



EVROPSKÁ UNIE  
Evropské strukturální a investiční fondy  
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání



Název projektu	Rozvoj vzdělávání na Slezské univerzitě v Opavě
Registrační číslo projektu	CZ.02.2.69/0.0./0.0/16_015/0002400

# Akreční struktury v blízkosti černých děr a neutronových hvězd

Průvodní list studijního materiálu

**Debora Lančová a kolektiv**

**Opava 2020**



**SLEZSKÁ  
UNIVERZITA  
V OPAVĚ**

## **Obsah**

PŘEDMLUVA.....	3
1 AKREČNÍ STRUKTURY V BLÍZKOSTI ČERNÝCH DĚR A NEUTRONOVÝCH HVĚZD.....	4
1.1 Scénář.....	6
2 PEDAGOGICKO DIDAKTICKÉ POZNÁMKY .....	18
POUŽITÁ LITERATURA .....	19
PŘEHLED DOSTUPNÝCH IKON.....	20

## PŘEDMLUVA

Tento průvodní list byl vypracován k jednomu ze seriálu 10 vzdělávacích pořadů určených pro sférickou projekci, které vznikly v rámci projektu „Rozvoj vzdělávání na Slezské univerzitě v Opavě“.

Zabývají se vesměs astrofyzikálními tématy, jak je zřejmé i z názvů jednotlivých pořadů:

*Binární systémy s neutronovou hvězdou, Binární systémy s černou dírou, Optické efekty v extrémních gravitačních polích, Akreční struktury v blízkosti černých děr a neutronových hvězd, Vyzařování v silné gravitaci, Život pod černými slunci – exoplanety u černých děr, Kosmické mikrovlnné pozadí, Rentgenové observační kosmické mise, Akreční disk u černých děr zblízka, Astrofyzika plná extrémů*

Jednotlivé scénáře připravovali samostatně jejich tvůrci – Jan Hladík, Adam Hofer, Debora Lančová, Jan Novotný, Martin Petrásek, Jan Schee a Tomáš Gráf.

Na výrobě se však kromě autorů scénářů podíleli také další tvůrci z řad zaměstnanců i studentů univerzity: Jan Bartoš, Lucie Dospivová, Viky Kurečků, Adam Langer, Vojtěch Pazdera, Ondřej Smékal a Kateřina Šimečková.

Všichni tvůrci děkují Slezské univerzitě v Opavě za možnost podílet se na tomto projektu a já si dovoluji poděkovat všem kolegyním a kolegům za spolupráci, bylo mi ctí se s nimi při práci na projektu setkávat.

Tomáš Gráf

# 1 AKREČNÍ STRUKTURY V BLÍZKOSTI ČERNÝCH DĚR A NEUTRONOVÝCH HVĚZD



## **TECHNICKÝ POPIS**

Pořad je vyroben pro sférickou projekci v systému Digistar 6.

---



## **PRŮVODCE STUDIEM – STUDIJNÍ PŘEDPOKLADY**

Na studenta nejsou kladeny nároky na žádné speciální znalosti.

---



## **RYCHLÝ NÁHLED STUDIJNÍHO MATERIÁLU**

Pořad popisuje chování a vzhled různých modelů akrečních disků v okolí černých děr a neutronových hvězd, vysvětluje princip akrečních procesů a vlastnosti několika modelů. Také se krátce zabývá výzkumem a metodami modelování akrečních disků.

---



## **CÍLE STUDIJNÍHO MATERIÁLU**

- Pochopení vzniku akrečních disků
  - Pochopení vlivu zákonu zachování na chování hmoty v extrémních gravitačních polích
- 



## **KLÍČOVÁ SLOVA STUDIJNÍHO MATERIÁLU**

Akreční disk, moment hybnosti, vlastnosti plazmatu, černá díra, neutronová hvězda, supernova

