



Mechanická zpětná vazba aktivních galaktických jader

Tomáš Plšek

Astronomická expedice

4. sprna 2022

High Energy Astrophysics group



High Energy Astrophysics group

hea.physics.muni.cz

- Přírodovědecká Fakulta, MUNI, Brno
 - budova 8, Kotlářská 2, Brno



High Energy Astrophysics group

hea.physics.muni.cz

- Přírodovědecká Fakulta, MUNI, Brno
 - budova 8, Kotlářská 2, Brno
- Vedoucí skupiny: prof. Norbert Werner



High Energy Astrophysics group

hea.physics.muni.cz

- Přírodovědecká Fakulta, MUNI, Brno
 - budova 8, Kotlářská 2, Brno
- Vedoucí skupiny: prof. Norbert Werner
- zaměření:
 - výzkum horkého vesmíru
 - aplikace strojového učení
 - detekce GRB pomocí nanosatelitů
 - český UV teleskop (QUVIK)



High Energy Astrophysics group

hea.physics.muni.cz

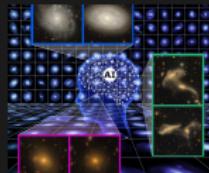
- Přírodovědecká Fakulta, MUNI, Brno
 - budova 8, Kotlářská 2, Brno
- Vedoucí skupiny: prof. Norbert Werner
- zaměření:
 - výzkum horkého vesmíru
 - aplikace strojového učení
 - detekce GRB pomocí nanosatelitů
 - český UV teleskop (QUVIK)



High Energy Astrophysics group

hea.physics.muni.cz

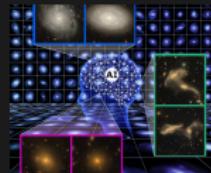
- Přírodovědecká Fakulta, MUNI, Brno
 - budova 8, Kotlářská 2, Brno
- Vedoucí skupiny: prof. Norbert Werner
- zaměření:
 - výzkum horkého vesmíru
 - aplikace strojového učení
 - detekce GRB pomocí nanosatelitů
 - český UV teleskop (QUVIK)



High Energy Astrophysics group

hea.physics.muni.cz

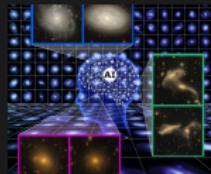
- Přírodovědecká Fakulta, MUNI, Brno
 - budova 8, Kotlářská 2, Brno
- Vedoucí skupiny: prof. Norbert Werner
- zaměření:
 - výzkum horkého vesmíru
 - aplikace strojového učení
 - detekce GRB pomocí nanosatelitů
 - český UV teleskop (QUVIK)



High Energy Astrophysics group

hea.physics.muni.cz

- Přírodovědecká Fakulta, MUNI, Brno
 - budova 8, Kotlářská 2, Brno
- Vedoucí skupiny: prof. Norbert Werner
- zaměření:
 - výzkum horkého vesmíru
 - aplikace strojového učení
 - detekce GRB pomocí nanosatelitů
 - český UV teleskop (QUVIK)



Galaxie raného typu
○○○○

Aktivní galaktická jádra
○○○○○

Zpětná vazba AGN
○○○○

Cavity Detection Tool
○○○○○

Obsah

- Galaxie raného typu
- Aktivní galaktická jádra (AGN)
- Zpětná vazba AGN
- Cavity Detection Tool (CADET)

Galaxie raného typu



Aktivní galaktická jádra



Zpětná vazba AGN

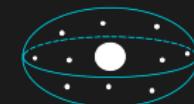


Cavity Detection Tool



Obsah

- Galaxie raného typu
- Aktivní galaktická jádra (AGN)
- Zpětná vazba AGN
- Cavity Detection Tool (CADET)



Galaxie raného typu



Aktivní galaktická jádra



Zpětná vazba AGN

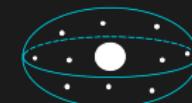


Cavity Detection Tool



Obsah

- Galaxie raného typu
- Aktivní galaktická jádra (AGN)
- Zpětná vazba AGN
- Cavity Detection Tool (CADET)



Galaxie raného typu



Aktivní galaktická jádra



Zpětná vazba AGN

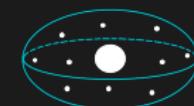


Cavity Detection Tool



Obsah

- Galaxie raného typu
- Aktivní galaktická jádra (AGN)
- Zpětná vazba AGN
- Cavity Detection Tool (CADET)



Galaxie raného typu



Aktivní galaktická jádra



Zpětná vazba AGN



Cavity Detection Tool



Obsah

- Galaxie raného typu
- Aktivní galaktická jádra (AGN)
- Zpětná vazba AGN
- Cavity Detection Tool (CADET)



Galaxie raného typu



Aktivní galaktická jádra



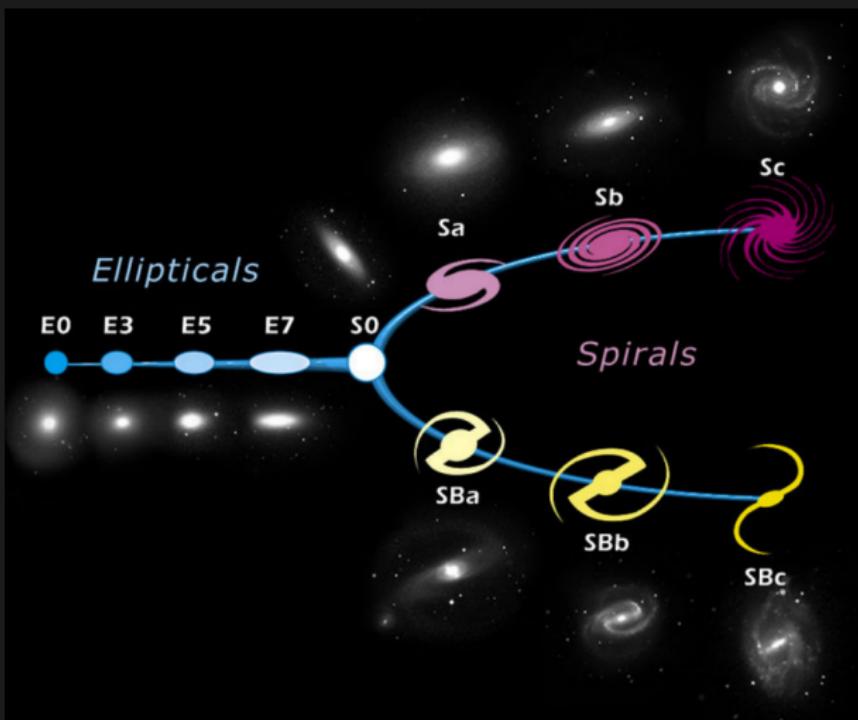
Zpětná vazba AGN



Cavity Detection Tool



Rozdělení galaxií



Galaxie raného typu



Aktivní galaktická jádra



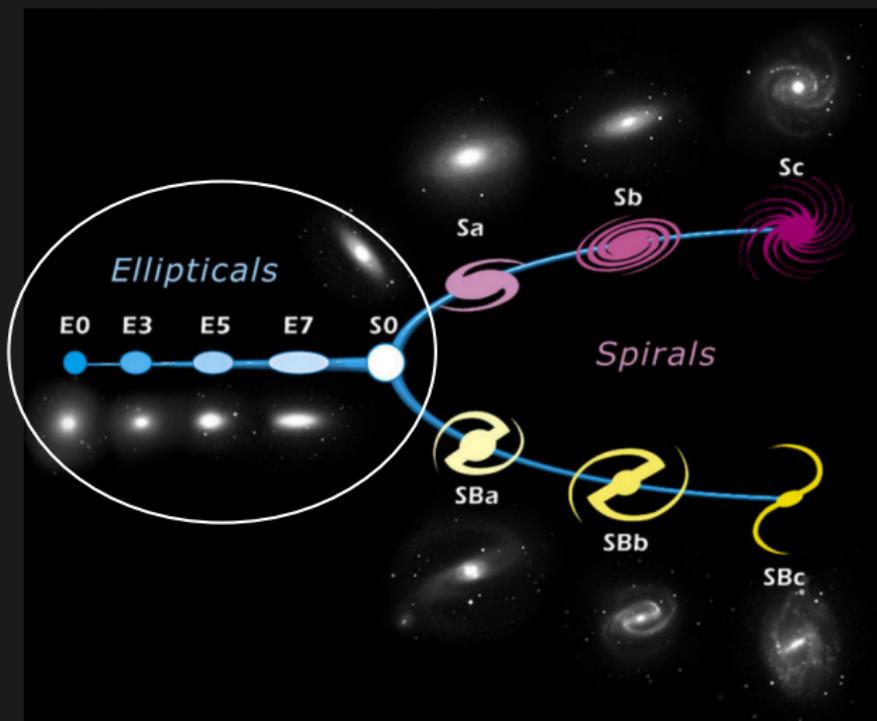
Zpětná vazba AGN



Cavity Detection Tool



Rozdělení galaxií



Galaxie raného typu



Aktivní galaktická jádra



Zpětná vazba AGN



Cavity Detection Tool



Galaxie raného typu

= eliptické a čočkové galaxie



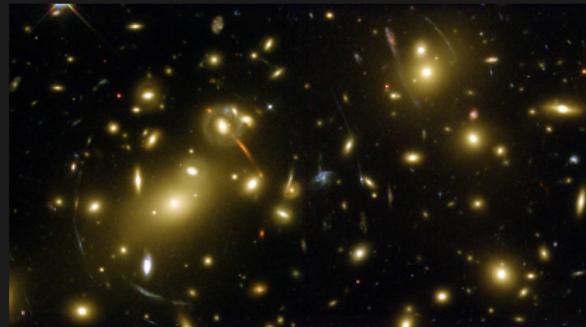
Galaxie raného typu

- = eliptické a čočkové galaxie
- označení "red & dead"
 - staré chladnější hvězdy
 - nízká tvorba nových hvězd



Galaxie raného typu

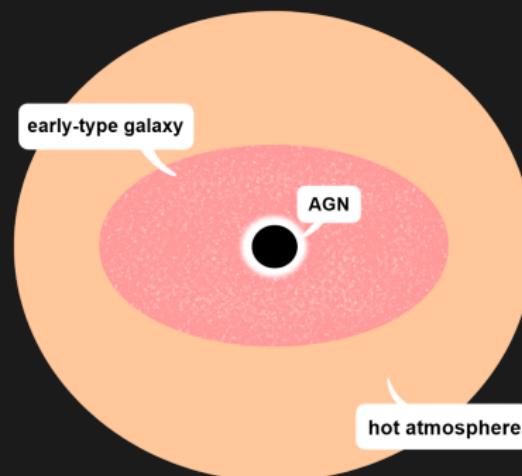
- = eliptické a čočkové galaxie
- označení "red & dead"
 - staré chladnější hvězdy
 - nízká tvorba nových hvězd
- poblíž kup galaxií



