



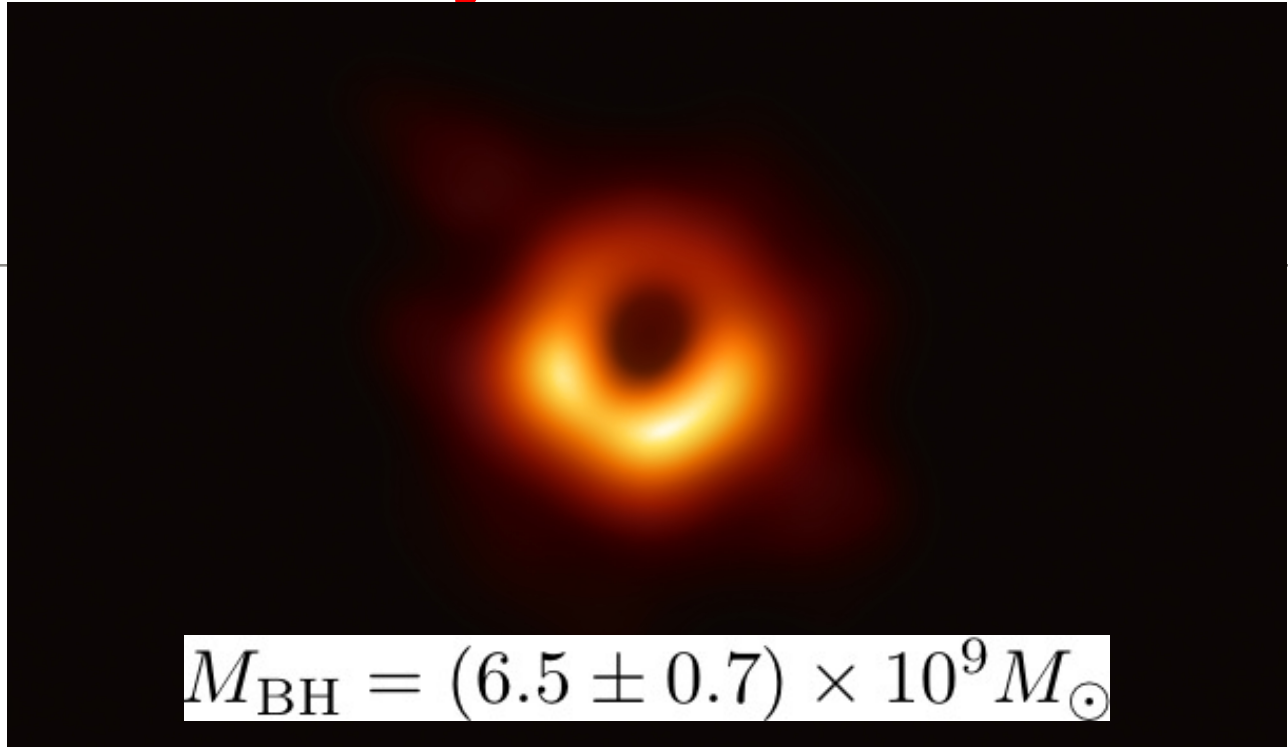
Mustan aukon varjon kuvaaminen Event Horizon Telescope:lla

Peter Johansson,
Fysiikan laitos, Helsingin yliopisto

Kumpula Nyt, Helsinki 24.4.2019



Mitä on nähty? – Mustan aukon varjo!



