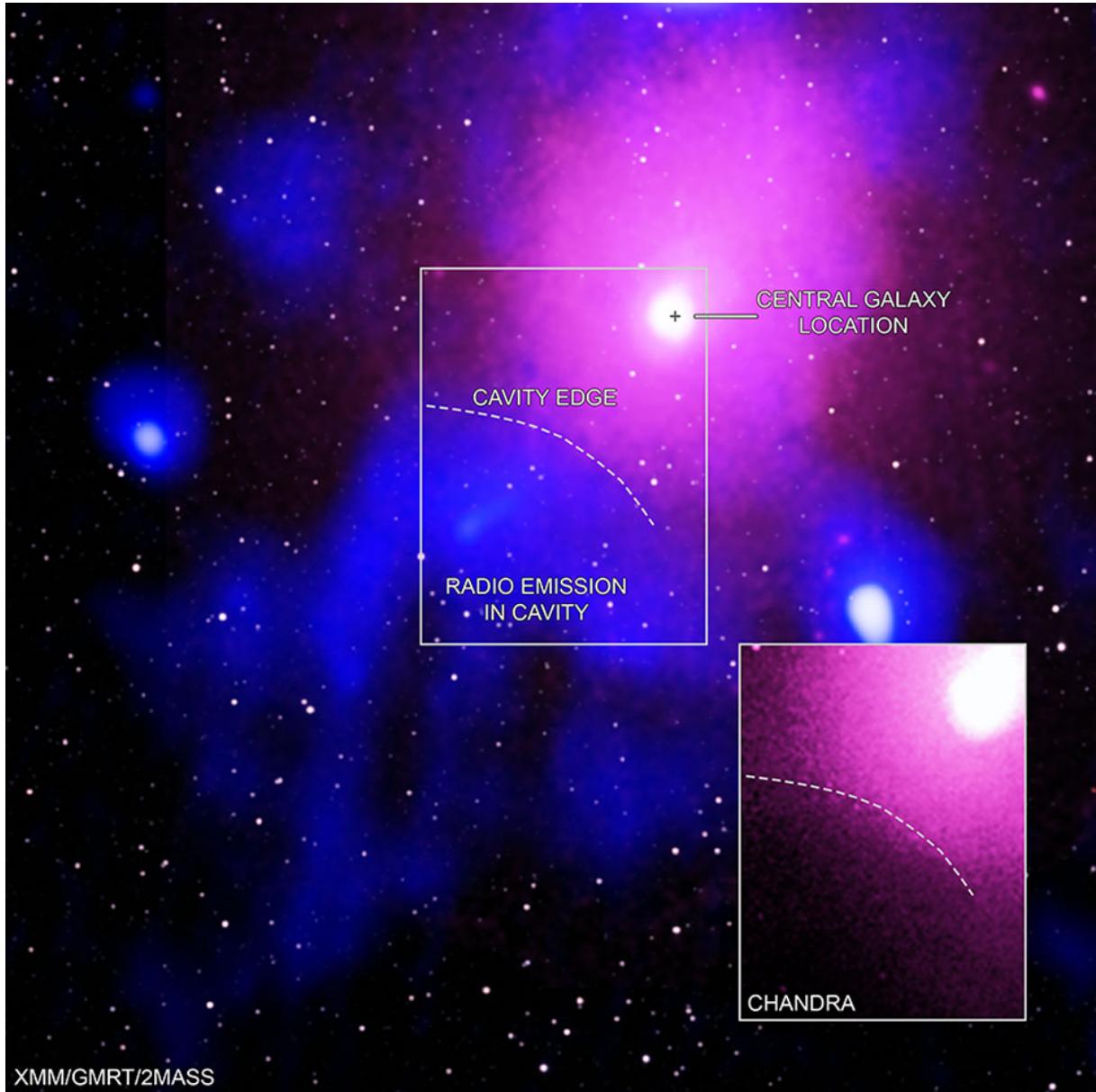


An Extreme Black Hole Outburst

Arthur Adriaens — Tweede bachelor fysica en sterrenkunde — 01702014



Figuur 1: APOD 11 maart 2020: An Extreme Black Hole Outburst [1]

1 Inleiding

Supermassieve zwarte gaten die zich bevinden in de centra van galaxiën absorberen veel massa en verwerpen ook vaak grote hoeveelheden energie weg in de vorm van jets. Maar als een zwart gat meer materie inneemt dan ze aankan blaast ze de materie weg¹, dit is een 'Black Hole outburst' (=BHO). Figuur 1 toont de restanten van zo'n BHO, die op de dag van publicatie [2] (27 februari) de grootste explosie ooit waargenomen was in het universum, met een sterkte equivalent aan 10 biljoen supernova explosies dewelke een 100 miljoen-lichtjaar brede opening veroorzaakte. De overgebleven koele kern bevindt zich 390 miljoen lichtjaar (120M parsec) ver in een massieve cluster van galaxiën in de constellatie Ophiuchus, de slangendrager.