Galaxie raného typu

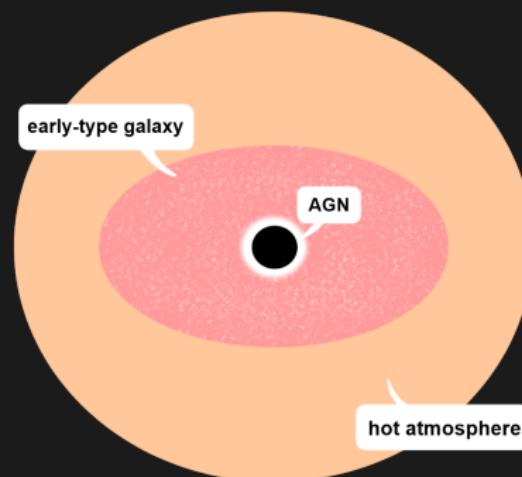
= eliptické a čočkové galaxie

- označení "red & dead"
 - staré chladnější hvězdy
 - nízká tvorba nových hvězd
- poblíž kup galaxií
- systémy s $M > 10^{12} M_{\odot}$
 - aktivní galaktická jádra
 - horké atmosféry



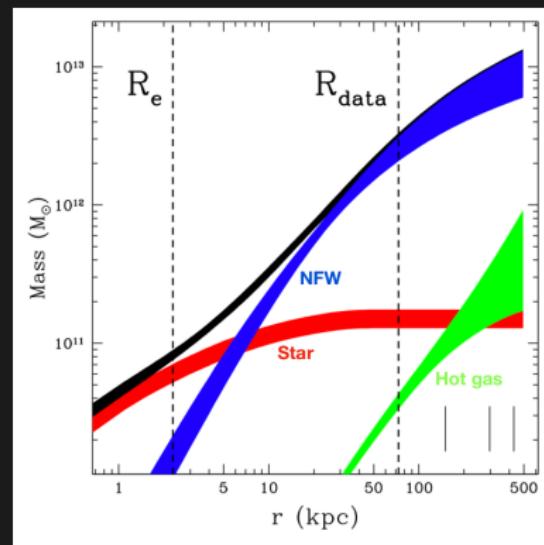
Horké atmosféry

- horké řídké plasma
 - $n \approx 10^{-5} - 1 \text{ cm}^{-3}$
 - $T \approx 10^6 - 10^8 \text{ K}$
- většina baryonické hmoty
 - halo až 80 %
 - mezihvězdná látka 0.5 %



Horké atmosféry

- horké řídké plasma
 - $n \approx 10^{-5} - 1 \text{ cm}^{-3}$
 - $T \approx 10^6 - 10^8 \text{ K}$
- většina baryonické hmoty
 - halo až 80 %
 - mezihvězdná látka 0.5 %

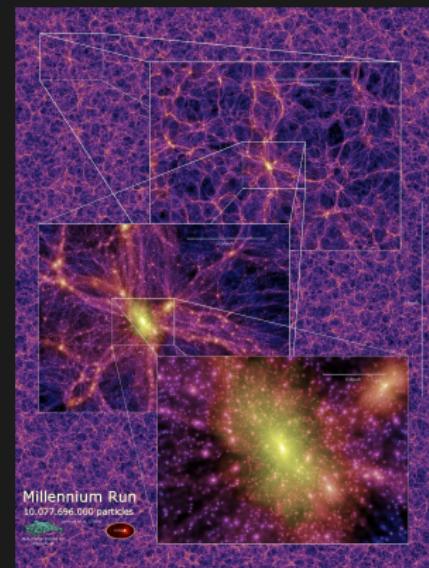


Horké atmosféry

- horké řídké plasma
 - $n \approx 10^{-5} - 1 \text{ cm}^{-3}$
 - $T \approx 10^6 - 10^8 \text{ K}$

- většina baryonické hmoty
 - halo až 80 %
 - mezihvězdná látka 0.5 %

- původ atmosfér
 - akrece plynu z filamentů
 - hvězdný vítr & supernovy



Galaxie raného typu



Aktivní galaktická jádra



Zpětná vazba AGN



Cavity Detection Tool



Horké atmosféry (emise)

Galaxie raného typu



Aktivní galaktická jádra



Zpětná vazba AGN

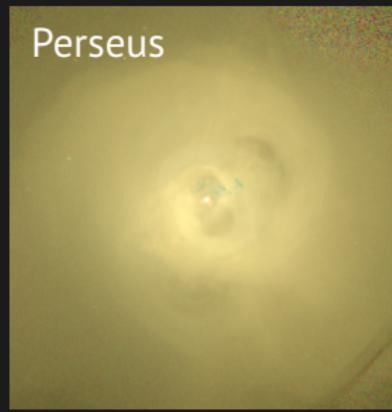


Cavity Detection Tool



Horké atmosféry (emise)

Perseus



M84



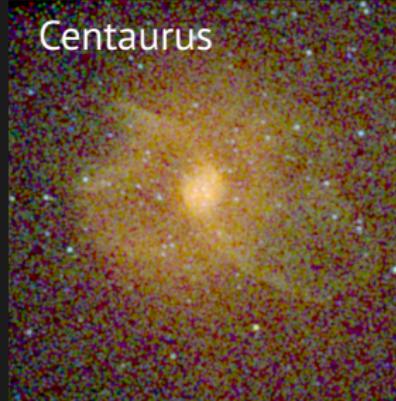
M87



M89



Centaurus



NGC5813

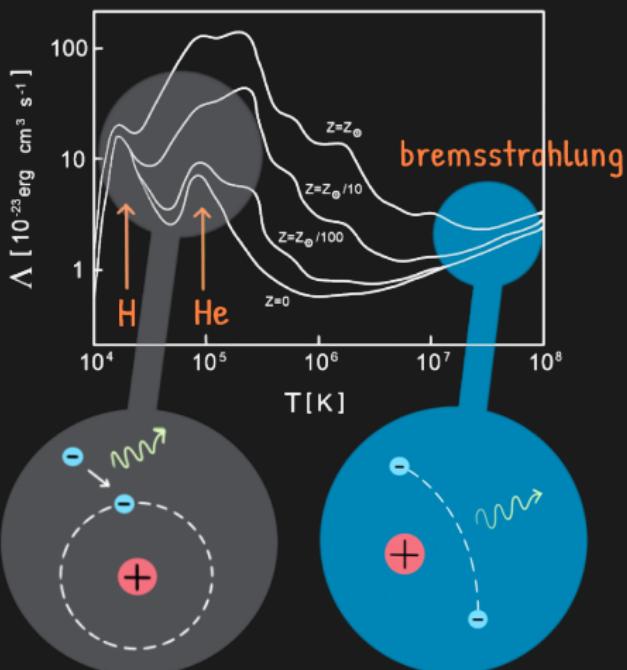


Horké atmosféry (emise)

- rentgenová emise
 - volně-volné přechody
 - čáry těžkých kovů

Horké atmosféry (emise)

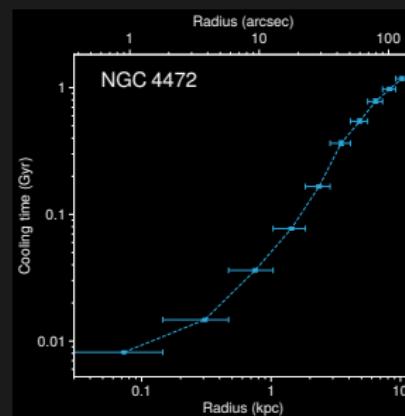
- rentgenová emise
 - volně-volné přechody
 - čáry těžkých kovů



Horké atmosféry (emise)

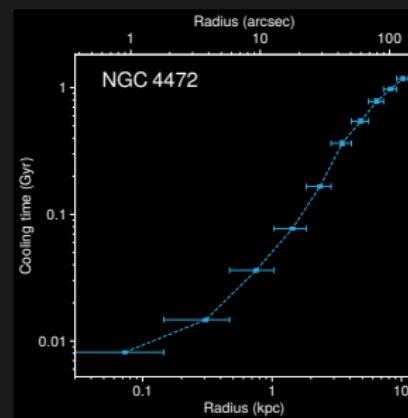
- rentgenová emise
 - volně-volné přechody
 - čáry těžkých kovů
- ochlazují se vyzařováním
 - cooling time

$$t_{\text{cool}} = \frac{3}{2} \frac{n k T}{n_e n_i \Lambda(T, Z)} \propto \frac{k T}{\rho \Lambda}$$

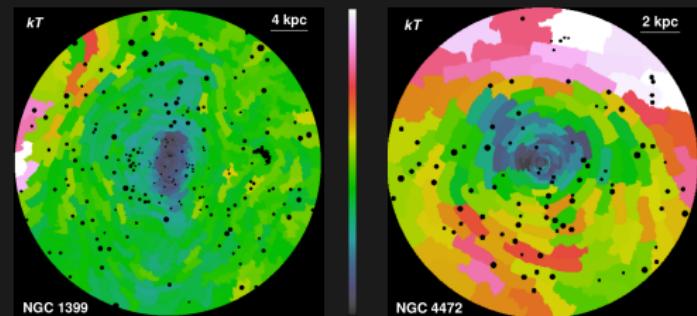


Horké atmosféry (emise)

- rentgenová emise
 - volně-volné přechody
 - čáry těžkých kovů
- ochlazují se vyzařováním
 - cooling time

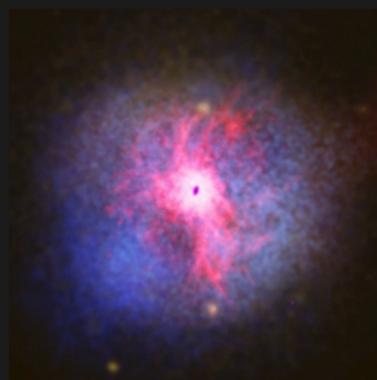


$$t_{\text{cool}} = \frac{3}{2} \frac{n k T}{n_e n_i \Lambda(T, Z)} \propto \frac{k T}{\rho \Lambda}$$



Horké atmosféry (emise)

- rentgenová emise
 - volně-volné přechody
 - čáry těžkých kovů
- ochlazují se vyzařováním
 - cooling time



$$t_{\text{cool}} = \frac{3}{2} \frac{n k T}{n_e n_i \Lambda(T, Z)} \propto \frac{k T}{\rho \Lambda}$$

- vícefázový plyn
 - rentgenový plyn (*modrá*)
 - H α filaments (*červená*)



Galaxie raného typu



Aktivní galaktická jádra



Zpětná vazba AGN



Cavity Detection Tool

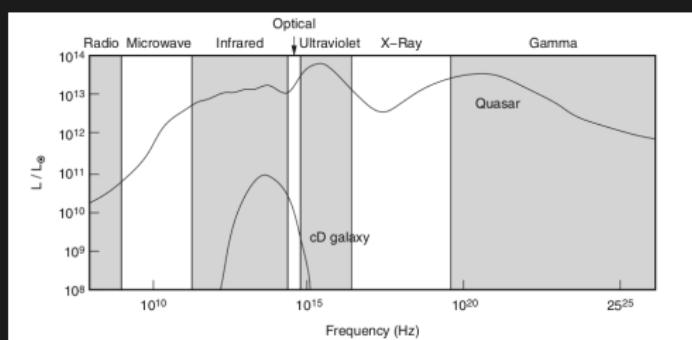


Aktivní galaktická jádra

Aktivní galaktická jádra

- enormní zářivost
 - $L \approx 10^{10} - 10^{14} L_{\odot}$
- netermální spektrum

