$6.35^{+0.65}_{-0.60}$	$9.64^{+1.47}_{-1.30}$
15043	14/09/2013	$1.30^{+0.19}_{-0.18}$	1.02	8.56	$1.79^{+0.29}_{-0.28}$	1.13	1.51	$20.40 \pm 0.83$	$38.40^{+4.59}_{-3.65}$
16218	20/10/2014	$1.52^{+0.35}_{-0.32}$	4.91	12.30	$2.46^{+0.53}_{-0.49}$	6.77	6.40	$7.25 \pm 0.50$	$17.50^{+5.25}_{-3.39}$
18055	13/02/2016	$1.36^{+0.76}_{-0.66}$	2.14	9.65	$2.65^{+1.15}_{-1.02}$	8.59	8.22	$5.51^{+0.70}_{-0.64}$	$13.90^{+12.10}_{-4.85}$
20751	19/08/2019	$1.21^{+0.37}_{-0.34}$	0.78	6.81	$1.55^{+0.51}_{-0.49}$	4.72	5.09	$13.80^{+0.98}_{-0.96}$	$24.0^{+5.22}_{-3.56}$

## PERBINCANGAN

Secara amnya, Sgr A\* menunjukkan kestabilan dalam kedua-dua lengkung cahaya sinar-X cerapan dan intrinsik kecuali bagi tujuh pemerhatian yang menunjukkan kebolehubahan sepanjang 20 tahun pemerhatian *Chandra*. Walaupun ketidakpastian nisbah bagi  $L_{2-8 \text{ keV, cer, kes}}$  dan  $L_{2-8 \text{ keV, int, kes}}$  dan dalam kajian ini adalah tinggi (hampir 100%; Jadual 1), ini selari dengan keputusan kajian lepas yang juga menunjukkan nilai yang signifikan (~80%; Neilsen et al. 2013). Umumnya, lohong hitam yang mengalami penokokan boleh mempunyai variasi yang mencapai sehingga dua urutan magnitud. Contohnya, variasi ini dapat dilihat pada NGC 4258 dan ESO 121-G6 yang menunjukkan kebolehubahan dalam jangka masa yang panjang (Annuar et al. 2020; Reynolds et al. 2000). Dengan demikian, jika dibandingkan dengan objek-objek ini, Sgr A\* menunjukkan kestabilan dalam luminositi cerapan dan intrinsiknya.

Apabila membandingkan nilai luminositi cerapan dan intrinsik, luminositi intrinsik adalah lebih tinggi daripada luminositi cerapan. Ini berlaku kerana sebahagian foton sinar-X diserap oleh gas dan debu yang menyebabkan nilai luminositi cerapan menjadi lebih rendah daripada nilai intrinsiknya. Hasilnya, pengukuran luminositi intrinsik ini seringkali memberikan ketidakpastian yang besar. Tambahan pula, purata luminositi intrinsik adalah ~ dua kali ganda daripada purata luminositi cerapan. Namun, kedua-dua purata ini sebenarnya tekal dalam julat ralat ( $1\sigma$ ).

Tambahan pula, perbezaan yang ketara antara tujuh set data yang menunjukkan kebolehubahan dalam lengkung cahaya sinar-X cerapan dan intrinsik mungkin mencadangkan terdapat penyerapan yang signifikan terhadap pancaran sinar-X dari Sgr A\*. Namun begitu, sepanjang tempoh pemerhatian, purata bagi kedua-dua pengukuran  $N_H$  adalah tekal dalam julat ralat ( $1\sigma$ ). Ini menunjukkan bahawa tiada perubahan signifikan dalam pengaburan terhadap Sgr A\*. Selain itu, peratus perbezaan antara nilai  $N_H$  bagi tujuh pemerhatian yang menunjukkan kebolehubahan dan purata  $N_H$  keseluruhan dan ukur juga tidak memberikan nilai yang besar. Oleh itu,  $N_H$  tidak boleh dianggap sebagai punca kebolehubahan dalam lengkung cahaya sinar-X cerapan dan intrinsik yang diperhatikan. Purata bagi kedua-dua pengukuran  $\Gamma$  juga adalah tekal dalam julat ralat ( $1\sigma$ ), menandakan bahawa perubahan dalam kadar penokokan bahan ke dalam lohong hitam tersebut