---

## ČAS POTŘEBNÝ KE STUDIU



Stopáž studijního materiálu: 21 minut

Doporučený čas ke studiu: 2 hodiny

---

## DALŠÍ ZDROJE – DOPORUČENÁ LITERATURA



- *Vybrané kapitoly z astrofyziky – díl 30. Jak se pozorují černé díry?* Jiří Svoboda, <https://astro.mff.cuni.cz/vyuka/AST021/Svoboda/1.pdf>
  - *Gravitace, černé díry a fyzika prostoročasu*, Ulman, V., dostupné online: <http://astronuklfyzika.sweb.cz/Gravitace4-8.htm>
  - *Encyklopedie fyziky*, Reichl, J., dostupné online: <http://fyzika.jre-ichl.com/main.article/view/1158-hledani-cernych-der-a-jejich-projevy>
  - *The Wobbling Shadow of the M87\* Black Hole*, EHT collaboration, [https://www.youtube.com/watch?v=v\\_Bk2997YMA&t=1s](https://www.youtube.com/watch?v=v_Bk2997YMA&t=1s)
  - *Feynmanovy přednášky z fyziky*, R. P. Feynman, Fragment 2005
- 

## DALŠÍ ZDROJE – ROZŠÍŘUJÍCÍ LITERATURA



- *The science of Interstellar*, Thorne, K. S., & Nolan, C. (2014).
  - Gravity's fatal attraction: Black holes in the universe, Mitchell C. Begelman, (1996)
-

## 1.1 Scénář

Když se ocitnete pod jasnou noční oblohou a máte čas se dívat do hlubin vesmíru, tak vás může napadnout, že takový pohled měli lidé od nepaměti. A budete mít pravdu ...

Jenže po většinu věků byly pro člověka hvězdy na noční obloze jen vzdálená kulisa se spoustou "světýlek". Němí a strnulí svědci dění na Zemi.

Teprve posledních sto padesát let se taková představa radikálně mění. Už víme, že hvězdy nejsou věčné. Stále podrobněji jsme schopni popsat změny jejich fyzikálních vlastností, kterými procházejí od svého vzniku až po svůj zánik.

Toto je Betelgeuze, hvězda v souhvězdí Orion. Je velmi jasná, dokonce jedna z nejjasnějších hvězd na zimní obloze. A už pouhým okem vidíme, že je načervenalá. Je to tzv. červený veleobr a každou chvíli může explodovat jako supernova typu II.

Ale nesmíme zapomenout, že ve vesmíru znamená „brzy“ také třeba několik set tisíc až milionů let.

*When you are under a clear night sky and have a time to look beyond the darkness of the universe you start to think all of a sudden that this view must have been presented to humankind since time immemorial. And you will be indeed right...*

*However, during that time the night sky was somehow an unexplainable scenery with lots of small lights everywhere. Voiceless and rigid witnesses of all the acts happening down on the Earth.*

*It was only in the last 150 years that this perception has rapidly changed. We are already aware that stars are not eternal at all. We were able to come up with better definitions and explanations related to their physical properties changes from their beginning until their demise.*

*Let me introduce you to the Betelgeuze, a star in Orion's constellation. It is quite bright. In fact, it is one of the brightest stars in the winter sky. Just by looking at it we can tell that she is in somewhat a reddish colour. It is a so-called red giant and it has an ability to anytime explode like a supernova type II.*

*But let's not forget that by saying anytime, we mean that in the universe terms. Soon and anytime can mean several hundred thousands up to even billions of years.*

•

Podobnou událost pozorovali v roce 1054 čínští a arabští astronomové. Výbuch supernovy v souhvězdí Býka způsobil, že se na obloze objevila nová velmi jasná hvězda, která byla dokonce viditelná i za bílého dne. Po dvou letech ale se její jasnost snížila tak, že již nebyla

pozorovatelná vůbec. Na stejné místo zamířil svůj dalekohled anglický astronom John Bevis a v roce 1731 tam objevil nádhernou Krabí mlhovinu.

Uprostřed Krabí mlhoviny je neutronová hvězda, která vznikla zhroucením původního jádra hvězdy do oblasti velké asi 10 km.

Pokud by původní hvězda byla ještě hmotnější a měla více než 50 hmotností Slunce, zůstala by po ní jen černá díra.

*A similar event was viewed by chinese and arab astronomers back in 1054. The explosion of the supernova in the bull's constellation has resulted in a bright new star which was visible even during the daylight. After two years though, its brightness has unfortunately diminished to the point it stopped being visible at all. An english astronomer John Bevis tried his luck in 1731 on the same spot and found a beautiful crab nebula there. What an incredible discovery, right?*

*Right in the middle of the crab nebula is a neutron star. Once the previous core of the star collapsed, the neutron star was born and spread to the area about 10 kilometers big.*

*If the previous star was heavier and had its weight more than 50 times heavier than the sun, it would become a black hole instead.*

•

Zbytek materiálu z původní hvězdy byl explozí odvržen pryč do okolního prostoru, ale jeho část může být znovu vtažena “do hry”.