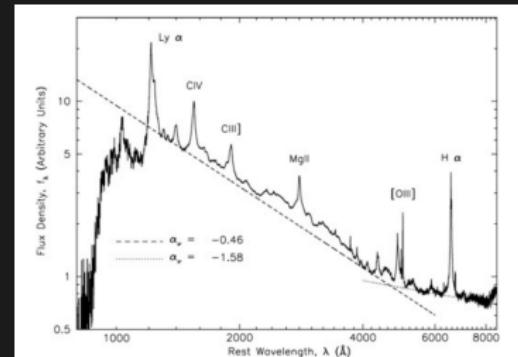
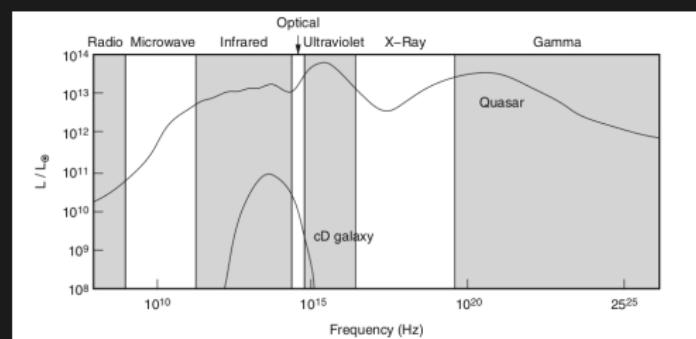
P. Schneider: Extragalactic Astronomy



Aktivní galaktická jádra

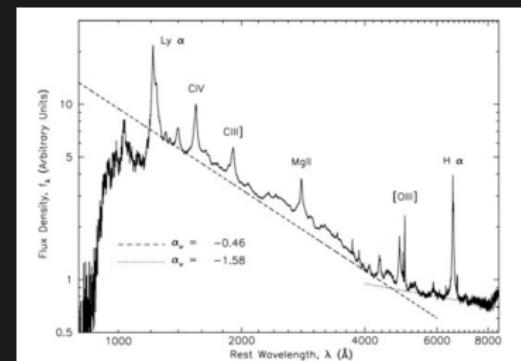
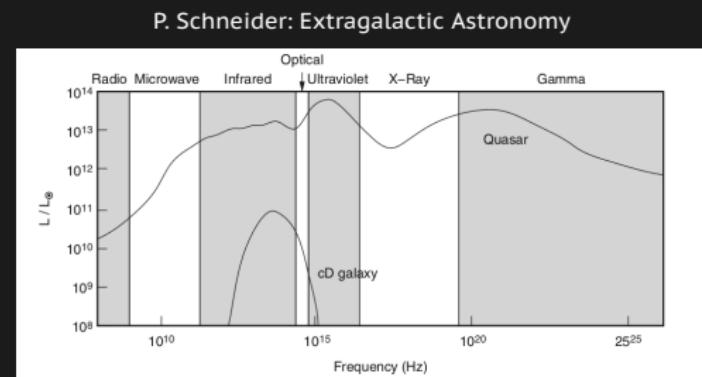
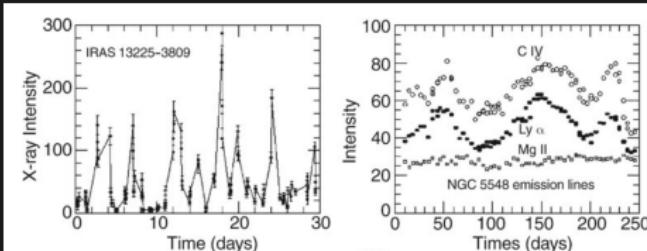
- enormní zářivost
 - $L \approx 10^{10} - 10^{14} L_\odot$
- netermální spektrum
- široké emisní čáry
 - rychlosti ≈ 1000 km/s

P. Schneider: Extragalactic Astronomy



Aktivní galaktická jádra

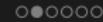
- enormní zářivost
 - $L \approx 10^{10} - 10^{14} L_{\odot}$
- netermální spektrum
- široké emisní čáry
 - rychlosti ≈ 1000 km/s
- rychlé změny jasnosti
 \Rightarrow rozměry < 1 pc



Galaxie raného typu



Aktivní galaktická jádra



Zpětná vazba AGN



Cavity Detection Tool



Supermasivní černá díra



Galaxie raného typu
○○○○

Aktivní galaktická jádra
○●○○○○

Zpětná vazba AGN
○○○○

Cavity Detection Tool
○○○○○

Supermasivní černá díra

- vznikly srážkami a akrecí plynu

Galaxie raného typu
○○○○

Aktivní galaktická jádra
○●○○○

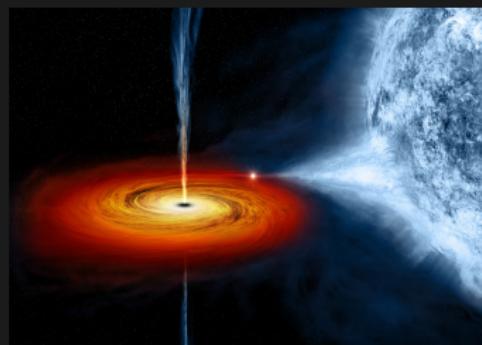
Zpětná vazba AGN
○○○○

Cavity Detection Tool
○○○○○

Supermasivní černá díra

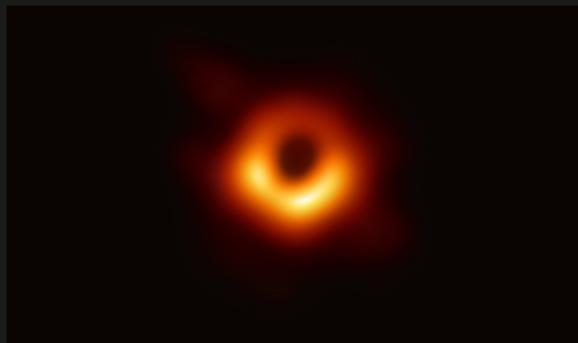
- vznikly srážkami a akrecí plynu

stelární



přímý kolaps

supermasivní



srážky + akrece

Supermasivní černá díra

- vznikly srážkami a akrecí plynu
- popsána 3 parametry:
 - hmotnost $M_\bullet = 10^5 - 10^{10} M_\odot$
 - spin $a = \frac{Jc}{GM^2}$ $J < \frac{GM^2}{c}$ $0 \leq a < 1$
 - náboj $Q = ???$

Supermasivní černá díra

- vznikly srážkami a akrecí plynu

- popsána 3 parametry:

– hmotnost $M_\bullet = 10^5 - 10^{10} M_\odot$

– spin $a = \frac{Jc}{GM^2}$ $J < \frac{GM^2}{c}$ $0 \leq a < 1$

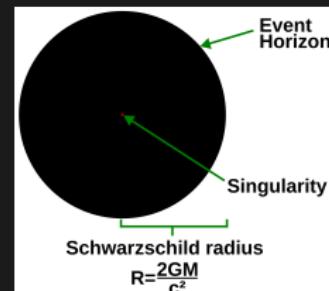
– náboj $Q = ???$

	Non-rotating ($J = 0$)	Rotating ($J > 0$)
Uncharged ($Q = 0$)	Schwarzschild	Kerr
Charged ($Q \neq 0$)	Reissner-Nordström	Kerr-Newman

Supermasivní černá díra

- vznikly srážkami a akrecí plynu
- popsána 3 parametry:
 - hmotnost $M_\bullet = 10^5 - 10^{10} M_\odot$
 - spin $a = \frac{Jc}{GM^2}$ $J < \frac{GM^2}{c}$ $0 \leq a < 1$
 - náboj $Q = ???$
- Schwarzschildovo řešení ($a = 0, Q = 0$)

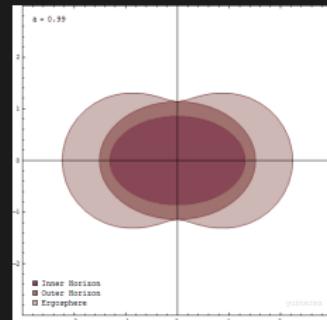
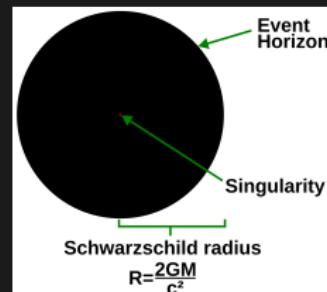
$$r_s = \frac{2GM}{c^2} \quad r_s = 0.001 - 400 \text{ AU}$$



Supermasivní černá díra

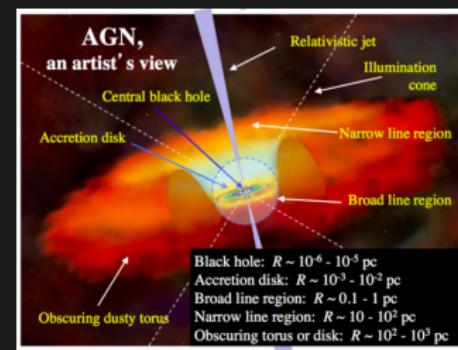
- vznikly srážkami a akrecí plynu
- popsána 3 parametry:
 - hmotnost $M_\bullet = 10^5 - 10^{10} M_\odot$
 - spin $a = \frac{Jc}{GM^2}$ $J < \frac{GM^2}{c}$ $0 \leq a < 1$
 - náboj $Q = ???$
- Schwarzschildovo řešení ($a = 0, Q = 0$)

$$r_s = \frac{2GM}{c^2} \quad r_s = 0.001 - 400 \text{ AU}$$
- Kerrovo řešení ($Q = 0$)



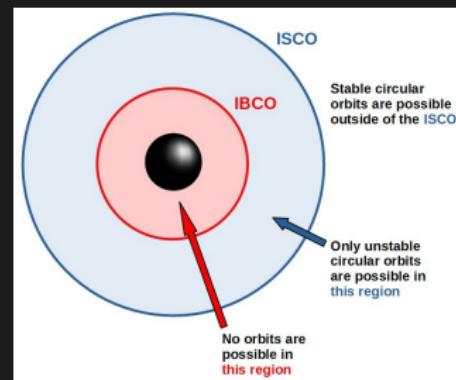
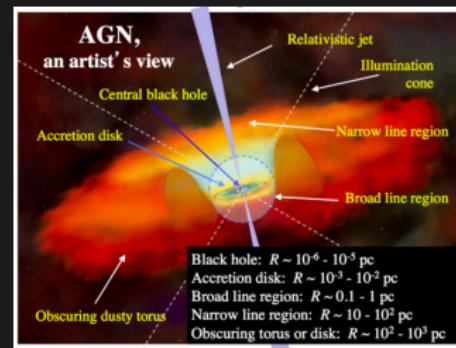
Akrece

- akrece okolního plynu (plasmy)
 - diferenciální rotace → tření
- přeměna E_p na E_k a záření