tidak ketara sepanjang 20 tahun pemerhatian. Peratus perbezaan antara nilai  $\Gamma$  bagi tujuh pemerhatian yang menunjukkan kebolehubahan dan purata  $\Gamma$  keseluruhan dan ukur juga tidak memberikan nilai yang besar. Oleh itu,  $\Gamma$  juga tidak boleh dianggap sebagai punca kebolehubahan yang diperhatikan. Ini menggambarkan bahawa pengaburan atau kadar penokokan Sgr A\* tidak mengalami perubahan yang ketara sepanjang pemerhatian dan faktor yang bertanggungjawab terhadap kebolehubahan dalam luminositi yang diperhatikan masih belum jelas. Analisis tambahan dalam pengesanan suar bagi setiap pemerhatian dan pencirian terpisah bagi setiap suar dan komponen senyap telah dilakukan untuk memberikan pandangan yang lebih terperinci terhadap sifat sinar-X Sgr A\* dalam tempoh dua dekad yang lalu (Azizan, Abdul Hamid & Annuar 2024). Namun, kajian ini juga tidak dapat memberikan penjelasan dalam kebolehubahan yang diperhatikan. Dalam usaha untuk terus memahami pancaran Sgr A\*, kajian masa hadapan yang dicadangkan ialah melibatkan kempen pemerhatian Sgr A\* pada panjang gelombang yang berbeza. Ini bertujuan untuk mengesan sebarang peningkatan dalam luminositi yang serupa lalu membolehkan kajian yang lebih terperinci terhadap pancaran lohong hitam ini.

## KESIMPULAN

Kesimpulannya, kami telah membentangkan 143 pemerhatian *Chandra* terhadap Sgr A\* yang dijalankan dari tahun 1999 hingga 2019. Spektrum yang diperoleh daripada setiap pemerhatian telah dianalisis untuk menentukan ciri utama sinar-X, iaitu  $N_H$ ,  $\Gamma$  dan luminositi. Tujuannya adalah untuk mengkaji evolusi pancaran sinar-X Sgr A\* secara umum sepanjang dua dekad pertama operasi *Chandra*. Keseluruhannya, Sgr A\* menunjukkan kestabilan dengan purata luminositi intrinsik,  $L_{2-8 \text{ keV, int}} = (3.69 \pm 4.25) \times 10^{33} \text{ erg s}^{-1}$ . Nilai ini selaras dengan purata luminositi cerapan sepanjang tempoh yang sama,  $L_{2-8 \text{ keV, cer}} = (2.24 \pm 2.12) \times 10^{33} \text{ erg s}^{-1}$ . Walau bagaimanapun, terdapat tujuh pemerhatian (~5%) yang melebihi nilai purata secara ketara. Sementara itu, nilai  $N_H$  dan  $\Gamma$  sepanjang semua pemerhatian, termasuk pemerhatian tersebut, menunjukkan ketekalan dengan nilai purata yang telah diukur,  $N_{H \text{ ukur}} = 0.90 \pm 0.35 \times 10^{23} \text{ cm}^{-2}$  dan  $\Gamma_{\text{ukur}} = 1.90 \pm 0.6$ . Ini menandakan bahawa variasi yang diperhatikan dalam nilai luminositi mungkin bukan disebabkan oleh pengaburan atau perubahan ketara dalam kadar penokokan. Dalam kajian ini, kami berjaya mengenal

pasti luminositi sinar-X tertinggi Sgr A\* yang berlaku pada 14 September 2013,  $L_{2-8 \text{ keV, int}} = 3.84_{-0.37}^{+0.46} \times 10^{34} \text{ erg s}^{-1}$ . Keputusan ini selari dengan suar sinar-X paling terang yang pernah dikesan sebelum ini pada tarikh yang sama. Selain itu, kajian ini juga mengenal pasti luminositi sinar-X kedua tertinggi yang berlaku pada 19 Ogos 2019 dengan luminositi yang diukur,  $L_{2-8 \text{ keV, int}} = 2.40_{-0.36}^{+0.52} \times 10^{34} \text{ erg s}^{-1}$ . Azizan, Abdul Hamid dan Annuar (2024) membentangkan analisis lanjut dalam pengesanan suar bagi setiap pemerhatian, serta pencirian bagi setiap suar dan komponen senyap secara berasingan.

#### PENGHARGAAN

Penulis merakamkan penghargaan kepada Geran Universiti Penyelidikan Universiti Kebangsaan Malaysia dengan Kod Geran GUP-2023-033 atas pembiayaan kajian ini. Hasil kajian saintifik yang dilaporkan dalam kertas ini berdasarkan pemerhatian yang dijalankan oleh Balai Cerap Sinar-X *Chandra* dan data yang diperolehi daripada *Chandra Data Archive*. Penyelidikan ini telah menggunakan perisian yang disediakan oleh *Chandra X-ray Center (CXC)* dalam pakej perisian *CIAO*.