¹Cursus Extragalactische sterrenkunde 7.2.3

2 Zwart gat

De algemene relativiteitstheorie, een zwaartekrachttheorie voortgebracht uit het equivalentieprincipe dat dicteert dat waarnemers in vrije val zich in een inertiaalstelsel bevinden, werd geformuleerd door Einstein in 1915 en zegt dat zwaartekracht kan beschreven worden aan de hand van de Einstein-vergelijkingen

$$G_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu} \quad (1)$$

met $G_{\mu\nu}$ de Einstein tensor, Λ de cosmologische constante, $g_{\mu\nu}$ de metrische tensor, G Newton's zwaartekrachtconstante, c de snelheid van het licht in vacuüm en $T_{\mu\nu}$ de energie-impuls-tensor.

Er zijn verscheidene oplossingen mogelijk uit deze vergelijking, één daarvan is een zwart gat², een door de Duitse fysicus Karl Schwarzschild (1873-1916) voorspelde singulariteit in de ruimtetijd die zo sterk kromt dat niets, geen deeltjes en zelfs geen elektromagnetische radiatie, kan ontsnappen. De grens vanaf waar elektromagnetische radiatie kan ontsnappen wordt de 'Event horizon' genoemd.

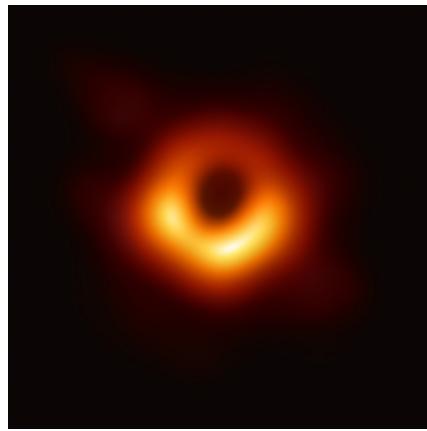
Een ander voortvloeisel van deze theorie is het bestaan van zwaartekrachtlenzen³: aangezien massa de ruimtetijd buigt en alle objecten, waaronder ook fotonen, paden in deze gekromde ruimtetijd (genaamd geodeten) volgen, vertonen fotonen kromming bij massieve objecten. De hoek $\hat{\alpha}$ waarover de baan van een foton wordt afgebogen door een puntmassa M wordt gegeven door de eenvoudige formule

$$\hat{\alpha} = \frac{4GM}{\xi c^2} \quad (2)$$

waarbij G de zwaartekrachtconstante is, c de lichtsnelheid en ξ de impact parameter (afstand van dichtste nadering). Deze afbuiging is echter niet het enige effect van zwaartekrachtlenzing, er kan ook magnificatie optreden⁴, waardoor lichtbronnen dicht bij zware objecten sterk worden vergroot.

Buiten de voorspelde Hawking radiatie, black-body radiatie geëmitteerd door quantum effecten dicht bij de event horizon, emitteert een zwart gat geen straling en zou dus niet zichtbaar zijn. Hoewel dit waar is bevindt er rond een zwart gat vaak een grote schijf van zeer heet gas die aan relativistische snelheden rond het zwart gat draait en veel straling uitzendt, de accretieschijf, hiermee kan dus indirect een zwart gat waargenomen worden. Met dank aan zwaartekrachtlenzing wordt deze accretieschijf uitvergroot en is de Event horizon dusdanig zeer goed zichtbaar. Zo een fenomeen deed zich voor in het centrum van de elleptische galaxie Messier 87 en zo was in april 2017 de eerste foto ooit gemaakt van een zwart gat [5] (figuur 2).

Deze objecten zouden ontstaan als een ster instort tot een neutronenster met een massa groter dan $3M_\odot$ (M_\odot = de massa van de zon) die op zijn beurt instabiel is (de zwaartekracht is sterker dan de neutronendruk) en vervolgens verder instort tot een zwart gat.



Figuur 2: Het supermassief zwart gat in het centrum van de elleptische galaxie Messier 87

²Cursus Extragalactische sterrenkunde 7.2.2

³Cursus Extragalactische sterrenkunde 6.3

⁴Cursus Extragalactische sterrenkunde 6.3.3

3 Opname

De opname zichtbaar in figuur 1 werd bekomen door een samenstelling te maken van X-ray metingen gemaakt door NASA's Chandra X-ray Observatory [4] en ESA's XMM-Newton (roze), infrarood metingen gemaakt door 2MASS (Two Micron All-Sky Survey) (wit) en radio metingen in het lage frequentie gebied (72-240 MHz) gemaakt door 2 radio telescopen, de Murchison Widefield Array (MWA) in Australië en de Giant Metrewave Telescope (GMRT) in Indië (blauw) zoals zichtbaar in figuur 3.