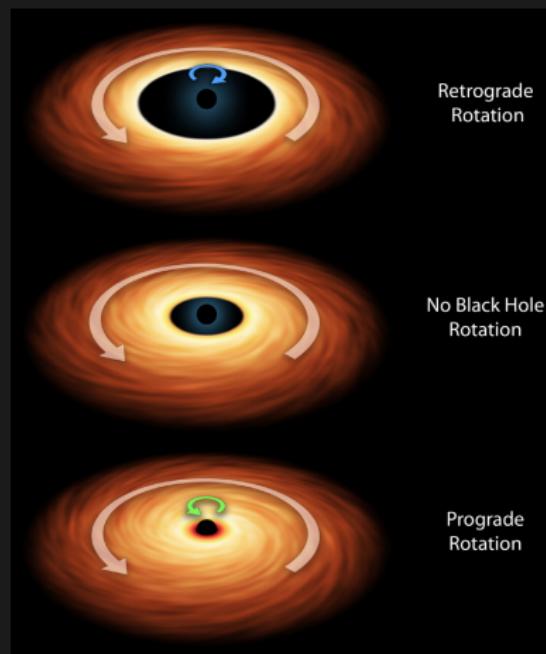
Akrece

- akrece okolního plynu (plasmy)
 - diferenciální rotace → tření
- přeměna E_p na E_k a záření
- efektivita přeměny hmoty
 - závisí na rotaci (ISCO)
 - nerotující (6 %), rotující (40 %)
 - fúze (< 1 %)



Akrece

- akrece okolního plynu (plasmy)
 - diferenciální rotace → tření
- přeměna E_p na E_k a záření
- efektivita přeměny hmoty
 - závisí na rotaci (ISCO)
 - nerotující (6 %), rotující (40 %)
 - fúze (< 1 %)