$$R_S = \frac{2GM_{\text{BH}}}{c^2}$$

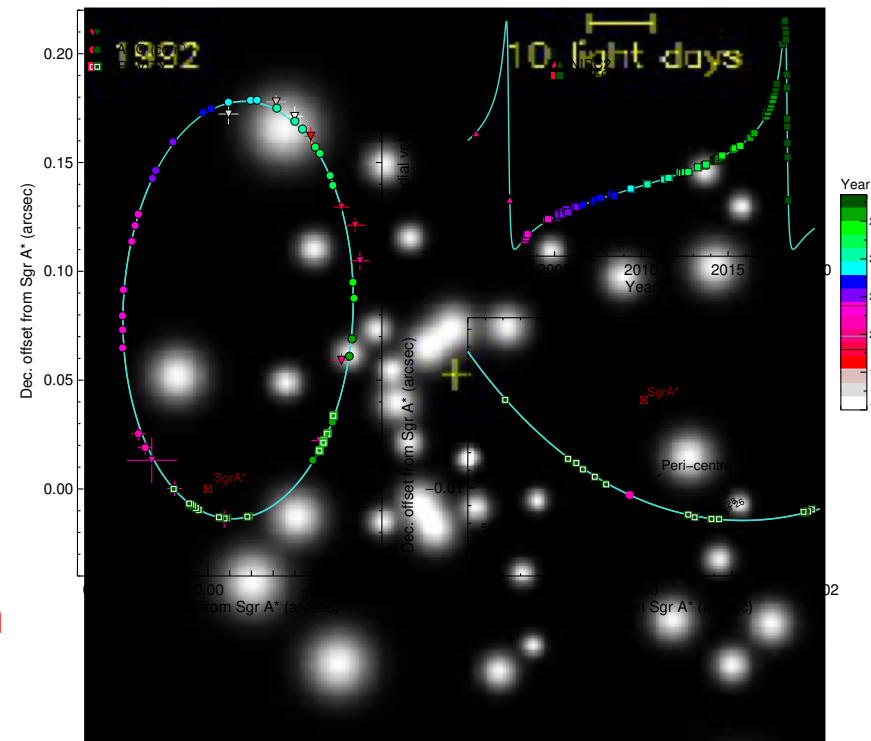
$$M_{\text{BH}} = (6.5 \pm 0.7) \times 10^9 M_{\odot}$$

- Kuvassa näkyy **M87 galaksin pyörivän supermassiivisen mustan aukon varjo** säteilevää taustaa vasten.
- Varjo on käytännössä **kuvaus tapahtumahorisontista**, joka on muokkautunut painovoiman vaikutuksesta.
- Tapahtumahorisontin koko riippuu mustan aukon pyörimisestä. Toisaalta **varjon koko $4.5R_S$ - $5.2R_S$** riippuu vähemmän aukon pyörimisestä.



Kohde I– Sgr A* - Linnunradan musta aukko

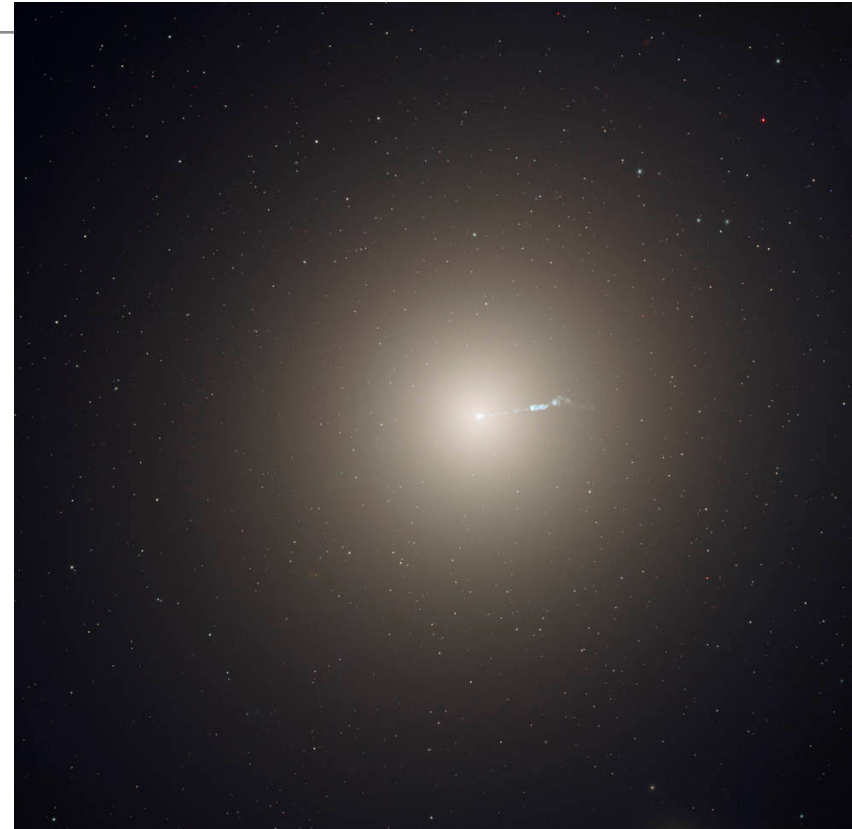
- Linnunradan keskustassa sijaitseva supermassiivinen musta aukko Sgr A*.
- **Etäisyys:** 8.2 kiloparsekkia (27 000 valovuotta).
- **Tapahtumahorisontti:** ~12 miljoonaa km.
- **Varjo:** ~60 miljoonaa km, 50 mikrokaarisekuntia (kaarisekunti=1/3600 astetta).
- S2 niminen tähti kiertää Sgr A*-mustaa aukkoa radalla, jonka periodi on $P=16.05$ vuotta ja se käy **lähimmillään vain 17 valotunnin etäisyydellä.**
- Linnunradan ytimessä olevan mustan aukon massaksi on saatu varsin tarkasti arvo $M_{\text{BH}}=4.3 \times 10^6 M_{\odot}$.