Jak víme, v přírodě a vesmíru platí zákony zachování. Třemi základními jsou zákony zachování energie, hybnosti a momentu hybnosti.

*The remaining material of the original star was thrown away into the other space following the explosion but there is still some chance left that some part of it could be still put together.*

*All of us are aware that there is a certain set of conditions in nature and space altogether called conservation rules. Three most basic ones are the conservation of energy, momentum and angular momentum.*

Zákon zachování energie nám říká, že energie se nesmí ztratit – jen přeměnit na jiný druh energie.

Veźměme si hvězdu o hmotnosti 10 Sluncí. Její celková klidová energie je určena vztahem  $E = mc^2$ , což je asi  $1.787 \cdot 10^{48}$  Joulů. To je veškerá energie, která je uložena v materiálu hvězdy.

Samozřejmě, že k celé této energii se dostat nemůžeme – vždy dochází k obrovským ztrátám, například při fúzi H na He, je teoretická účinnost 0,7 % - tedy méně než 1 % hmoty se přemění na energii. Při jaderném štěpení je to ještě mnohem méně.

Pokud tedy taková hvězda vybuchne jako supernova, žádná energie se neztratí – vzniklá neutronová hvězda má hmotnost třeba 1,5 hmotností Slunce, zbytek materiálu byl výbuchem rozmetán do okolí, ale velká část byla také vyzářena ve formě elektromagnetického záření, gravitačních vln nebo neutrin.

*A rule for the conservation of energy insists that no energy can be lost - it can only be changed to a different type of energy instead.*

*Let's go ahead and take as an example a star with weight around 10 Suns'. Its total resting energy is defined by connection of  $E = mc^2$ , which is around  $1.787 \cdot 10^{48}$  joules. That is all the energy saved in the material of the star.*

*Of course there is no chance for us to get to this energy - there are always significant losses for example during the fusion from H to HE; its theoretical effectiveness is ranging from 0 - 7 %; which means that less than 1% of mass will be changed to energy.*

*Should any star explode in a similar way as a supernova, no energy will be lost in the end – a new neutron star has got its weight 1-5 times of the Sun's. The rest of the material will be thrown out into its surroundings. Moreover, a huge part will radiate in the form of electromagnetic radiation, gravitational waves and finally, neutrinos.*

•

Zákon zachování hybnosti nám říká, že hybnost se zachovává, pokud na těleso nepůsobí vnější síla, zůstává v klidu nebo rovnoměrně přímočarém pohybu – podle 1. Newtonova zákona.

*The conservation of momentum law suggests that momentum is preserved should it not be influenced by external sources; it stays uninterrupted or in equal rectilinear movement following Newton's first law.*

Zákon zachování momentu hybnosti je trochu obtížnější. Ve své podstatě nám říká, že cokoliv se otáčí kolem nějakého bodu, se nepřestane točit bez působení vnějších sil.

*The law of preserving the angular momentum is a little bit more complicated. Any object which does orbit around a certain point will not be able to stop spinning (unless there is an external source included).*



•

Ale už z tvaru rovnice pro moment hybnosti

$$L = r \times p$$

vidíme, že velikost momentu hybnosti  $L$  závisí na vzdálenosti otáčejícího se tělesa od středu. Protože se moment hybnosti nemění, vidíme, že rychlost otáčení přímo úměrně závisí na vzdálenosti od středu otáčení  $r$  – čím blíže je těleso ke středu, tím rychleji se bude otáčet a naopak.

*Yet the following equation shape for the angular momentum  $L = r \times p$  shows us that the size of the angular momentum  $L$  depends on the distance of the orbiting object from its core. Since the angular momentum does not change at all we can conclude that the speed of spinning depends on the distance from the spinning core  $r$ . The closer the object is to the core, the faster it orbits and conversely.*

•

Nyní se vraťme k našemu příkladu hvězdy těsně před výbuchem. Jako každá hvězda, i ta naše rotuje s nějakou úhlovou rychlostí  $\omega$ . To znamená, že má nenulový moment hybnosti!