Galaxie raného typu



Aktivní galaktická jádra



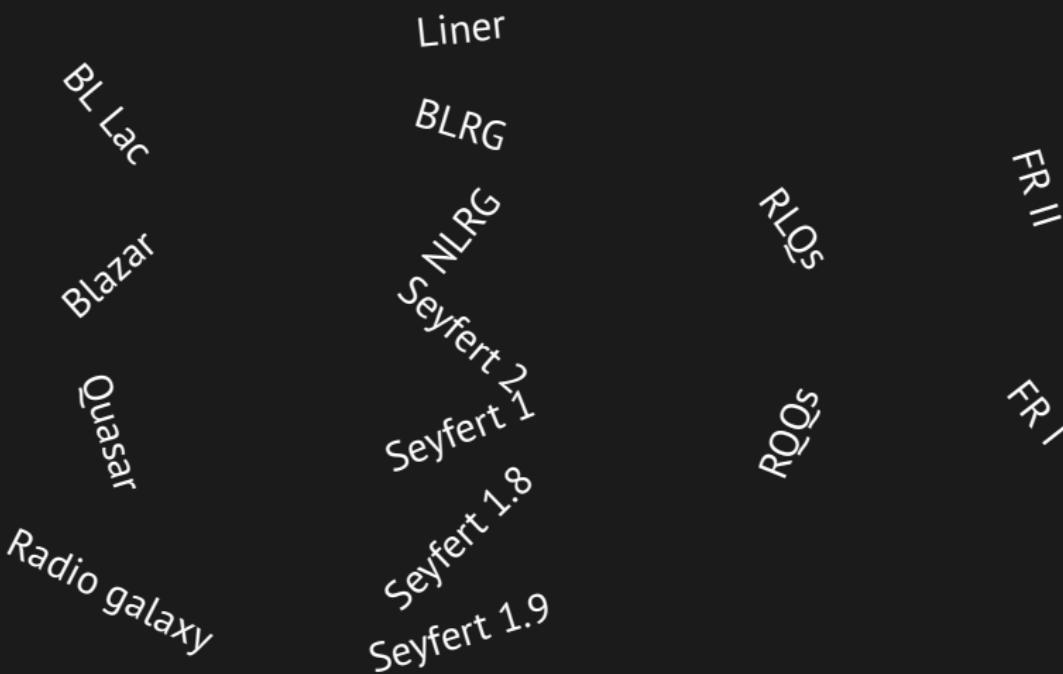
Zpětná vazba AGN



Cavity Detection Tool



Rozdělení AGN



Galaxie raného typu



Aktivní galaktická jádra



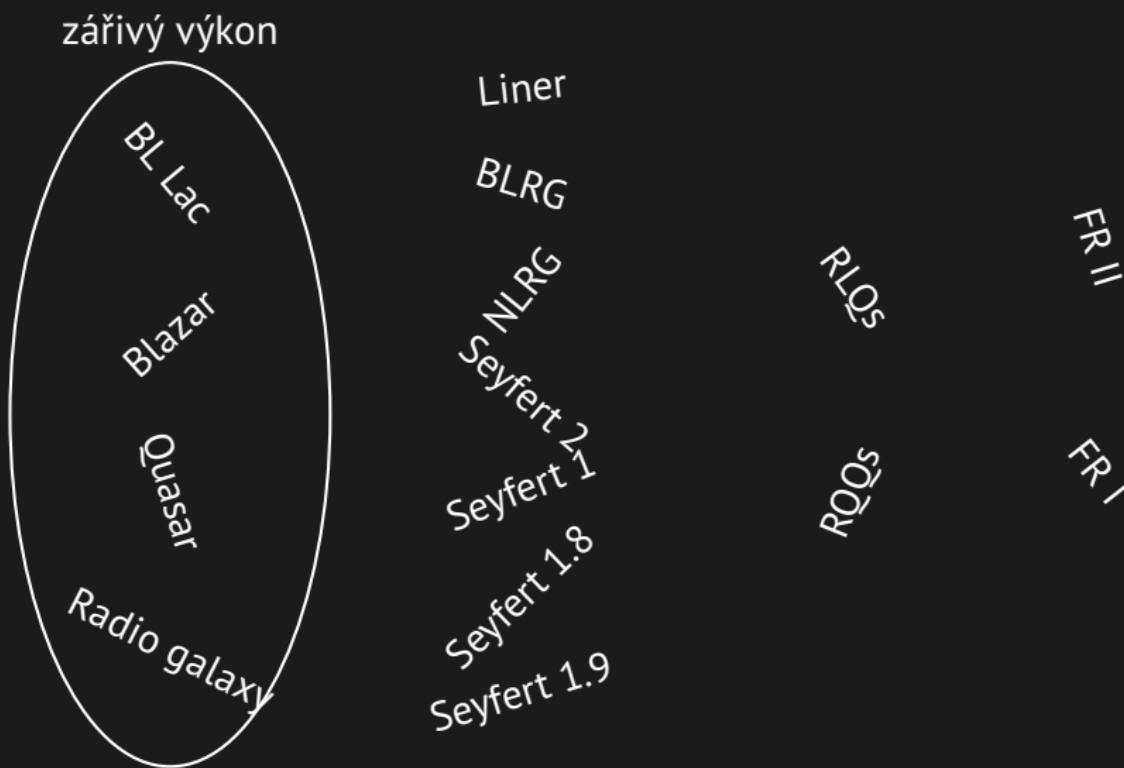
Zpětná vazba AGN



Cavity Detection Tool



Rozdělení AGN



Galaxie raného typu



Aktivní galaktická jádra



Zpětná vazba AGN



Cavity Detection Tool



Rozdělení AGN

zářivý výkon



šířka emisních čar

FR II
RLOF
RQOS
FR I

Rozdělení AGN

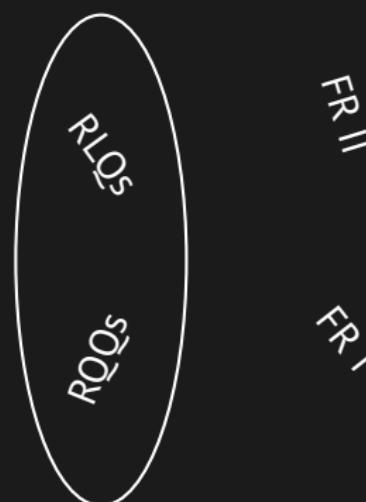
zářivý výkon



šířka emisních čar



radiová jasnost



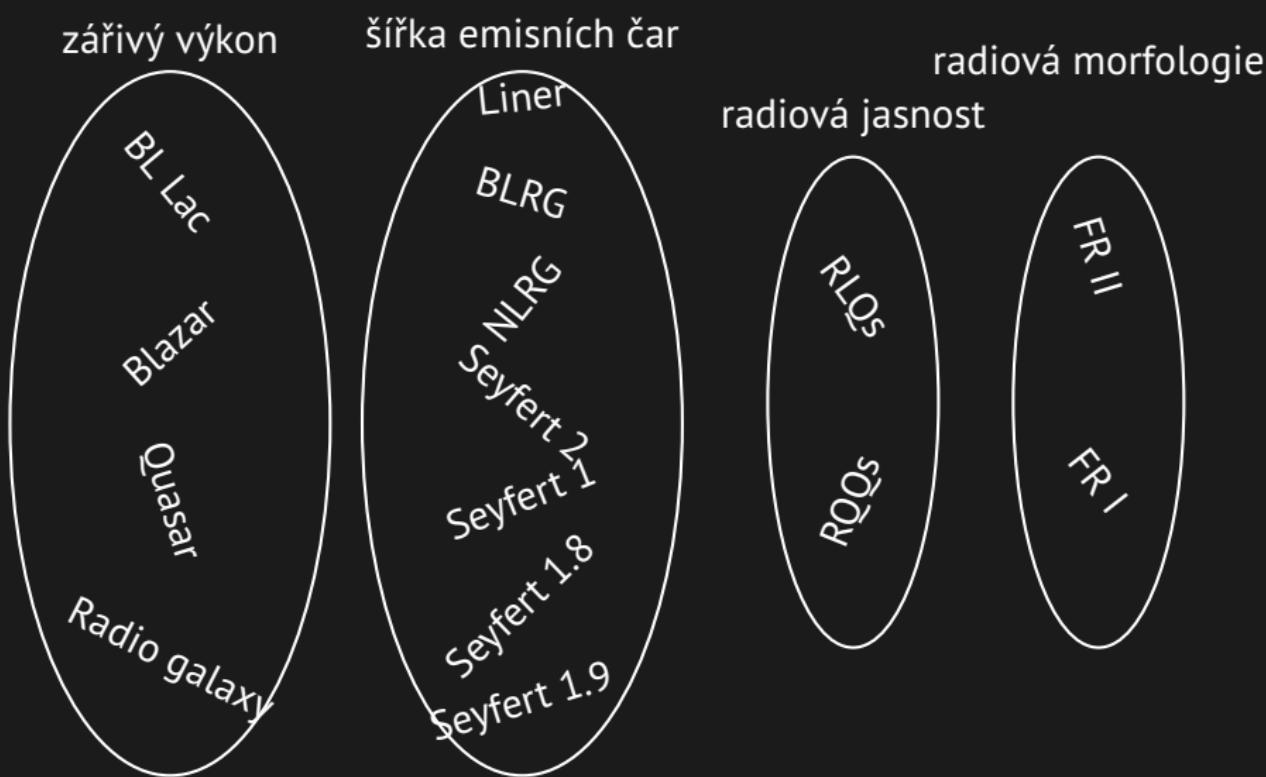
Galaxie raného typu
○○○○

Aktivní galaktická jádra
○○○●○○

Zpětná vazba AGN
○○○○

Cavity Detection Tool
○○○○○

Rozdělení AGN



Galaxie raného typu



Aktivní galaktická jádra



Zpětná vazba AGN

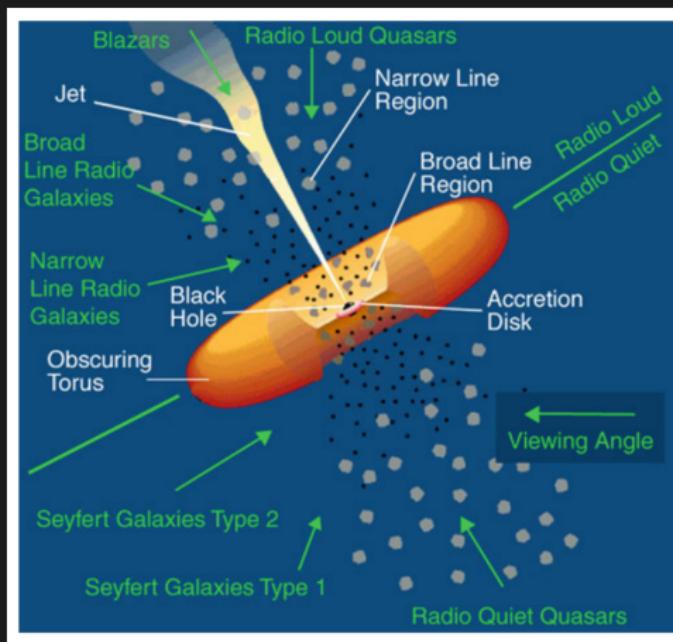


Cavity Detection Tool



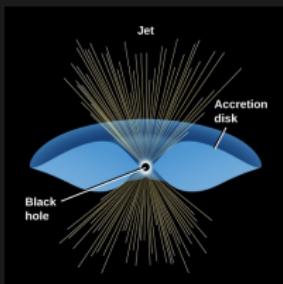
Rozdělení AGN

Unification scheme



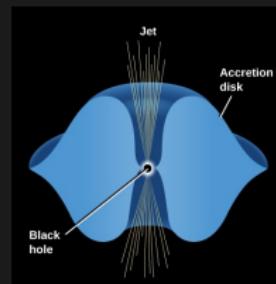
Kvazar nebo Radiová galaxie?

Kvazar

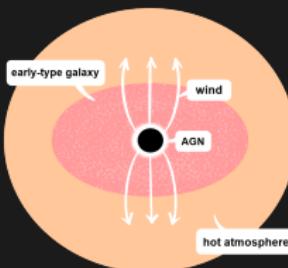


- opticky tlustý disk
- zářivě efektivní
- $10^{-3} - 10^0 \dot{m}_{\text{Edd}}$

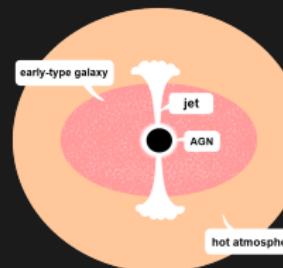
Radiová galaxie



- opticky tenký torus
- zářivě neefektivní
- $10^{-6} - 10^{-4} \dot{m}_{\text{Edd}}$



- EM záření
- rádiově slabé
- všechny typy galaxií



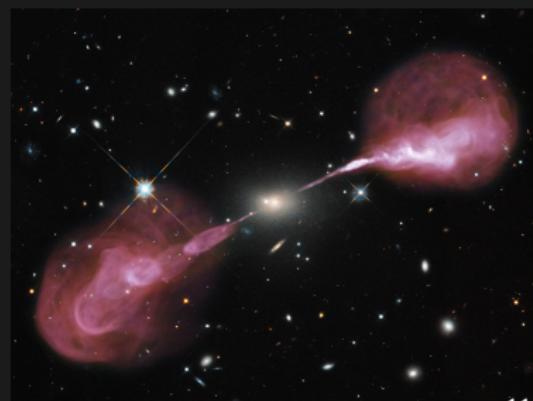
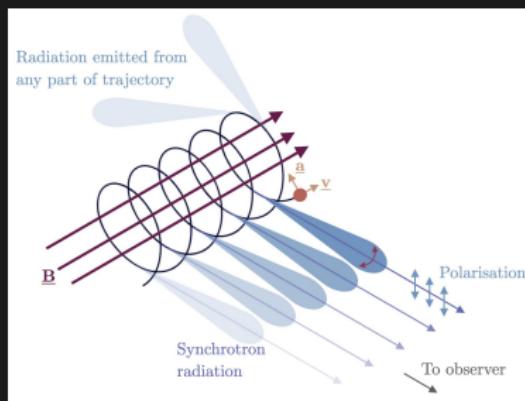
- relativistické částice
- rádiově silné
- galaxie raného type

Radiové galaxie

- nižší svítivost $L = 10^8 - 10^{10}L_\odot$
- výtrysky relativistických částic $P_{\text{jet}} = 10^{10} - 10^{13}L_\odot$
- částice (e^- , e^+) v magnetickém poli
⇒ synchrotronová emise ⇒ radiové laloky

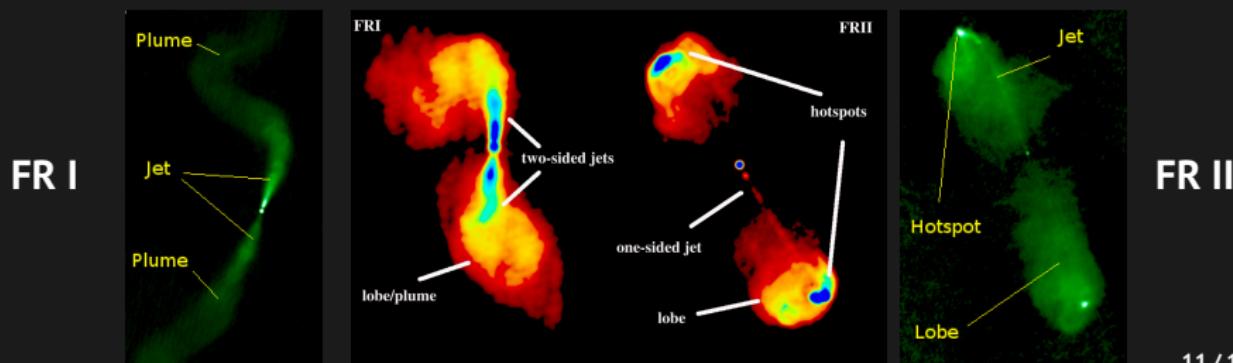
Radiové galaxie

- nižší svítivost $L = 10^8 - 10^{10}L_{\odot}$
- výtrysky relativistických částic $P_{\text{jet}} = 10^{10} - 10^{13}L_{\odot}$
- částice (e^- , e^+) v magnetickém poli
 \Rightarrow synchrotronová emise \Rightarrow radiové laloky



Radiové galaxie

- nižší svítivost $L = 10^8 - 10^{10}L_{\odot}$
- výtrysky relativistických částic $P_{\text{jet}} = 10^{10} - 10^{13}L_{\odot}$
- částice (e^- , e^+) v magnetickém poli
 \Rightarrow synchrotronová emise \Rightarrow radiové laloky
- Fanaroff–Riley klasifikace



Radiové galaxie

- nižší svítivost $L = 10^8 - 10^{10}L_{\odot}$
- výtrysky relativistických částic $P_{\text{jet}} = 10^{10} - 10^{13}L_{\odot}$
- částice (e^- , e^+) v magnetickém poli
⇒ synchrotronová emise ⇒ radiové laloky
- Fanaroff–Riley klasifikace
- pozorování - VLA, LOFAR, MWA



1 – 2 GHz



10 – 240 MHz



70 – 300 MHz

Galaxie raného typu



Aktivní galaktická jádra



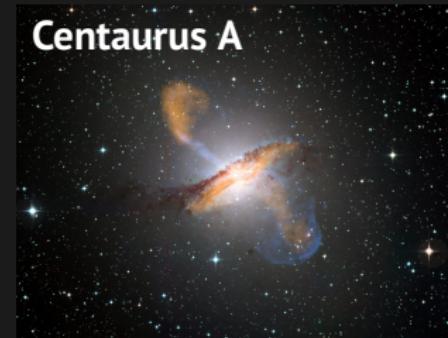
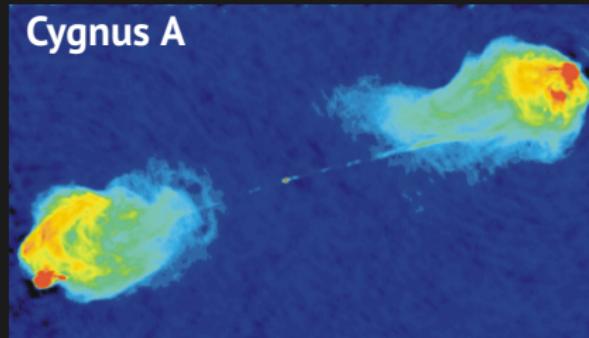
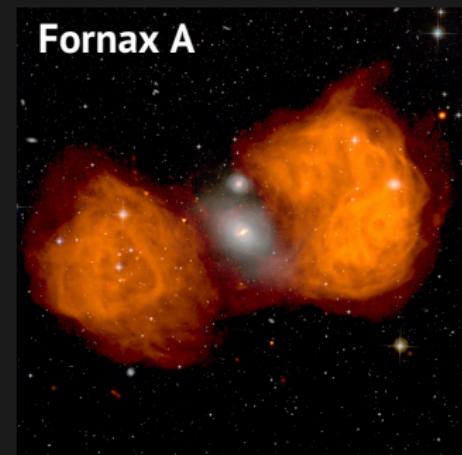
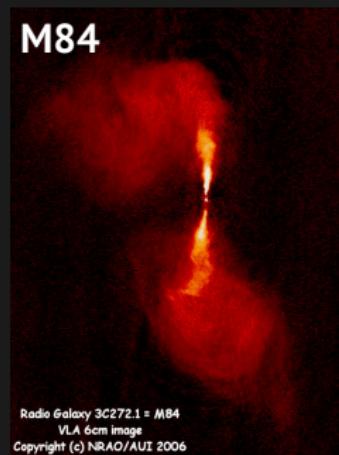
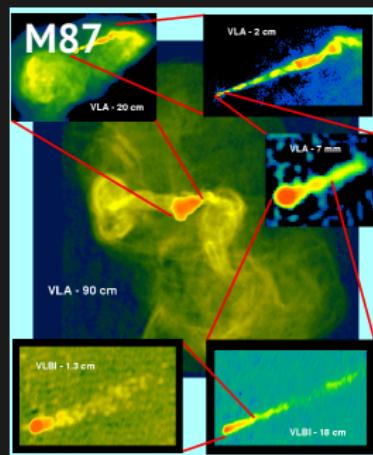
Zpětná vazba AGN