Kohde II – M87 galaksin jättiläismusta aukko

- Neitsyen galaksijoukon keskusgalaksin, M87, supermassiivinen musta aukko.
- **Etäisyys:** ~17 Megaparsekkia (55 miljoonaa valovuotta).
- **Tapahtumahorisontti:** ~19.5 miljardia km
- **Varjo:** ~98 miljardia km, ~38 mikrokaarisekuntia (havainto 42 mikrokaarisekuntia).
- Massiivisin musta aukko paikallisessa maailmankaikkeudessa. Nyt saatu massan arvo $M_{\text{BH}} = 6.5 \times 10^9 M_{\odot}$ täsmää aikaisempien arvioiden kanssa.

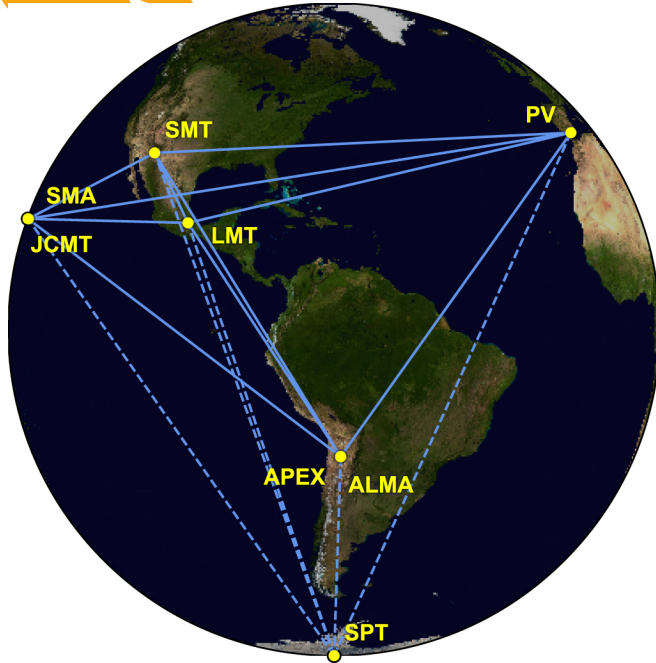


https://www.youtube.com/watch?v=9DILtg_9dcU



Event Horizon Telescope

ALMA, CHILE

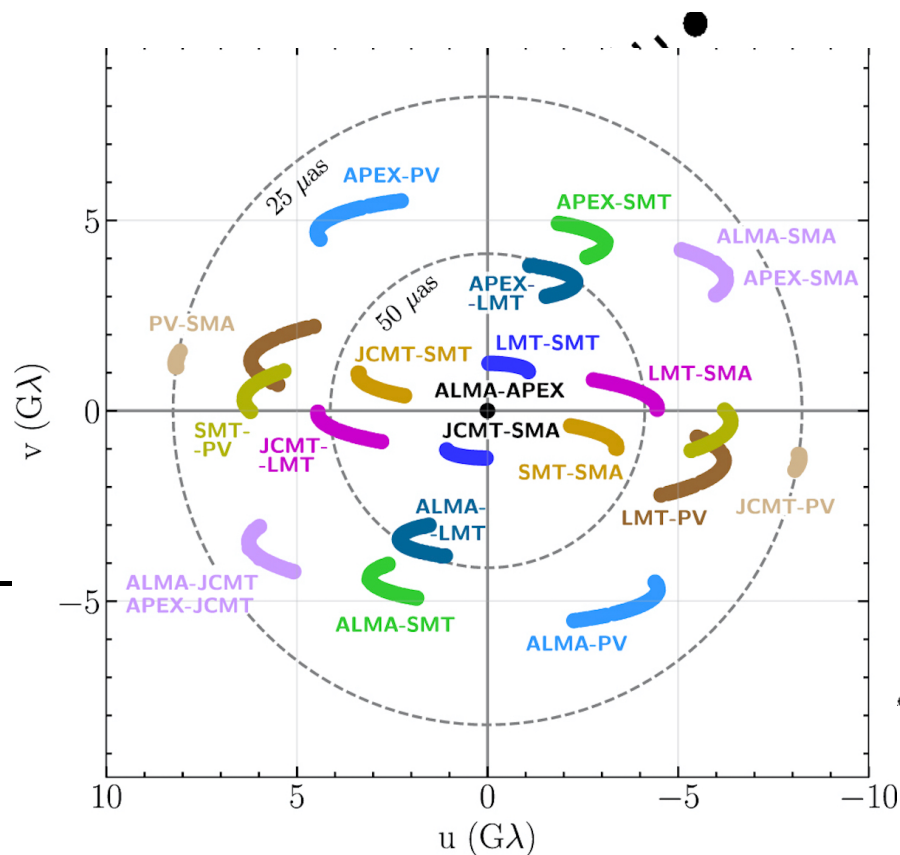


- **Event Horizon Telescope on radiointerferometri**, joka yhdistää etäällä olevien kaukoputkien havaintoja. Teoreettinen erotuskyky (λ/D) ~ 25 mikrokaarisekuntia, missä $\lambda \sim 1.3$ mm ($\nu \sim 230$ GHz) ja D pisin kanta (Hawaii-Espanja).
- **Koordinoidut havainnot ($\Delta t \sim 5$ -10 minuuttia) tehtiin 5, 6, 10 ja 11 huhtikuuta, 2017.**