Figuur 3: meetinstrumenten

4 AGNs en de Ophiuchus supercluster

4.1 AGN

Een AGN (active galactic nucleus) wordt als reden gesteld waarom er verscheidene abnormale galaxiën bestaan met een extra heldere (en vaak variabele) lichtbron in hun kern die zelfs door de grootste telescopen niet ruimtelijk kunnen worden opgelost⁵. Algemeen wordt aangenomen dat dit fenomeen veroorzaakt wordt door één bepaald object, een supermassief zwart gat (een zwart gat met een massa van 10^5 tot meer dan $10^9 M_\odot$) waarrond een dichte torus van stof en gas ligt⁶. Deze dichte torus van gas is de voordien genoemde accretieschijf en is een enorme bron van energie, de conversie van potentiële energie van het invallend gas naar hoog-energetische straling is een uiterst complex fysisch proces waarbij rekening moet gehouden worden met onder andere gravitationele instabiliteiten, magnetische velden, hydrodynamische turbulentie, etc. Maar de fenomenen die zo een zwart gat zouden voortbrengen zijn een zeer goede verklaring voor al de verschillende soorten waargenomen AGNs

Het zou lijken dat de lichtkracht van een AGN onbeperkt kan toenemen met invallende massa op het supermassieve zwarte gat, er is echter een limiet: als er te veel materie op een zwart gat accreteert zal de stralingsdruk te groot worden en zal de materie in de accretieschijf weggeblazen worden waardoor het accretieproces stopt⁷, dit is een BHO.

4.2 Ophiuchus supercluster

De outburst die in dit verslag wordt besproken is waargenomen in de Ophiuchus supercluster, een supercluster is een grote groep van kleinere clusters; elk van die kleinere clusters bestaat uit honderden a duizenden galaxiën samengebonden door de zwaartekracht⁸. Deze cluster bevindt zich volgens NED (NASA/IPAC Extragalactic Database) op $17h12m26s$ rechte klimming α en -23.375852° declinatie δ (J2000.0) en is de 2de felst stralende X-ray supercluster. De cluster bevat een koele kern die een radio synchrotron minihalo vertoont (zoals vele koude kernen in massieve clusters⁹), ze vertoont ook een zeer steile temperatuur- en ijzerverdeling met een temperatuurstijging van $kT \approx 1\text{ keV}$ in het centrum naar $kT \approx 9\text{ keV}$ bij $r \approx 30\text{ kpc}$ waarna ze opmerkelijk isotherm lijkt verdeeld te zijn en een ijzerverdeling van 0 naar 2.5 \odot (=‘solar’) [8], [9]. Ook lijkt de kern dynamisch verstord met meerdere koude fronten die suggereren dat er veel ‘klotzen’ gebeurt met het X-ray uitzendend gas [7] (gas met temperaturen van boven 10^6 K ¹⁰), met indicaties van Rayleigh-Taylor instabiliteiten (instabiliteit tussen 2 vloeistoffen van verschillende dichtheseden dewelke voorkomt als een lichtere vloeistof een zwaardere duwt, zie begin figuur 4) en Kelvin-Helmholtz instabiliteiten (dewelke voorkomt als er een schuifspanning optreedt in een

⁵Cursus Extragalactische sterrenkunde 7.1.1

⁶Cursus Extragalactische sterrenkunde 7.2

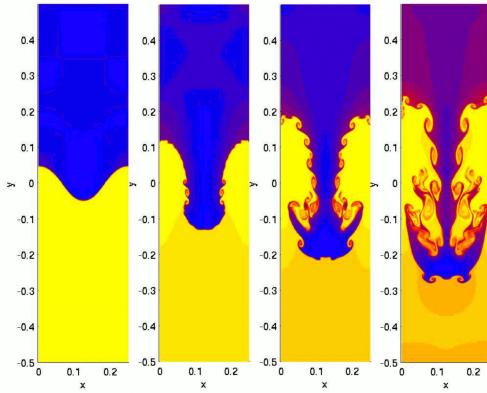
⁷Cursus Extragalactische sterrenkunde 7.2.3