Cavity Detection Tool



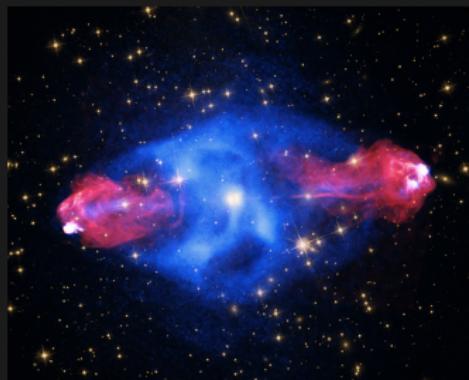
Radiové galaxie





Zpětná vazba AGN

- interakce jetů a atmosfér
⇒ rentgenové dutiny



Galaxie raného typu



Aktivní galaktická jádra



Zpětná vazba AGN

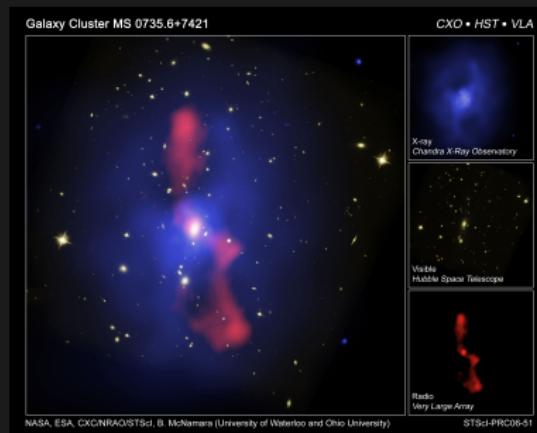


Cavity Detection Tool



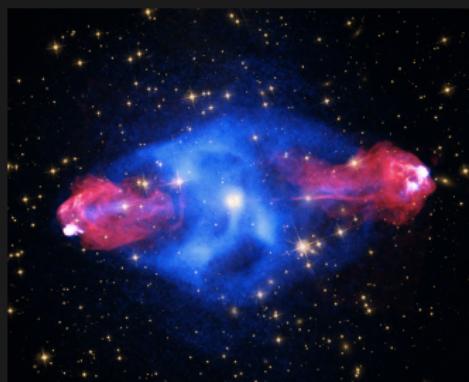
Zpětná vazba AGN

- interakce jetů a atmosfér
⇒ rentgenové dutiny



Zpětná vazba AGN

- interakce jetů a atmosfér
 - ⇒ rentgenové dutiny
- ohřev atmosféry
 - zvukové a rázové vlny
 - turbulentní proudění
 - disipace dutin



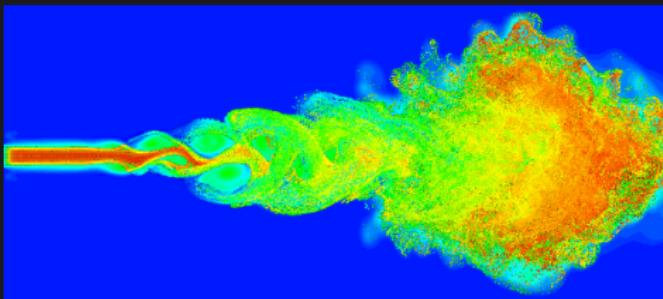
Zpětná vazba AGN

- interakce jetů a atmosfér
 - ⇒ rentgenové dutiny
- ohřev atmosféry
 - zvukové a rázové vlny
 - turbulentní proudění
 - disipace dutin



Zpětná vazba AGN

- interakce jetů a atmosfér
 - ⇒ rentgenové dutiny
- ohřev atmosféry
 - zvukové a rázové vlny
 - turbulentní proudění
 - disipace dutin



Galaxie raného typu



Aktivní galaktická jádra



Zpětná vazba AGN



Cavity Detection Tool



Zpětná vazba (mechanismus)

Jak se výkon jetů reguluje?

Galaxie raného typu



Aktivní galaktická jádra



Zpětná vazba AGN



Cavity Detection Tool



Zpětná vazba (mechanismus)

Jak se výkon jetů reguluje?

plyn chládne

Zpětná vazba (mechanismus)

Jak se výkon jetů reguluje?



padá na SMBH

plyn chládne

Zpětná vazba (mechanismus)

Jak se výkon jetů reguluje?



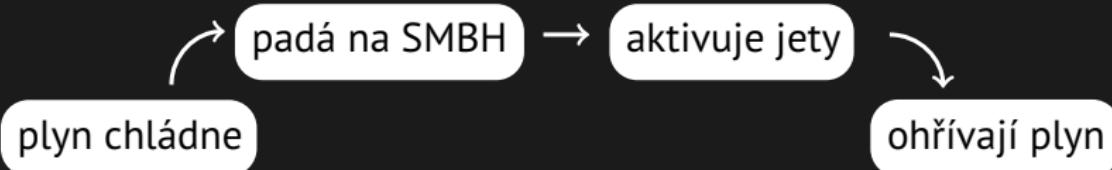
padá na SMBH

→ aktivuje jety

plyn chládne

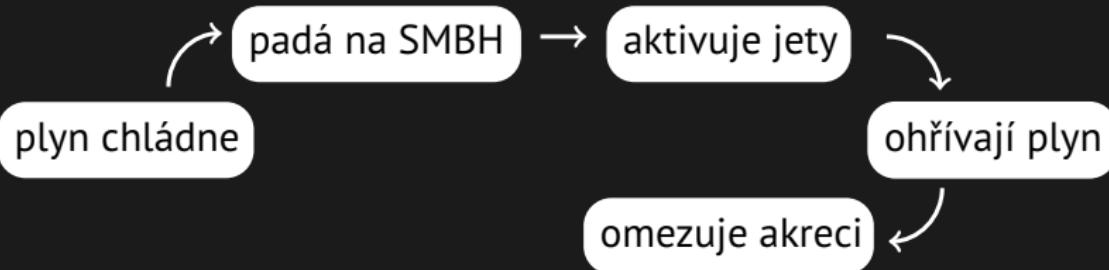
Zpětná vazba (mechanismus)

Jak se výkon jetů reguluje?



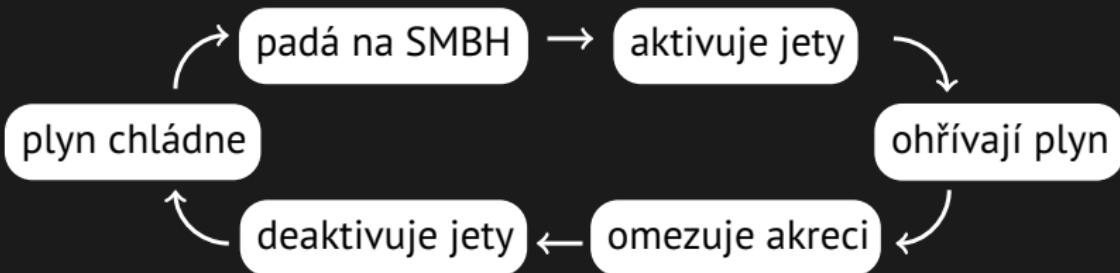
Zpětná vazba (mechanismus)

Jak se výkon jetů reguluje?



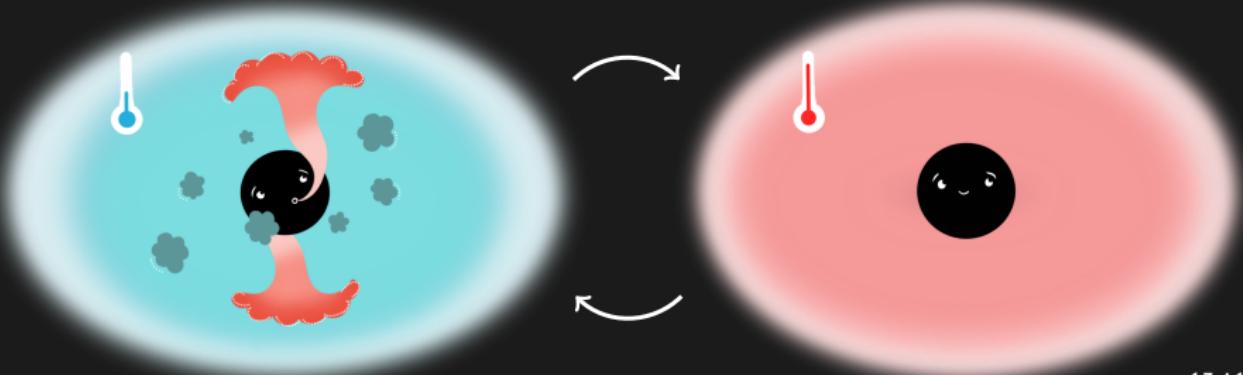
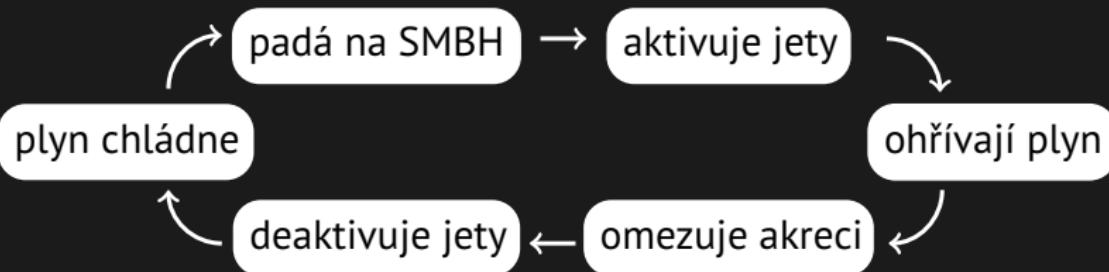
Zpětná vazba (mechanismus)

Jak se výkon jetů reguluje?



Zpětná vazba (mechanismus)

Jak se výkon jetů reguluje?



Galaxie raného typu



Aktivní galaktická jádra



Zpětná vazba AGN



Cavity Detection Tool



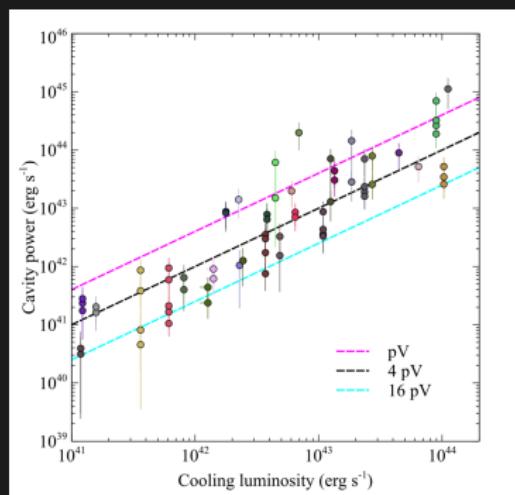
Důsledky mechanické zpětné vazby

přijatá $E \approx$ vyzářená E

Důsledky mechanické zpětné vazby

přijatá $E \approx$ vyzářená E

horká atmosféra

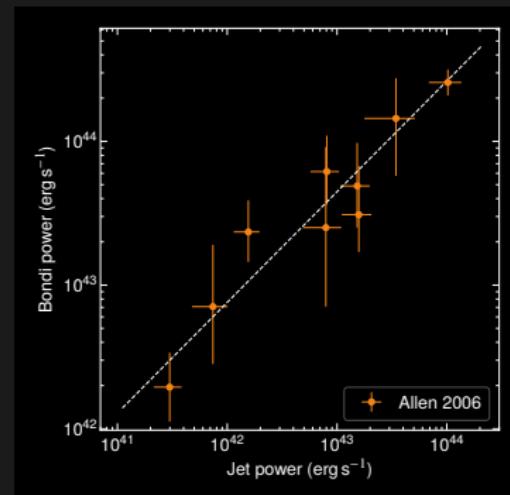
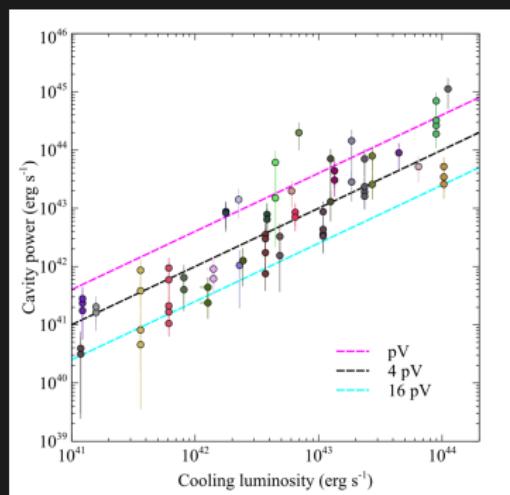