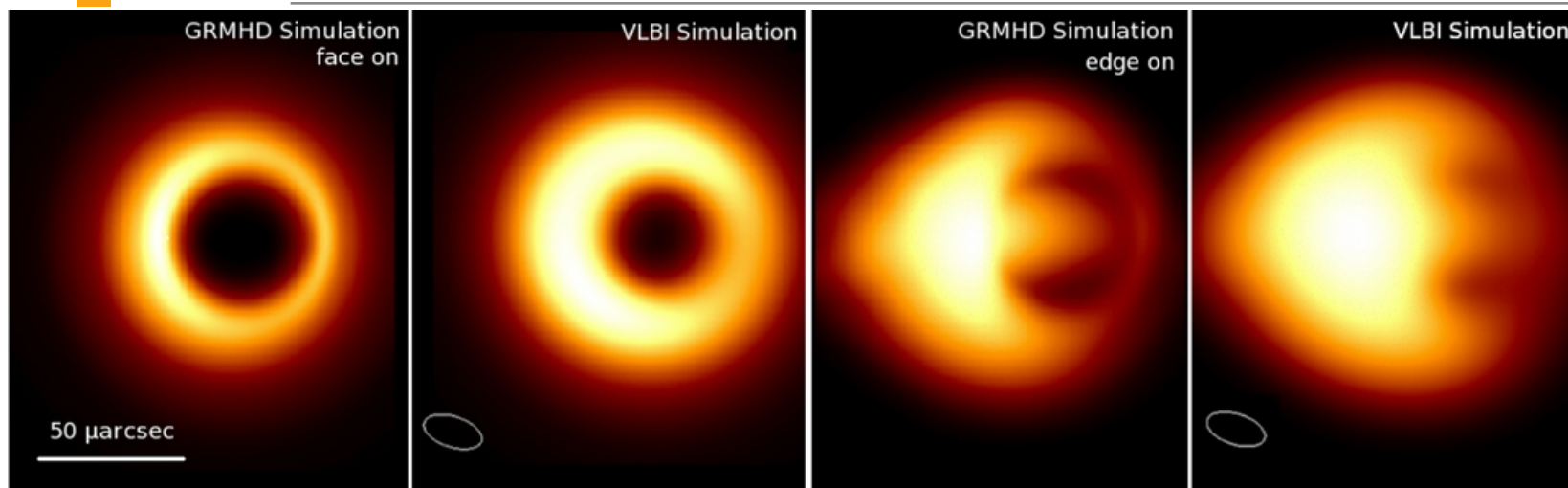
Radio-Interferometria

- **Interferometri** on laite, joka yhdistää kahdesta eri lähteestä tulevat sähkömagneettiset aallot **yhdeksi kuvaksi eli interferenssikuvaksi**.
- Maapallon pyöriessä, jokainen kaukoputkiparin kanta näkee kohteen hieman erilaisessa suunnassa.
- **Lopullinen kuva saadaan yhdistämällä eri kaukoputkien