A teď, naše hvězda explodovala. Uprostřed zůstala malá neutronová hvězda, která má poloměr asi 10 km. Jenže průměr původní hvězdy byl řádově miliony kilometrů!

A tak díky zachování momentu hybnosti neutronová hvězda rotuje s neuvěřitelnou frekvencí několika set otáček za sekundu. Stal se z ní pulsar, jaký můžeme pozorovat i v Krabí mlhovině).

Ale i zbytek materiálu z původní hvězdy, který je teď volně rozptýlen po okolí, má stále nějaký svůj moment hybnosti. Sice – ano, při explozi se jeho hodnota snížila, ale zcela jistě není nulová. A tento materiál má tendenci obíhat kolem centra původní hvězdy, kde se nyní nachází neutronová hvězda.

A díky gyroskopickému efektu se nahromadí v rovníkové rovině hvězdy, kde vytvoří útvar podobný rotujícímu disku s neutronovou hvězdou uprostřed. Materiál se bude postupně zahřívat, ztrácet moment hybnosti díky viskozitě a dopadat na povrch neutronové hvězdy.

Právě jsme si stručně popsali vznik akrečního disku.

*Let's now return to the moment when a star is about to explode. Our star spins, the same way like other stars, with a certain angular  $\omega$  speed. That means that it has got a non-zero angular momentum.*

*This is the moment when the star finally explodes. It leaves behind only a small neutron star in the centre with its radius around 10 kilometers big. The original star was a few kilometers big, so it is quite a big difference in comparison.*

*The angular momentum enabled the neutron star to spin with a frequency of several hundred revolutions per a second. It evolved into pulsar, the same one we can see in the crab nebula.*

*The freely scattered material from the explosion has still got its own angular momentum. Although the explosion decreased its value, it still did not reach a zero value. This material tends to spin around the center of a previous star. In its place is a neutron star instead.*

*A gyroscope will make it all pile up in an equatorial plane level of the star. It does shape it into an object similar to the rotating disk with a neutron star in the middle. The material continues to get warmer and starts to continuously lose its angular momentum due to a viscosity; in the end it falls down onto the surface of a neutron star.*

*This was a brief explanation of the accretion disk's origin.*

•

Výbuch supernovy ale po sobě může zanechat i jiné objekty – pokud je původní hvězda ještě hmotnější, bude tím pozůstatkem černá díra.

I v jejím okolí se může stejným způsobem vytvořit diskový útvar.

*The supernova's explosion sometimes leaves behind various objects if the original star is heavier, its remnant would actually be a black hole.*

*There are also cases when a disk shape can appear around a black hole's surroundings as well.*

•

Disky však nevznikají jen při explozích supernov. Vlastně je najdeme je ve vesmíru prakticky všude.

Například při vzniku nové hvězdy z mračna prachu a plynu. Veškerý materiál, který neskončil ve hvězdě samotné kolem ní vytvoří tzv. protoplanetární disk. Ten je sice zpočátku tvořen plyny a drobnými prachovými částicemi, ale ty se začnou srážet a tvořit větší a větší tělesa, až vytvoří planetární soustavu jako je například ta naše.

*Those disks do not arise during explosions only, we are actually able to spot them everywhere in the universe. For example during a moment when a new star arises, made of clouds and gases. The material which did not end up inside the star itself will construct around it a protoplanetary disk.*

*Although it firstly consists of gases and tiny bits of dusty pieces, over time it will start to collide and unite into bigger parts until it becomes a whole planetary system such as ours.*

•

Dalším příkladem diskového tvaru jsou různé galaxie. Hvězdy, gigantická mračna prachu a plynů tvoří disk který se otáčí kolem středu galaxie, kde ve většině případů najdeme supermasivní černou díru. Ty mají hmotnost několik milionů až desítek miliard hmotností Slunce.

Zatím přesně nevíme, jak přesně vznikly, ale je pravděpodobné, že procesem postupného splynutí mnoha menších černých děr a svou hmotnost jistě zvýšily také díky tomu, že pohlcovaly materiál z akrečního disku ve svém okolí.