#### RUJUKAN

- Annuar, A., Alexander, D.M., Gandhi, P., Lansbury, G.B., Asmus, D., Baloković, M., Ballantyne, D.R., Bauer, F.E., Boorman, P.G., Brandt, W.N. & Brightman, M. 2020. NuSTAR observations of four nearby X-ray faint AGNs: low luminosity or heavy obscuration? *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 497(1): 229-245.
- Arnaud, K.A. 1996. XSPEC: The first ten years. *Astronomical Data Analysis Software and Systems V, Astronomical Society of the Pacific Conference Series*. hlm. 17.
- Azizan, A., Abdul Hamid, M.E. & Annuar, A. 2024. *Chandra* X-ray observatory 20-year view of Sagittarius A\*: Flares and quiescent state properties. *Jurnal Fizik Malaysia* 45(1): 10001-10009.
- Baganoff, F.K., Bautz, M.W., Brandt, W.N., Chartas, G., Feigelson, E.D., Garmire, G.P., Maeda, Y., Morris, M., Ricker, G.R., Townsley, L.K. & Walter, F. 2001. Rapid X-ray flaring from the direction of the supermassive black hole at the Galactic Centre. *Nature* 413(6851): 45-48.
- Baganoff, F.K., Maeda, Y., Morris, M., Bautz, M.W., Brandt, W.N., Cui, W., Doty, J.P., Feigelson, E.D., Garmire, G.P., Pravdo, S.H. & Ricker, G.R. 2003. *Chandra* X-ray spectroscopic imaging of Sagittarius A\* and the central parsec of the galaxy. *The Astrophysical Journal* 591(2): 891.
- Barrière, N.M., Tomsick, J.A., Baganoff, F.K., Boggs, S.E., Christensen, F.E., Craig, W.W., Dexter, J., Grefenstette, B., Hailey, C.J., Harrison, F.A. & Madsen, K.K. 2014. NuSTAR detection of high-energy X-ray emission and rapid variability from Sagittarius A\* flares. *The Astrophysical Journal* 786(1): 46.
- Bland-Hawthorn, J., Maloney, P.R., Sutherland, R., Groves, B., Guglielmo, M., Li, W., Curzons, A., Cecil, G. & Fox, A.J. 2019. The large-scale ionization cones in the Galaxy. *The Astrophysical Journal* 886(1): 45.
- Čadež, A., Calvani, M. & Kostić, U. 2008. On the tidal evolution of the orbits of low-mass satellites around black holes. *Astronomy & Astrophysics* 487(2): 527-532.
- Canizares, C.R., Davis, J.E., Dewey, D., Flanagan, K.A., Galton, E.B., Huenemoerder, D.P., Ishibashi, K., Markert, T.H., Marshall, H.L., McGuirk, M. & Schattenburg, M.L. 2005. The *Chandra* high-energy transmission grating: Design, fabrication, ground calibration, and 5 years in flight. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific* 117(836): 1144.
- Cash, W. 1979. Parameter estimation in astronomy through application of the likelihood ratio. *Astrophysical Journal* 228(1): 939-947.
- Cecil, G., Wagner, A.Y., Bland-Hawthorn, J., Bicknell, G.V. & Mukherjee, D. 2021. Tracing the Milky Way's vestigial nuclear jet. *The Astrophysical Journal* 922(2): 254.
- Corrales, L.R., Mon, B., Haggard, D., Baganoff, F.K., Garmire, G., Degenaar, N. & Reynolds, M. 2017. The *Chandra* dust-scattering halo of galactic center transient swift J174540.7-290015. *The Astrophysical Journal* 839(2): 76.
- Corrales, L.R., García, J., Wilms, J. & Baganoff, F.K. 2016. The dust-scattering component of X-ray extinction: Effects on continuum fitting and high-resolution absorption edge structure. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 458(2): 1345-1351.
- Coti Zelati, F., Rea, N., Turolla, R., Pons, J.A., Papitto, A., Esposito, P., Israel, G.L., Campana, S., Zane, S., Tiengo, A. & Mignani, R.P. 2017. *Chandra* monitoring of the Galactic Centre magnetar SGR J1745-2900 during the initial 3.5 years of outburst decay. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 471(2): 1819-1829.
- Davis, J.E. 2001. Event pileup in charge-coupled devices. *The Astrophysical Journal* 562(1): 575.
- Dodds-Eden, K., Porquet, D., Trap, G., Quataert, E., Haubois, X., Gillessen, S., Grosso, N., Pantin, E., Falcke, H., Rouan, D. & Genzel, R. 2009. Evidence for X-ray synchrotron emission from simultaneous mid-infrared to x-ray observations of a strong Sgr A\* flare. *The Astrophysical Journal* 698(1): 676.
- Falcke, H. & Markoff, S.B. 2013. Toward the event horizon - the supermassive black hole in the Galactic Center. *Classical and Quantum Gravity* 30(24): 244003.