havainnot ja ratkaisemalla inversio-ongelma** (Fourier-muunnos). EHT:ssä 4 riippumatonta ryhmää työsti lopullista kuvaa.
- **EHT tuotti 5 Peta-tavua (5×10^{15} tavua) dataa**. Tarvittavat kovalevyt painoivat noin 500 kg.





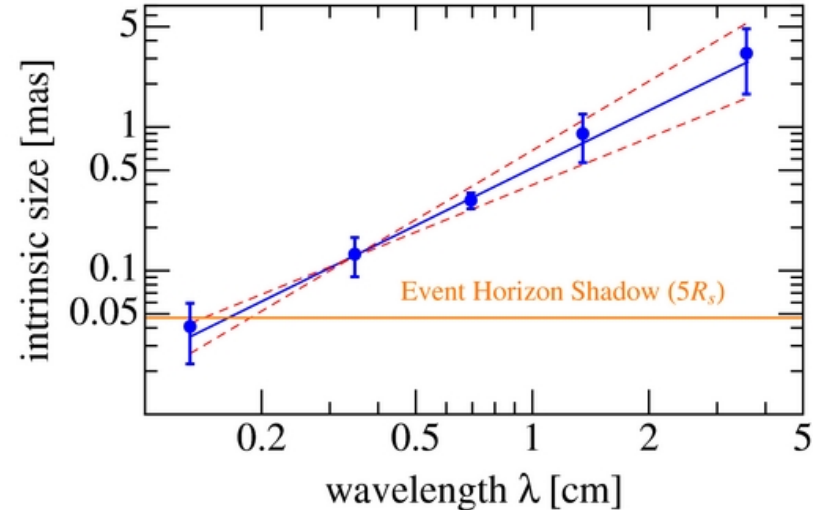
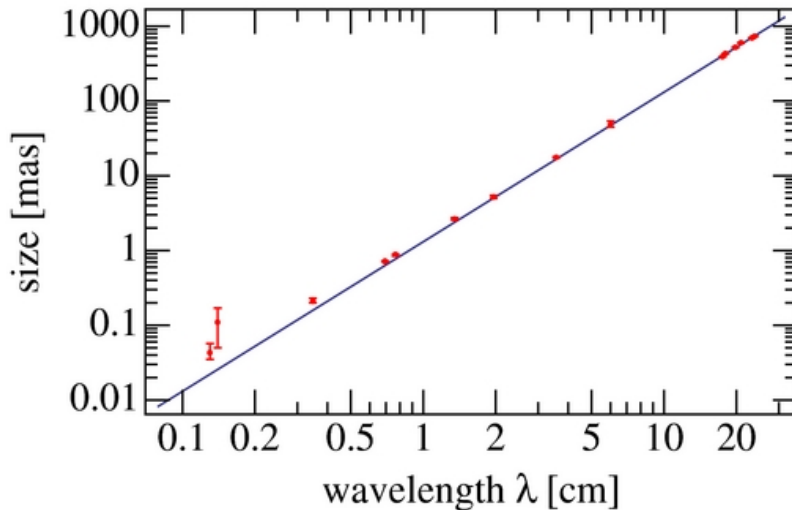
Mistä säteily on peräisin ja miksi säteilyä nähdään?