⁸Cursus Extragalactische sterrenkunde 8.2.1

⁹Cursus Extragalactische sterrenkunde 4.5.2

¹⁰Cursus Extragalactische sterrenkunde 4.5.1

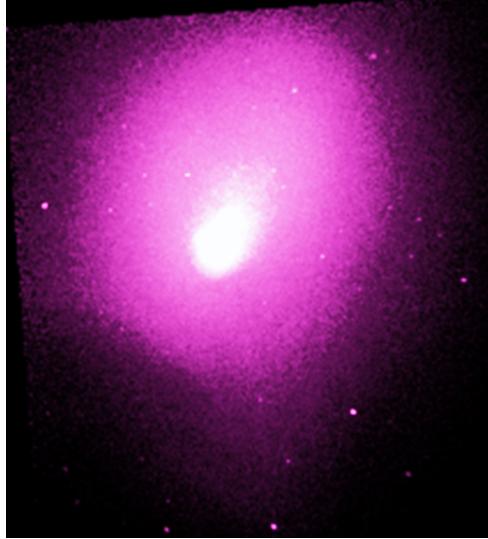
continue vloeistof of als er een snelheidsverschil is over de grenslaag van 2 vloeistoffen, zichtbaar aan het einde van figuur 4).



Figuur 4: Rayleigh-Taylor en Kelvin-Helmholtz instabiliteit

De Ophiuchus supercluster vertoont een opmerkzame concave discontinuïteit in de gasdichtheid aan de rand van zijn koude kern. Dit was ontdekt met Chandra X-ray beelden door Werner et al. [9] en is zichtbaar in de omkaderde afbeelding rechtsonder in figuur 1 en linksonder in figuur 5. Werner et al. overwogen de mogelijkheid dat dit de rand was van een (AGN)-geïnflatteerde bubble maar verworpen dit idee aangezien het van een te krachtige AGN outburst zou moeten komen (zo'n 5×10^{61} erg nodig) die ook de steile ijzer- en entropie-stijging (uit de temperatuurverdeling) zou weggeblazen hebben. Daarom dachten ze dat deze discontinuïteit het gevolg was van merging gerelateerde gasdynamica (wat ook de voordien besproken instabiliteiten zou verklaren).

Giacintucci et al. echter maakten gebruik van radio metingen bekomen door de MWA en GMRT (zie sectie 3) en gingen te werk met een Λ CDM model (ook wel het standaardmodel van de Oerkrakosmologie genoemd¹¹) dat gebaseerd is op een cosmologische constante Λ geassocieerd met donkere energie en op koude donkere materie¹². Op die manier werd er door hen aangetoond [6] dat deze brede opening in het X-ray emitterend gas gevuld is met diffuse radio straling met een zeer steil profiel afkomstig van verouderde relativistische deeltjes van vroegere AGN activiteit¹³, waaruit ze konden besluiten dat de discontinuïteit wel degelijk het overblijfsel is van de grootste AGN outburst ooit waargenomen in een supercluster.



Figuur 5: opname van Ophiuchus door Chandra [3]

¹¹Cursus Extragalactische sterrenkunde 8.1.5

¹²Cursus Extragalactische sterrenkunde 6.4.3

¹³Cursus Extragalactische sterrenkunde 7.4.6

Referenties

- [1] Astronomy picture of the day (apod) 11 maart 2020. <https://apod.nasa.gov/apod/ap200311.html>.
- [2] Chandra x-ray observatory black hole press release. https://chandra.si.edu/press/20_releases/press_022720.html.
- [3] Chandra x-ray observatory ophiuchusbespreking. <https://chandra.si.edu/photo/2020/ophiuchus/>.
- [4] Ruimtesonde chandra. https://www.nasa.gov/mission_pages/chandra/spacecraft/index.html.
- [5] Event Horizon Telescope Collaboration. First M87 Event Horizon Telescope Results. I. The Shadow of the Supermassive Black Hole. *The Astrophysical Journal Letters*, 875(1):L1, April 2019.
- [6] S. Giacintucci, M. Markevitch, M. Johnston-Hollitt, D. R. Wik, Q. H. S. Wang, and T. E. Clarke. Discovery of a giant radio fossil in the ophiuchus galaxy cluster. *The Astrophysical Journal*, 891(1):1, Feb 2020.
- [7] M. Markevitch, A. Vikhlinin, and P. Mazzotta. Nonhydrostatic gas in the core of the relaxed galaxy cluster a1795. *The Astrophysical Journal*, 562(2):L153–L156, dec 2001.
- [8] M. A. Pérez-Torres, F. Zandanel, M. A. Guerrero, S. Pal, S. Profumo, F. Prada, and F. Panessa. The origin of the diffuse non-thermal x-ray and radio emission in the ophiuchus cluster of galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 396(4):2237–2248.
- [9] N. Werner, I. Zhuravleva, R. E. A. Canning, S. W. Allen, A. L. King, J. S. Sanders, A. Simionescu, G. B. Taylor, R. G. Morris, and A. C. Fabian. Deep Chandra study of the truncated cool core of the Ophiuchus cluster. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 460(3):2752–2764, 05 2016.