*A different example of a disk shaped object are all kinds of different galaxies out there.*

*The orbiting stars around the centre of galaxies, massive clouds made of dust and gases, make the whole disk orbit around the centre of the galaxy; in almost all cases we are able to find a supermassive black hole there. Their weight could possibly range from a few millions to tens of billions times heavier than the Sun.*

*So far, we have not successfully managed to guess how it exactly arised from. One of our guesses is that they originated from a union of different smaller black holes. Their weight was probably increased by absorption of the material from the accretion disk in its surroundings.*

•

Nás ale budou zajímat především akreční disky – to jsou ty, ve kterých se materiál zahřívá na obrovské teploty a uprostřed dopadá na centrální objekt (černou díru, neutronovou hvězdu nebo jiný kompaktní objekt).

*Alright, time to start talking about what is of the most interest to us - accretion disks! We mean the ones whose material is increasing to massive temperatures. Moreover, it also falls in the centre onto the central objects (either black hole, neutron star or different type of compact object).*

•

Materiál v takovém disku postupně ztrácí moment hybnosti, aby, když se navždy ztratí v černé díře, neporušil zákon zachování. Při tom musí přebytečnou energii odevzdat – přeměnit na teplo a vyzářit v podobě elektromagnetického záření.

*This disk's material will continuously lose its angular momentum. This is in order to avoid the violation of the law of conservation when it gets lost forever in the black hole. The redundant energy must be given over during this process - it will change the temperature to warmth and be released in a form of electromagnetic radiation.*

Dá se dokonce spočítat efektivita přeměny klidové energie hmoty na teplo při akreci a vztah je to celkem jednoduchý  $\eta = GM/(c^2 r)$ , kde  $G$  je gravitační konstanta,  $M$  je hmotnost centrálního objektu a  $r$  je jeho poloměr.

U černých děr, které rotují, to může dosáhnout až 40 %! Pro srovnání, nukleární fúze v centrech hvězd mají účinnosti méně než 1% a štěpné jaderné reakce v jaderných elektrárnách jen setiny procenta.

Akrece materiálu na kompaktní objekt je tedy druhý nejúčinnější způsob přeměny hmoty na energii, hned po anihilaci, která má samozřejmě účinnost 100 %.

*We are also able to measure the effectiveness of invariant mass conversion to temperature during the accretion. The connection is quite simple actually:  $\eta = GM/c^2 r$   $G$  represents gravitational constant,  $M$  represents the weight of the central object and  $r$  represents its radius.*

*Orbiting black holes might reach up to even 40 %! To compare it: the nuclear fusion inside the stars has less than 1% effectiveness while nuclear reactions in the power stations only in hundreds of percent.*

*The material's accretion to compact objects is the second most effective transfiguration of mass to energy; right after the annihilation which does have 100 % efficiency.*

•

Bohužel, takový proces akrece neumíme na Zemi napodobit. Je k tomu potřeba extrémně malý a hmotný objekt, jak je vidět ze vzorce pro efektivitu. Ovšem je to škoda, protože taková "elektrárna" by dokázala fungovat na jakémkoliv "palivo", v těsné blízkosti černé díry už jsou tak extrémní teploty a tlaky, že se jakýkoliv materiál přemění jen na protony a elektrony.

Hezké řešení problému s odpady!

*Unfortunately we are not capable of imitating a similar process of accretion here on Earth. We would need some tiny and heavy object as can be seen in the formula for the effectiveness. It is quite unfortunate actually because this power station could work on any source of energy. The surroundings of the black hole are extremely hot and have a high pressure, so any material could be easily changed to protons and electrons.*

*Does that not sound like an ideal solution with human waste to you?*

•

Existuje velké množství matematických modelů akrečních disků, společně se podíváme jen na ty nejjednodušší a nejběžněji používané.

*There is a huge range of mathematician models with accretion disks. We will take a look at the most easiest and commonly used ones.*

•

V nejjednodušším modelu akrečního disku předpokládáme, že se hmota pohybuje po kruhových stabilních drahách podle Keplerových zákonů – tzv. keplerovský disk, a navzájem se neovlivňuje. Rychlost rotace je nepřímo úměrná odmocnině z poloměru  $r$

$v = \sqrt{GM/r}$ , kde  $G$  je gravitační konstanta a  $M$  je hmotnost centrálního objektu.

Snadno si můžeme spočítat, že ve vnitřních oblastech disků v okolí černé díry s hmotností 10 Slunci, což je typický zástupce černých děr hvězdné velikosti, materiál dosahuje rychlostí měřitelných ve zlomcích rychlosti světla.