- Fruscione, A., Silva, D.R. & Doxsey, R.E. 2006. CIAO: *Chandra's* data analysis system. *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*. hlm. 586-597.
- Ghez, A.M., Salim, S., Weinberg, N.N., Lu, J.R., Do, T., Dunn, J.K., Matthews, K., Morris, M.R., Yelda, S., Becklin, E.E. & Kremenek, T. 2008. Measuring distance and properties of the Milky Way's central supermassive black hole with stellar orbits. *The Astrophysical Journal* 689(2): 1044.
- Gillessen, S., Eisenhauer, F., Fritz, T.K., Bartko, H., Dodds-Eden, K., Pfuhl, O., Ott, T. & Genzel, R. 2009. The orbit of the star S2 around SGR A\* from very large telescope and keck data. *The Astrophysical Journal* 707(2): L114.
- Goldwurm, A., Brion, E., Goldoni, P., Ferrando, P., Daigne, F., Decourchelle, A., Warwick, R.S. & Predehl, P. 2003. A new X-ray flare from the galactic nucleus detected with the XMM-Newton photon imaging cameras. *The Astrophysical Journal* 584(2): 751.
- Gravity Collaboration, Abuter, R., Aymar, N., Amorim, A., Ball, J., Bauböck, M., Berger, J.P., Bonnet, H., Bourdarot, G., Brandner, W., Cardoso, V. & Clénet, Y. 2022. Mass distribution in the Galactic Center based on interferometric astrometry of multiple stellar orbits. *Astronomy & Astrophysics* 657: L12.
- Haggard, D., Nynka, M., Mon, B., de la Cruz Hernandez, N., Nowak, M., Heinke, C., Neilsen, J., Dexter, J., Fragile, P.C., Baganoff, F.K. & Bower, G.C. 2019. *Chandra* spectral and timing analysis of Sgr A\*'s brightest x-ray flares. *The Astrophysical Journal* 886(2): 96.
- Haggard, D., Baganoff, F.K., Ponti, G., Heinke, C., Rea, N., Neilsen, J., Nowak, M., Markoff, S., Degenaar, N., Yusef-Zadeh, F., Roberts, D.A., Brinkerink, C., Law, C.J., Gillessen, S. & Connors, R. 2015. An update on *Chandra*/VLA galactic center campaigns targeting Sgr A\* and G2. *225<sup>th</sup> Meeting of the American Astronomical Society*, Washington, January 4-8.
- Jin, C., Ponti, G., Haberl, F. & Smith, R. 2017. Probing the interstellar dust towards the Galactic Centre: Dust-scattering halo around AX J1745. 6– 2901. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 468(3): 2532-2551.
- Joye, W.A. & Mandel, E. 2003. New features of SAOImage DS9. *Astronomical Data Analysis Software and Systems XII* 295: 489.
- Kostić, U., Čadež, A., Calvani, M. & Gomboc, A. 2009. Tidal effects on small bodies by massive black holes. *Astronomy & Astrophysics* 496(2): 307-315.
- Liu, S., Petrosian, V. & Melia, F. 2004. Electron acceleration around the supermassive black hole at the Galactic Center. *The Astrophysical Journal* 611(2): L101.
- Marin, F., Churazov, E., Khabibullin, I., Ferrazzoli, R., Di Gesu, L., Barnouin, T., Di Marco, A., Middei, R., Vikhlinin, A., Costa, E. & Soffitta, P. 2023. X-ray polarization evidence for a 200-year-old flare of Sgr A. *Nature* 619: 41-55.
- Marrone, D.P., Baganoff, F.K., Morris, M.R., Moran, J.M., Ghez, A.M., Hornstein, S.D., Dowell, C.D., Muñoz, D.J., Bautz, M.W., Ricker, G.R. & Brandt, W.N. 2008. An X-ray, infrared, and submillimeter flare of Sagittarius A. *The Astrophysical Journal* 682(1): 373.
- Morris, M. & Serabyn, E. 1996. The galactic center environment. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* 34(1): 645-701.
- Mossoux, E., Grosso, N., Vincent, F.H. & Porquet, D. 2015. Study of the X-ray activity of Sagittarius A\* during the 2011 XMM-Newton campaign. *Astronomy & Astrophysics* 573: A46.
- Neilsen, J., Nowak, M.A., Gammie, C., Dexter, J., Markoff, S., Haggard, D., Nayakshin, S., Wang, Q.D., Grosso, N., Porquet, D. & Tomsick, J.A. 2013. A *Chandra*/HETGS census of X-ray variability from Sgr A\* during 2012. *The Astrophysical Journal* 774(1): 42.
- Nowak, M.A., Neilsen, J., Markoff, S.B., Baganoff, F.K., Porquet, D., Grosso, N., Levin, Y., Houck, J., Eckart, A., Falcke, H. & Ji, L. 2012. *Chandra*/HETGS observations of the brightest flare seen from Sgr A. *The Astrophysical Journal*: 759(2): 95.
- Ponti, G., De Marco, B., Morris, M.R., Merloni, A., Munoz-Darias, T., Clavel, M., Haggard, D., Zhang, S., Nandra, K., Gillessen, S. & Mori, K. 2015. Fifteen years of XMM-Newton and *Chandra* monitoring of Sgr A\*: Evidence for a recent increase in the bright flaring rate. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 454(2): 1525-1544.
- Porquet, D., Grosso, N., Predehl, P., Hasinger, G., Yusef-Zadeh, F., Aschenbach, B., Trap, G., Melia, F., Warwick, R.S., Goldwurm, A. & Bélanger, G. 2008. X-ray hiccups from Sagittarius A\* observed by XMM-Newton - The second brightest flare and three moderate flares caught in half a day. *Astronomy & Astrophysics* 488(2): 549-557.
- Porquet, D., Predehl, P., Aschenbach, B., Grosso, N., Goldwurm, A., Goldoni, P., Warwick, R.S. & Decourchelle, A. 2003. XMM-Newton observation of the brightest X-ray flare detected so far from Sgr A. *Astronomy & Astrophysics* 407(1): L17-L20.
- Reid, M.J. & Brunthaler, A. 2004. The proper motion of Sagittarius A\*. II. The mass of Sagittarius A. *The Astrophysical Journal* 616(2): 872.
- Reynolds, C.S., Nowak, M.A. & Maloney, P.R., 2000. A deep X-ray observation of NGC 4258 and its surrounding field. *The Astrophysical Journal* 540(1): 143.
- Ricci, C., Trakhtenbrot, B., Koss, M.J., Ueda, Y., Del Vecchio, I., Treister, E., Schawinski, K., Paltani, S., Oh, K., Lamperti, I. & Berney, S. 2017. BAT AGN spectroscopic survey. V. X-ray properties of the Swift/BAT 70-month AGN catalog. *The Astrophysical Journal Supplement Series* 233(2): 17.