- Säteily hyvin lähellä musta aukkoa on todennäköisesti **synkrotronisäteilyä**, jota syntyy kun **varatut hiukkaset (elektronit)** liikkuvat kieppuen lähes **valonnopeudella magneettikentässä**.
- Korkeilla taajuuksilla (>200 GHz) synkrotronisäteilyn itse-absorptio vähenee ja **säteilystä tulee optisesti ohutta**. Vain tässä tapauksessa voimme nähdä **mustan aukon varjon**.



Häiriölähteitä, miksi havainnot ovat olleet niin haastavia?



- Korkeiden taajuuksien interferometria on haastavaa: Kohina radiovastaanottimissa on suurempaa, ilmakehän häiritsevä vaikutus on voimakkaampaa, sekä radiokaukoputkien koot ovat pienempiä.
- Tähtienvälisen aineen elektronit sirottavat myös voimakkaasti radio-aaltoja ja tämä sumentaa havaittua kuvaa:

$$\phi_{\text{scatt}} = (1.36 \pm 0.02) \text{ mas} \times (\lambda/\text{cm})^2$$

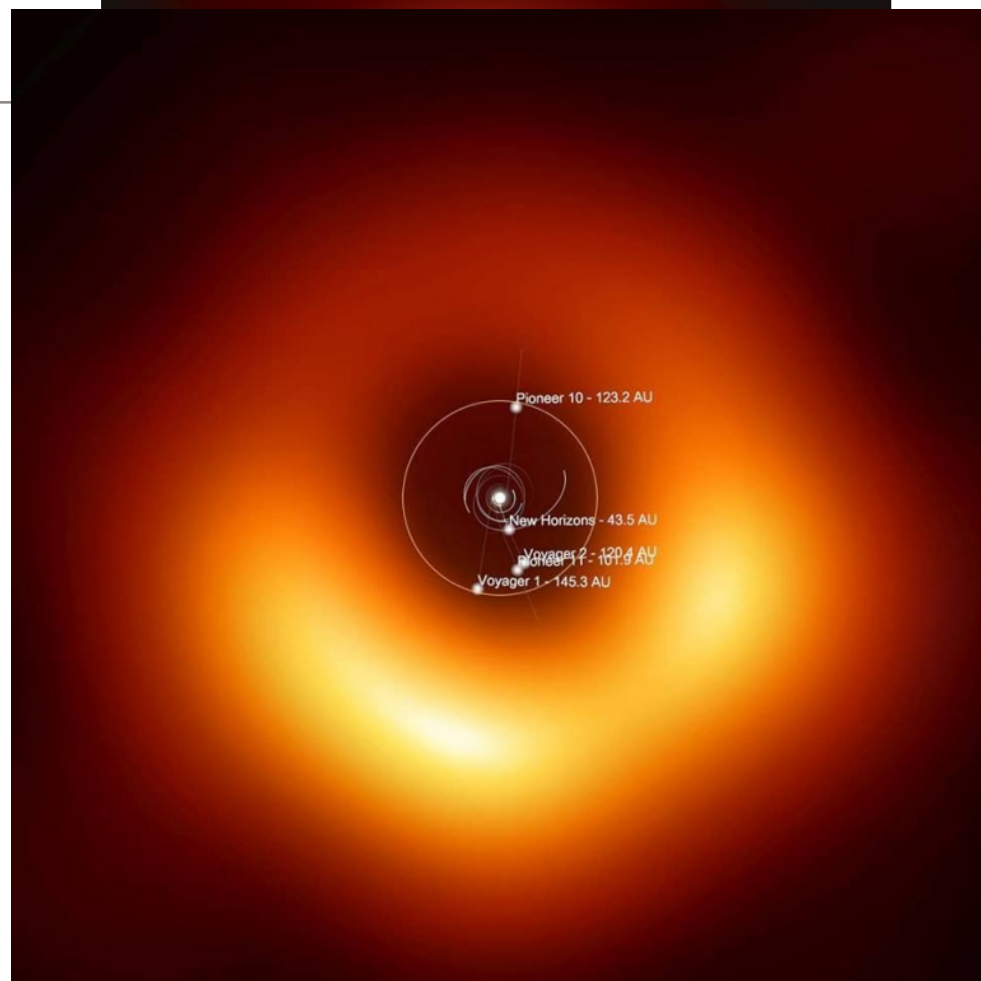


Tulokset:

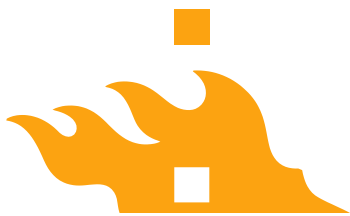
- Havainnot osoittavat, että **M87 mustan aukon varjo** ympäröi 42 mikrokaari-sekunnin kokoinen **asymmetrisen kirkas säteilyrengas**.
- Tulokset ovat yhteensopivia yleisen suhteellisuusteorian ennustaman pyörivän **Kerr-mustan aukon** kanssa.
- Kuvat eri päiviltä hyvin **samanlaisia**, kyseessä on siis mitä ilmeisimmin mustan aukon varjo.

M87*

April 11, 2017



Brightness Temperature (10^9 K)