Pokud chceme přesnější popis akrečního disku, nesmíme zanedbávat vzájemné interakce materiálu, který ho tvoří. Hmota v takovém prostředí může existovat jen jako extrémně horké plazma, teploty v akrečních discích dosahují hodnot miliard kelvinů.

*We assume in the easiest model of accretion disk that the mass is running along the round shaped stable trajectories based on Kepler's law – a so-called Kepler's disk; it does not have any mutual effect. The speed of the rotation is inversely proportional to the nth root's radius  $r$   $v = \sqrt[n]{GM/r}$ , where  $G$  is gravitational constant and  $M$  is the weight of the central object.*

*We can easily measure in the middle parts of the disk which is in close proximity to black holes 10 times the weight of the Sun that the material reaches the speed measurable in fractions of a speed light.*

*If we wish to have more detailed data of the accretion disk we should not forget the active interaction of the material it is made of. This mass could exist in a similar environment under the condition of being an extremely scorching plasma. The temperature in accretion disks reach up to the billions of calvins.*

•

Nejběžnější model popisuje tzv. tenké disky a v roce 1973 ho poprvé popsali dvaruští vědci Nikolaj Šakura a Rašid Sjunjajev a proto mu říkáme Šakurův-Sjunjajevův model.

Nejběžnější model popisuje tzv. tenké disky a v roce 1973 ho poprvé popsali dvaruští vědci Nikolaj Šakura a Rašid Sjunjajev a proto mu říkáme Šakurův-Sjunjajevův model.

V tomto modelu se veškeré interakce hmoty popisují jako viskozita a do rovnic vstupují jako jediný parametr alfa. Hmotu disku je popsána jako viskózní kapalina, která rotuje se skoro keplerovskou rychlostí a velmi malou radiální rychlostí směrem do centra. Moment hybnosti materiálu je v tomto modelu přenášán směrem ven, z vnitřní části tedy může materiál padat do černé díry uprostřed, jelikož už žádný moment hybnosti nemá a neporušujeme zákon zachování.

Šakurův-Sjunjajevův disk je velmi tenký, téměř jako žiletka, což můžeme dokonce u některých objektů pozorovat jako „stín v ekvatoriální rovině“, je velmi hustý, opticky neprůhledný a teplo vznikající interakcí látky velmi účinně přeměňuje v záření – září jako absolutně černé těleso.

*One of the most common models are co-called slims disks. It was introduced by two russian scientists called Nikolaj Shakura and Rashig Sjunajev and thus we named the disk as Shakura's-Sunyaev's model.*

*The movement of the mass is called the viscosity, it comes into the equation as a sole parameter alfa. This mass is described as the viscosity liquid, it rotates almost at Kepler's speed while its rotation to the center is really small. The angular momentum of the mass is transmitted to the outside, its inside part could easily fall into the black hole. The reason why is that it does not have its angular momentum anymore and thus we do not violate the law of conservation.*

*Shakura's-Sunyaev's disk is quite thin. We may observe around some objects "the shadow of the Equatorial plane" which is very thick and optically transparent. The warm temperature as a result of the interactive mass is changing to the radiation – it shines like the absolute black object.*

•

Co se však skrývá za onou viskozitou, to Šakura a Sjunjajev ve svém modelu nepopsali a až do 90. let minulého století to nebylo jasné. Žádné procesy “neseděly” do rovnic, nevytvářely dostatečné tření, aby model fungoval.

V roce 1991 však astrofyzikové Balbus a Hawley představili svůj model MRI – magneto-rotační instability. Ten předpokládá, že se v disku vytváří silné magnetické pole a díky rozdílné rychlosti rotace materiálu na blízkých poloměrech je materiál na vnitřní orbitě brzděn tím, že jej magneticky přitahuje materiál na vnější orbitě. To vytváří chaotický turbulentní pohyb, který je dnes obecně považován za hnací motor akrečních disků a hlavní způsob přenosu momentu hybnosti.