- Smith, R.K., Valencic, L.A. & Corrales, L. 2016. The impact of accurate extinction measurements for X-ray spectral models. *The Astrophysical Journal* 818(2): 143.
- Su, M., Slatyer, T.R. & Finkbeiner, D.P. 2010. Giant gamma-ray bubbles from Fermi-LAT: active galactic nucleus activity or bipolar galactic wind? *The Astrophysical Journal* 724(2): 1044.
- Verner, D.A., Ferland, G.J., Korista, K.T. & Yakovlev, D.G. 1996. Atomic data for astrophysics. II. New analytic fits for photoionization cross sections of atoms and ions. *The Astrophysical Journal* 465(1): 487.
- Wilms, J., Allen, A. & McCray, R. 2000. On the absorption of X-rays in the interstellar medium. *The Astrophysical Journal* 542(2): 914.
- Yusef-Zadeh, F., Wardle, M., Dodds-Eden, K., Heinke, C.O., Gillessen, S., Genzel, R., Bushouse, H., Grosso, N. & Porquet, D. 2012. An inverse Compton scattering origin of X-ray flares from Sgr A. *The Astronomical Journal* 144(1): 1.
- Zhang, S., Baganoff, F.K., Ponti, G., Neilsen, J., Tomsick, J.A., Dexter, J., Clavel, M., Markoff, S., Hailey, C.J., Mori, K. & Barrière, N.M. 2017. Sagittarius high-energy X-Ray flare properties during NuStar monitoring of the Galactic Center from 2012 to 2015. *The Astrophysical Journal* 843(2): 96.
- Zubovas, K., Nayakshin, S. & Markoff, S. 2012. Sgr A\* flares: Tidal disruption of asteroids and planets? *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 421(2): 1315-1324.

\*Pengarang untuk surat-menyurat; email: adlyka@ukm.edu.my