Mallinnuksia ja mustan aukon fysikaaliset parametrit

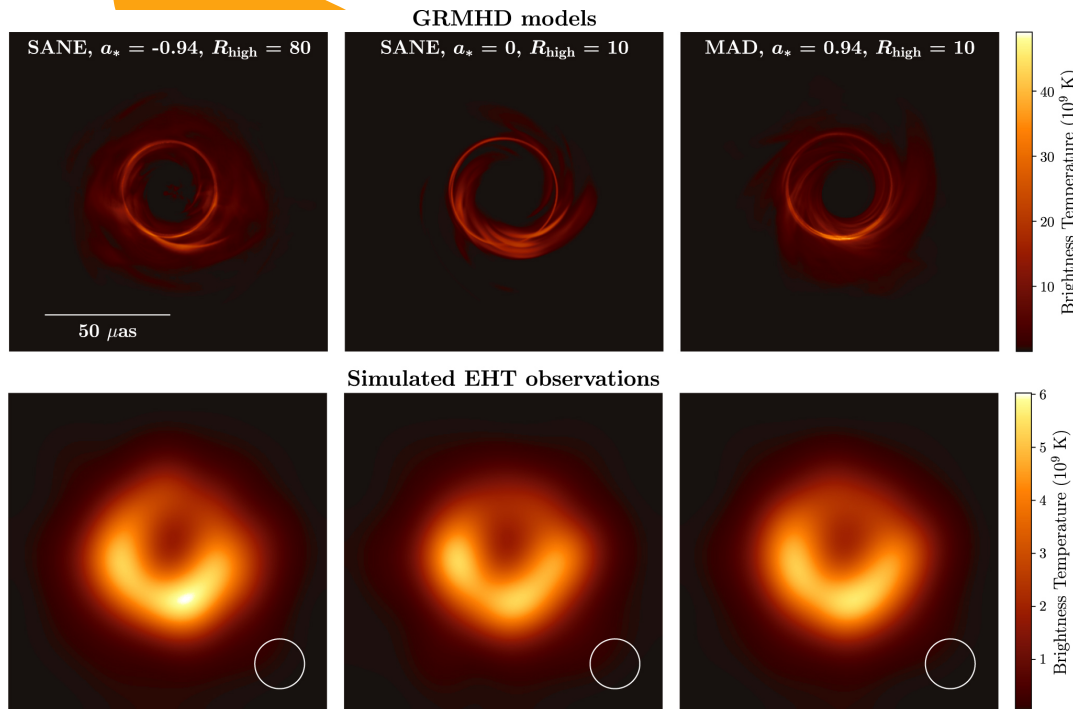


Table 1
Parameters of M87*

Parameter	Estimate
Ring diameter ^a d	$42 \pm 3 \mu\text{as}$
Ring width ^a	$< 20 \mu\text{as}$
Crescent contrast ^b	$> 10:1$
Axial ratio ^a	$< 4:3$
Orientation PA	$150^\circ\text{--}200^\circ$ east of north
$\theta_g = GM/Dc^2$ ^c	$3.8 \pm 0.4 \mu\text{as}$
$\alpha = d/\theta_g$ ^d	$11^{+0.5}_{-0.3}$
M ^c	$(6.5 \pm 0.7) \times 10^9 M_\odot$
Parameter	Prior Estimate
D ^e	$(16.8 \pm 0.8) \text{ Mpc}$
$M(\text{stars})$ ^c	$6.2^{+1.1}_{-0.6} \times 10^9 M_\odot$
$M(\text{gas})$ ^e	$3.5^{+0.9}_{-0.3} \times 10^9 M_\odot$

Notes.

^a Derived from the image domain.

^b Derived from crescent model fitting.

^c The mass and systematic errors are averages of the three methods (geometric models, GRMHD models, and image domain ring extraction).

^d The exact value depends on the method used to extract d , which is reflected in the range given.

^e Rederived from likelihood distributions (Paper VI).

- Simulaatiomallien tärkeimmät parametrit ovat **mustan aukon pyörimisparametri**, $a=Jc/GM^2$, sekä **magneettinen kentän voimakkuus**.
- Havaittu rengasrakenne johtuu pitkälti relativistista ilmiöistä (gravitaatiolinssi- ilmiö, sekä relativistinen Doppler-ilmiö).
- Eri malleja on vielä hankala erotella keskenään, mutta on selvää, että musta aukko pyörii ja että kuvan alaosa tulee meitä kohti.



Yhteenveto ja mitä seuraavaksi?

- Galaksi M87 musta aukko on nyt nähty, ja seuraavaksi odotetaan tuloksia Linnunradan mustasta aukosta (Sgr A*).
- **Sgr A* on haastavampi kohde**, nopeampia valovaihteluita (aikaskaalat minuutteja verrattuna päiviin (M87)). Lisäksi tiellä on enemmän häiritsevää tähtienvälistä ainetta.
- Kohteista on **myös vielä julkaisemattomia polarisaatiohavaintoja**, jotka tulevat paljastamaan **lisää tietoa kaasun kertymisestä mustaan aukkoon ja kaasua ohjaavasta magneettikentästä**.
- Parempia kuvia voidaan saada tulevaisuudessa tekemällä havaintoja korkeammalla taajuudella (345 GHz), sekä lisäämällä uusia kaukoputkia.
- **Musta aukko on nyt nähty ensimmäistä kertaa ja näyttää siltä, että Einsteinin suhteellisuusteoria on edelleen oikeassa!**