*Until the early 1990 we did not have any idea what was being hidden beyond the viscosity since both Shakura and Sunyaev did not provide us with any details. No processes fit into our equations, all of them did not provide enough friction in order for the model to properly work.*

*It was 1991 when two astrophysicists Mr. Balbus and Hawley introduced their brand new model MRI – magnetorotational instability. It is based on the assumption that inside a disk is a new strong magnetic field. Due to the different rotations of material on nearby radiuses, the material in the inside orbit holds back because it is magnetically attracted by the material at the external orbit. This causes a chaotic turbulent movement, nowadays known as the engine of the accretion disks and the main way of transmitting the angular momentum.*

•

Tenké disky mohou fungovat jen v případě, že je v systému poměrně malé množství materiálu. Jestliže se ale na černou díru uprostřed tlačí obrovské množství hmoty, popisuje situaci mnohem lépe model tlustých torů (tzv. polských koblih). Materiál v tlustých discích je zahřátý na obrovské teploty, má malou viskozitu a díky tomu, že záření z něj může unikát jen v omezeném prostoru v okolí osy rotace, jeví se tyto systémy vzdálenému pozorovateli jako velmi jasné objekty.

*The thin discs could work only under a condition that there is a little amount of material inside. Should there be a case when a massive amount of mass pushes to the centre of the black hole, we follow a more feasible model called a fat torus, commonly known under so-called Polish doughnuts. The temperature of the material in the thick disk is quite scorching and its viscosity is small. Based on these characteristics can the radiation break away in limited space in a rotational axis only. Any distant viewer can see these systems as very bright objects.*

•

Předpokládá se, že tlusté disky se nacházejí v aktivních galaktických jádrech – kvasarech. Jedná se o supermasivní černé díry, které přitahují tak obrovské množství materiálů, že jeho velkou část vyvrhují zpět do prostoru mohutnými jety – výtrysky z polárních oblastí.

Materiál v nich je magnetickým polem disku a rotací centrální černé díry urychlován na rychlosti blízké rychlosti světla. Kvasary jsou objekty snad s největším zářivým výkonem vůbec, díky nim tak vidíme galaxie, které jsou od nás vzdálené miliardy světelných let.

Nejznámějším zástupcem je M87\*, supermasivní černá díra v centru galaxie M87, jejíž stín je na prvním obrázku černé díry pořízeném systémem Event Horizon Telescope.

Tato galaxie, respektive její jádro, bylo v centru zájmu mnoha různých teleskopů a družic už dlouho, a tak máme celou řadu působivých snímků se zřetelně viditelným výtryskem a dalšími detaily.

*It is generally assumed that fat disks can be found in the active and massive cores - quasars. These are supermassive black holes which attract so much material that it has to throw away a huge part back into space with its huge bursts (bursts from polar regions).*

*The material inside is a magnetic field of a disk and due to a rotation of the central black hole it is speeded up to the almost same speed as light. Quasars amount one of the biggest*

*radiant power among all objects which is also why we are enabled to see distant galaxies billions of light years away.*

*The most well known representative is M87; a massive black hole right in the centre of the M87 galaxy whose shadow is reflected on the first black hole picture taken by the Event Horizon Telescope system.*

*This galaxy's core was of the most interest for all kinds of telescopes and satellites, so nowadays we have an impressive collection of bright and visible bursts with all other details.*

•

Existuje celá řada dalších modelů, například „šílené“ disky (MAD), které jsou díky silnému magnetickému poli uzavřeny do jeho siločar, ADAF disky, které jsou tlusté, průhledné, tvořené extrémně horkým ionizovaným plynem. Předpokládá se, že takový disk můžeme pozorovat například v okolí černé díry v centru naší Galaxie označované jako Sagittarius A\*.

*There are all kinds of different models out there; one of them are mad disks which are locked inside their lines of forces because of their strong magnetic field. Another ones are ADAF disks which are described as: transparent and formed by extremely hot ionized gas. We assume that this disk can be seen in the surroundings of black hole's center in our Galaxy called as Sagittarius A\*.*

•

Ve skutečnosti jsou systémy s akrečními disky jen stěží popsitelné jednoduchými matematickými modely, avšak při porovnání s pozorováním se zdá, že některé popisují některé systémy velmi dobře – a jiné zase ne.

Víme, že reálné akreční disky jsou kombinací několika typů modelů, případně jsou ovlivněny silami, které v modelech často nezahrnujeme.

V současné době se velmi rychle rozvíjejí počítačové metody, které nám umožňují simulovat chování hmoty v extrémním okolí černých děr a postihnout tak mnohem více fyzikálních jevů, než umožňují matematické modely.