Důsledky mechanické zpětné vazby

přijatá $E \approx$ vyzářená E

horká atmosféra

aktivní galaktické jádro

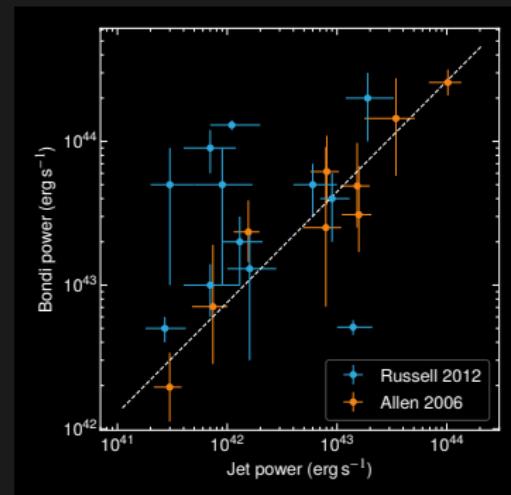
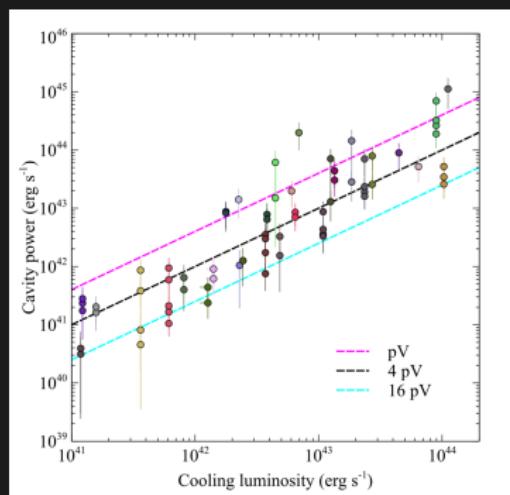


Důsledky mechanické zpětné vazby

přijatá $E \approx$ vyzářená E

horká atmosféra

aktivní galaktické jádro

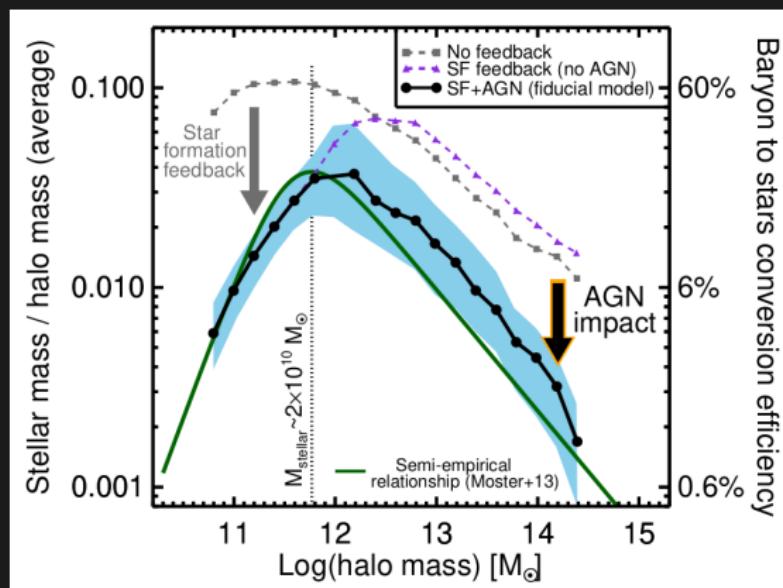


Vliv na tvorbu hvězd

- atmosféra nechládne \Rightarrow potlačena tvorba hvězd
- hmotnější galaxie \Rightarrow silnější AGN

Vliv na tvorbu hvězd

- atmosféra nechládne \Rightarrow potlačena tvorba hvězd
- hmotnější galaxie \Rightarrow silnější AGN



Galaxie raného typu



Aktivní galaktická jádra



Zpětná vazba AGN



Cavity Detection Tool



Cavity Detection Tool - motivace



Galaxie raného typu



Aktivní galaktická jádra



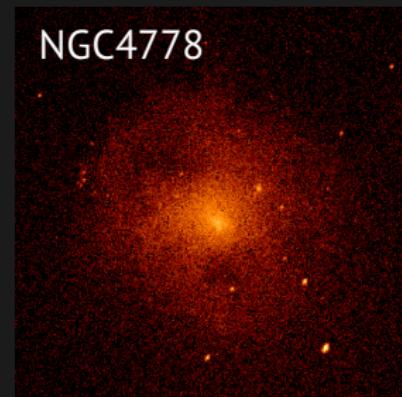
Zpětná vazba AGN



Cavity Detection Tool



Cavity Detection Tool - motivace



Galaxie raného typu



Aktivní galaktická jádra



Zpětná vazba AGN



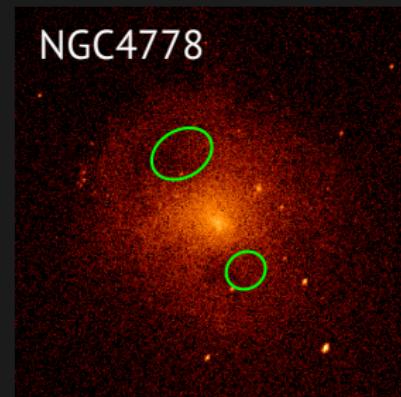
Cavity Detection Tool



Cavity Detection Tool - motivace



NGC5813



NGC4778

Galaxie raného typu



Aktivní galaktická jádra



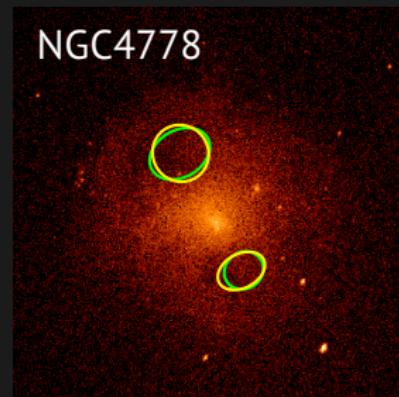
Zpětná vazba AGN



Cavity Detection Tool



Cavity Detection Tool - motivace



Galaxie raného typu



Aktivní galaktická jádra



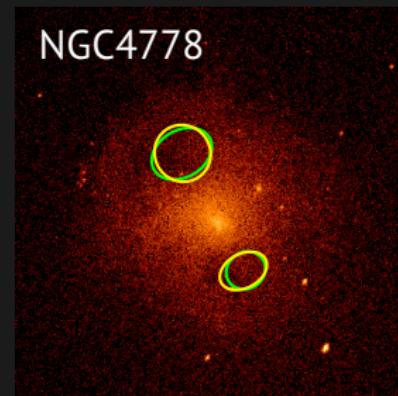
Zpětná vazba AGN



Cavity Detection Tool



Cavity Detection Tool - motivace



Galaxie raného typu



Aktivní galaktická jádra



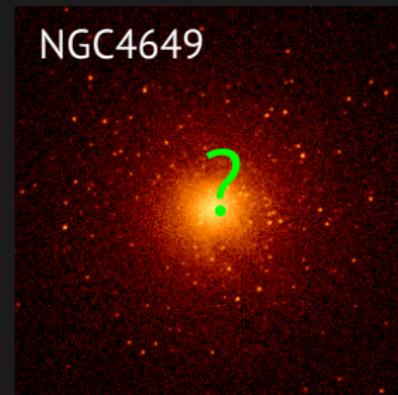
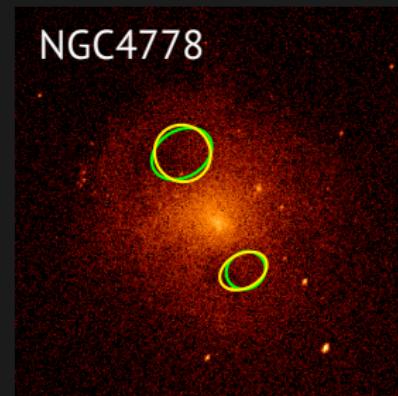
Zpětná vazba AGN



Cavity Detection Tool



Cavity Detection Tool - motivace



Cavity Detection Tool

- umělé vytvořené snímky
 - 300 tisíc snímků
 - 50 % bez dutin

Galaxie raného typu



Aktivní galaktická jádra



Zpětná vazba AGN

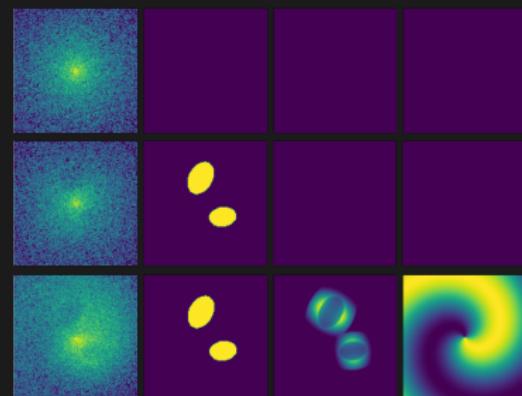


Cavity Detection Tool



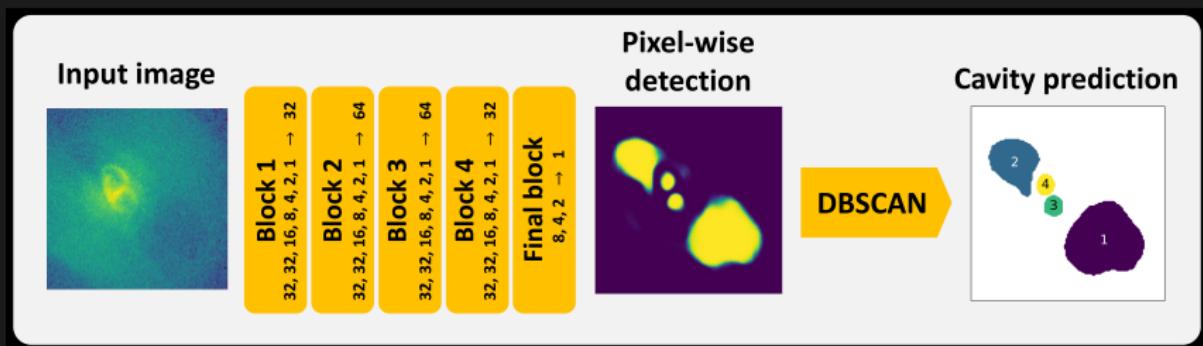
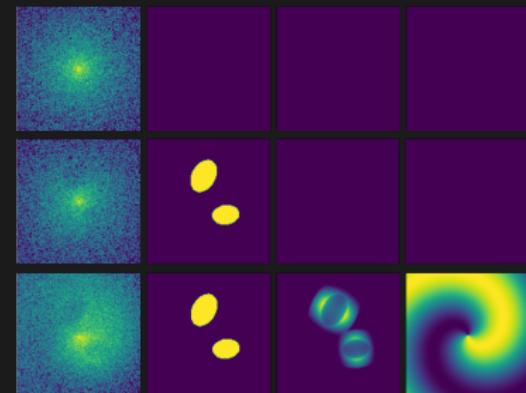
Cavity Detection Tool