*In reality, these systems with accretion disks are not very easily described with any mathematician model. However, when comparing them with different observations we can conclude that some describe the systems quite well while others do not.*

*We are aware that real accretion disks are composed out of the combination of more models. Sometimes it can be affected by forces we do not often use in our models.*



*Nowadays, there are several computer methods which allow us to simulate the behaviour of mass in the extreme surroundings of other black holes. This helps us to deepen our knowledge of physical phenomena rather than using mathematical models.*

•

Akreční disky jsou hnacím motorem těch nejjasnějších objektů, které můžeme ve vesmíru najít.

A přesto ani dnes ještě zcela nerozumíme tomu, jak přesně fungují a co je pohání. Je to extrémní prostředí, kde se hmota zahřívá na miliardy stupňů Celsia, rotuje rychlostí blízkou rychlosti světla a před tím, než nenávratně zmizí v nitru černé díry může odevzdat až 70 % své celkové energie a přeměnit ho na teplo a záření.

Studium akrečních disků nám přináší nové poznatky, jak se hmota v těchto extrémních situacích chová – je to prostředí, které nemůžeme v žádné laboratoři na Zemi uměle vytvořit.

*The accretion disks are the power engine to all the bright objects we can find all over the space.*

*Despite that we are nowadays still unable to understand how all of it actually works and what drives it all. It is an extreme environment where the mass heats up to billions of degrees Celsius. It also rotates in an almost similar speed as light and before it disappears in the core of black hole it oftenly gives over 70 % of its whole energy and transforms it to heat and radiation.*

*The study of accretion disks is giving us insight into how the mass behaves in extreme situations – it is the environment we cannot artificially recreate anywhere on our Earth.*

## 2 PEDAGOGICKO DIDAKTICKÉ POZNÁMKY



### PRŮVODCE STUDIEM

**Obory: 053 Vědy o neživé přírodě, 0532 Vědy o Zemi, 0533 Fyzika** (klasifikace podle CZ-ISCED-F 2013).

Studentům bude ve sférické projekci puštěno video s výkladem. Jedná se o interaktivní doplněk běžné výuky. Pedagog po shlédnutí odkáže na doplňující literaturu a zodpoví na dotazy.

---



### ÚKOL K ZAMYŠLENÍ

Jakým způsobem se přenáší moment hybnosti na vnější okraj disku a co se s ním pak stane?

---



### SAMOSTATNÝ ÚKOL

Vyzkoušejte si gyroskopický efekt třeba na jízdním kole – roztočte pořádně ve vzduchu přední kolo a pokuste se ho naklonit. Jde to hůře, než kdyby se kolo netočilo?

---

## POUŽITÁ LITERATURA

- *The science of Interstellar*, Thorne, K. S., & Nolan, C. (2014).
  - *Gravitation*, Misner Ch. W., Thorne, K. S., Wheeler, J. A., (2017)
  - *Accretion Power in Astrophysics*, Frank, J., King, A., Raine D., (2002)
  - *ESO* [online]. Dostupné z: <https://www.eso.org/public/>
  - *NASA* [online]. Dostupné z: <https://www.nasa.gov/>
  - *Wikipedia* [online]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/>
  - *Pixabay* [online]. Dostupné z: <https://pixabay.com/cs/>
  - *Youtube* [online]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/>
  - *Artlist* [online]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/>
  - *EVANS & SUTHERLAND, Digistar 6 [software]. 2016 [cit. 2020-02-12]. Dostupné z: <https://www.es.com>. Požadavky na systém: Win 10 Server, Fulldome projekce.*
-

## PŘEHLED DOSTUPNÝCH IKON



Čas potřebný ke studiu



Klíčová slova



Průvodce studiem



Rychlý náhled



Tutoriály



K zapamatování



Řešená úloha



Kontrolní otázka



Odpovědi



Samostatný úkol



Pro zájemce



Cíle kapitoly



Nezapomeňte na odpočinek



Průvodce textem



Shrnutí



Definice



Případová studie



Věta



Korespondenční úkol



Otázky



Další zdroje



Úkol k zamyšlení

Název: **Akreční struktury v blízkosti černých děr a neutronových hvězd**

Autor: **Debora Lančová a kolektiv**

Vydavatel: Slezská univerzita v Opavě

Určeno: studentům Slezské univerzity v Opavě

Počet stran: 21

Tato publikace neprošla jazykovou úpravou.