- umělé vytvořené snímky
 - 300 tisíc snímků
 - 50 % bez dutin
- CADET architektura
 - 5 konvolučních bloků
 - clusterovací algoritmus



Cavity Detection Tool

- umělé vytvořené snímky
 - 300 tisíc snímků
 - 50 % bez dutin
- CADET architektura
 - 5 konvolučních bloků
 - clusterovací algoritmus



Galaxie raného typu



Aktivní galaktická jádra



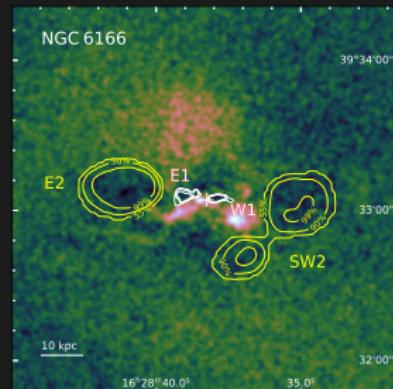
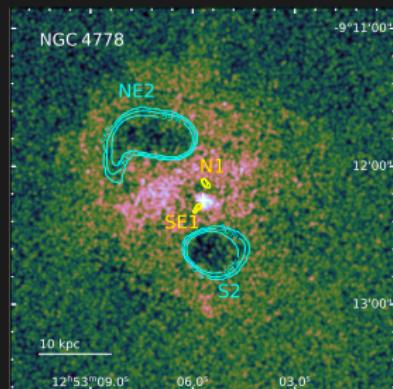
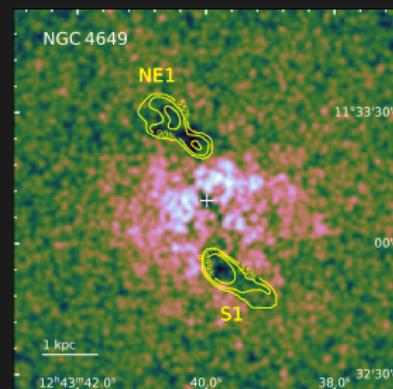
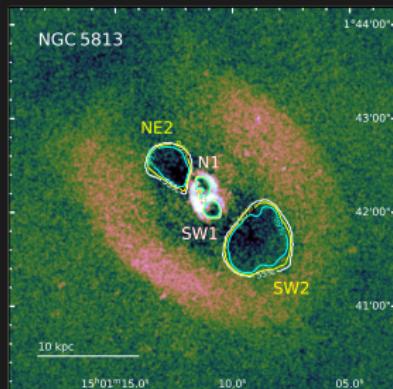
Zpětná vazba AGN



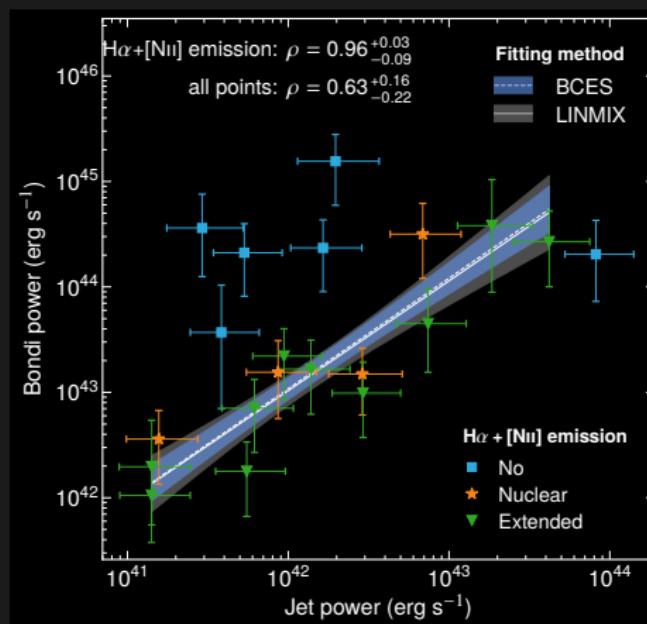
Cavity Detection Tool



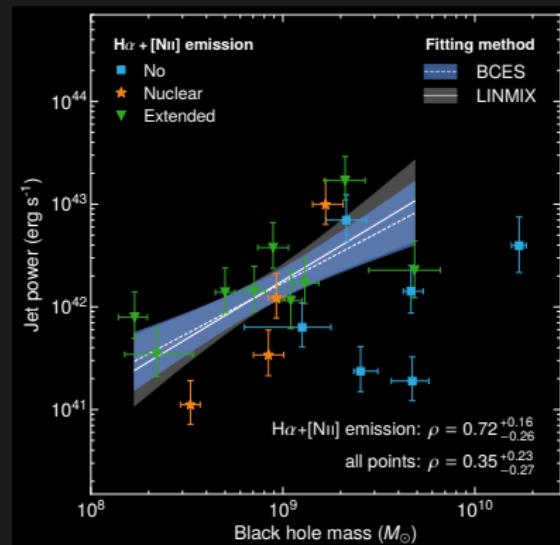
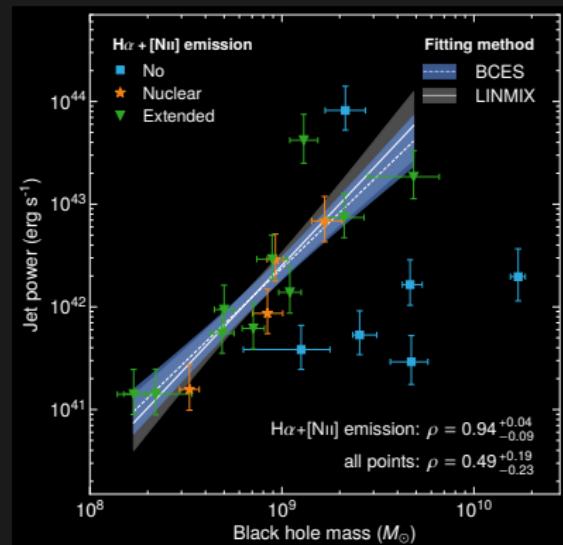
Cavity Detection Tool - výsledky

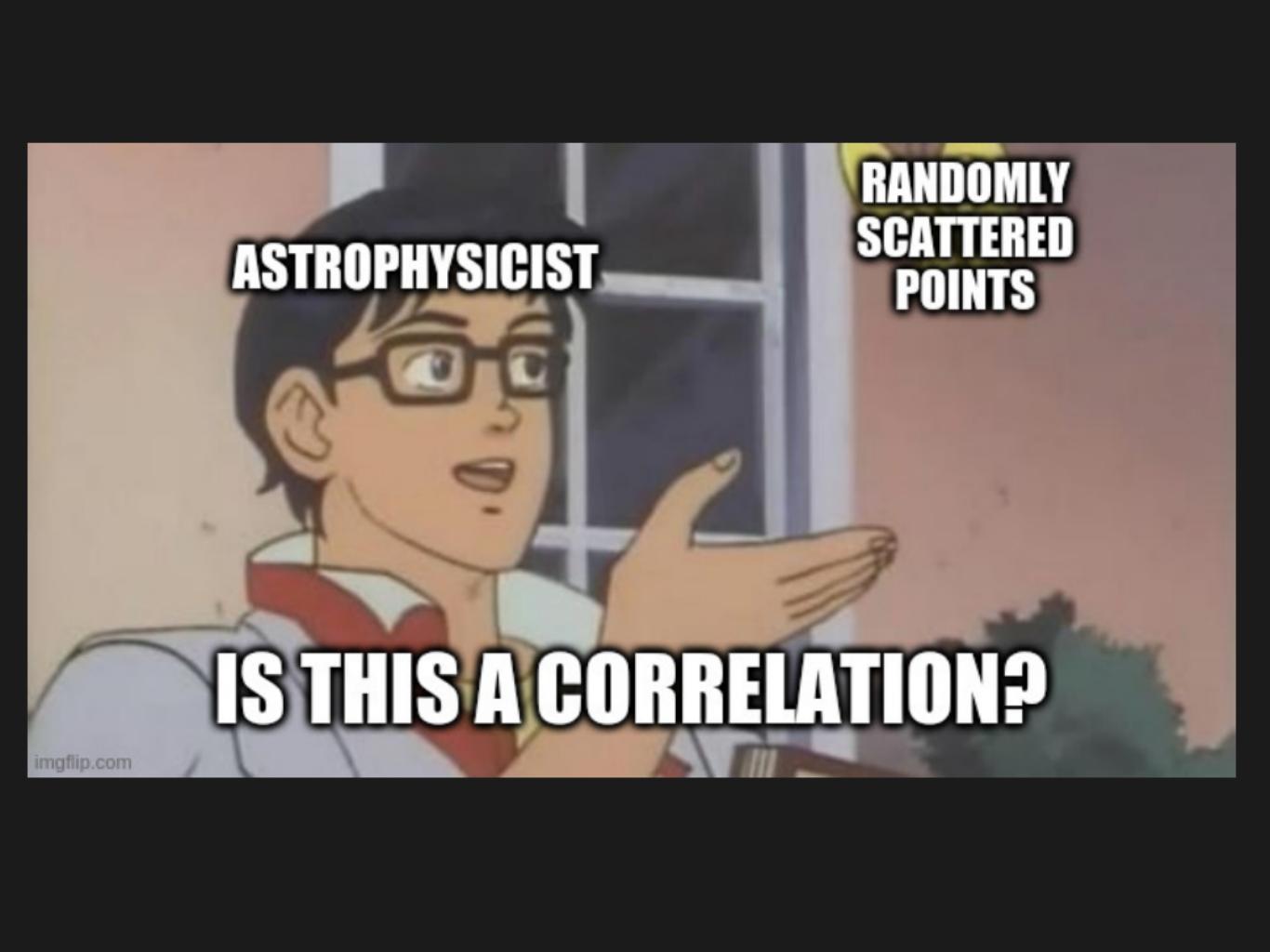


Korelace



Korelace



A cartoon illustration of a young man with dark hair and glasses, wearing a grey hoodie over a red and white striped shirt. He is pointing his right hand towards the right side of the frame. In the upper right corner, there is a yellow cluster of small dots. The background shows a window with a grid pattern and some trees outside.

ASTROPHYSICIST

**RANDOMLY
SCATTERED
POINTS**

IS THIS A CORRELATION?