

Může existovat život v okolí černých děr?

RNDr. Pavel Bakala, Ph.D.

Hvězdáreň a planetárium M.R.Štefánika v Hlohovci
Silesian University in Opava, Czech Republic
Supported by ISSI Bern+Beijing, INAF OAR



Motivace: sci-fi film Interstellar

Planeta Millerové

Exoplaneta orbitující černou díru

Exoplaneta rozměrů Země

Faktor časové dilatace = $3 \text{ h} / 21 \text{ r} \approx 275\,000$

$R_{\text{orb}} = 1.0000378M$

Gargantua

Téměř extrémní

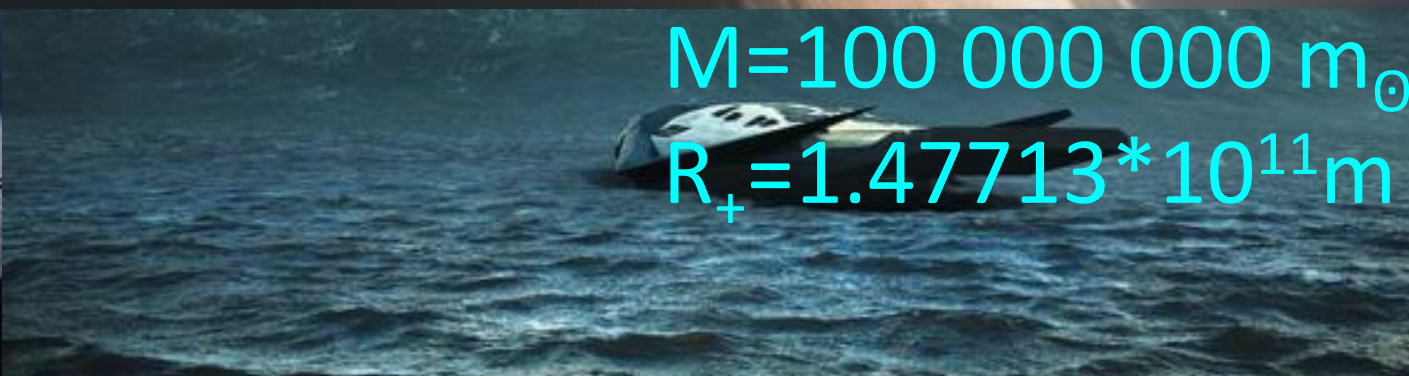
supermasivní

Kerova černá díra

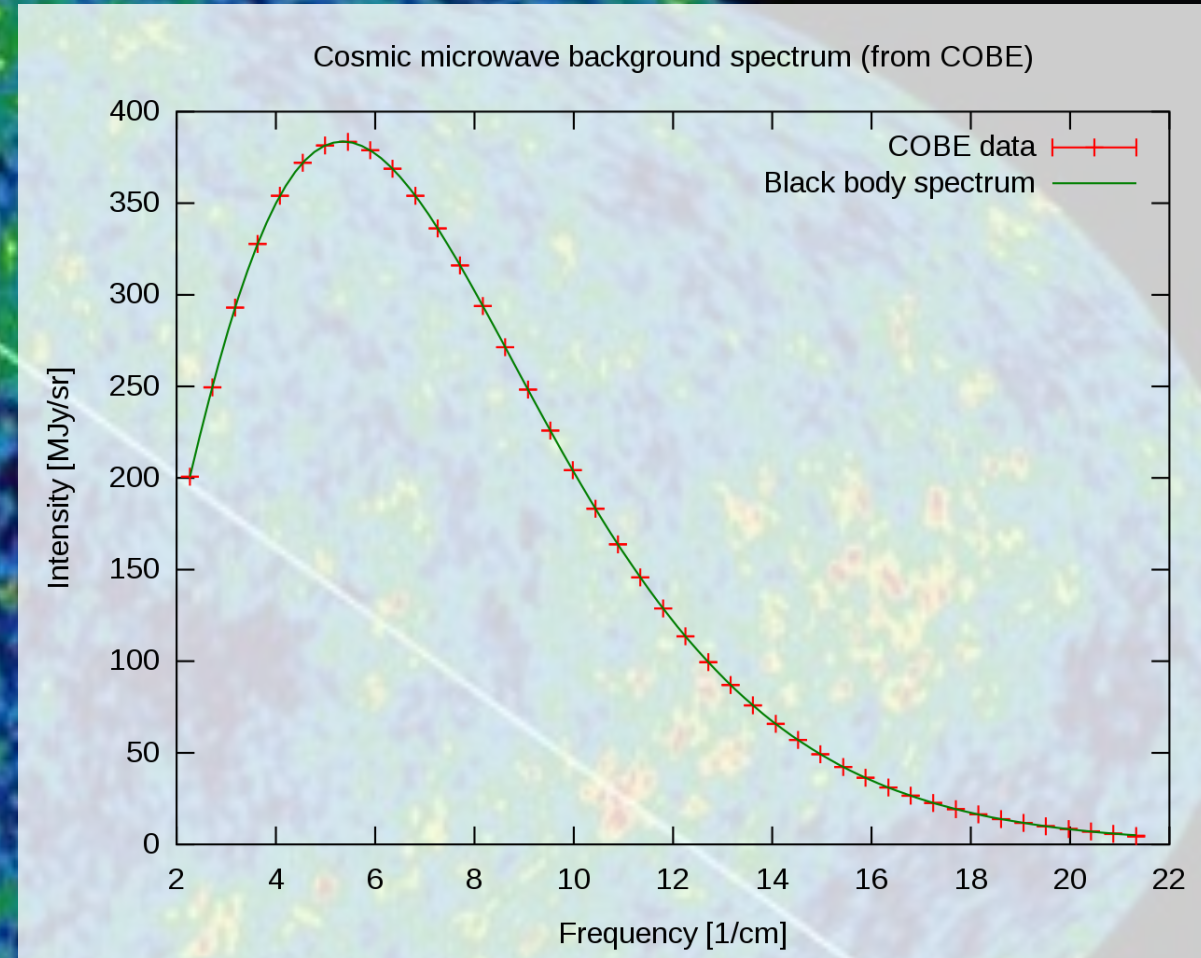
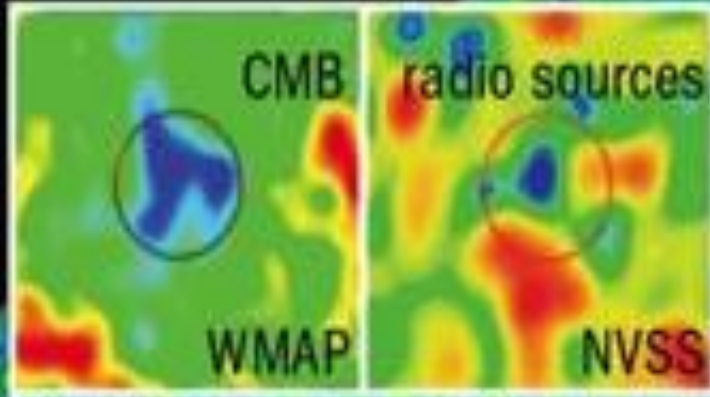
Spin $a = 1 - 10^{-14}$

$M = 100\,000\,000\,m_{\odot}$

$R_{+} = 1.47713 \cdot 10^{11} \text{ m}$



Cosmic microwave background (CMB) – popel velkého třesku

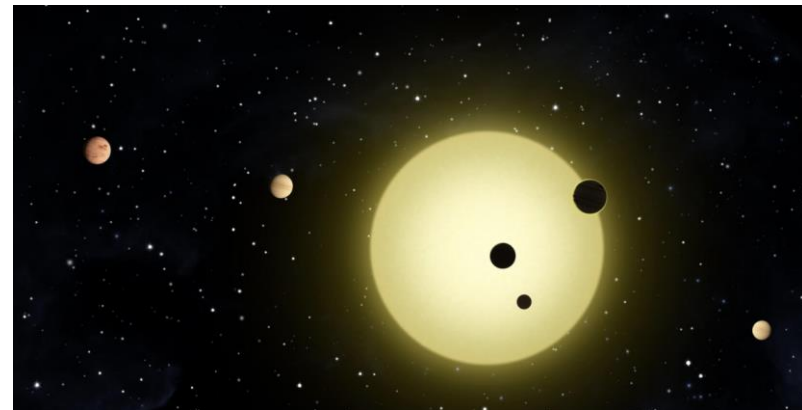


2.72548 ± 0.00057 K

Termodynamika podporující život

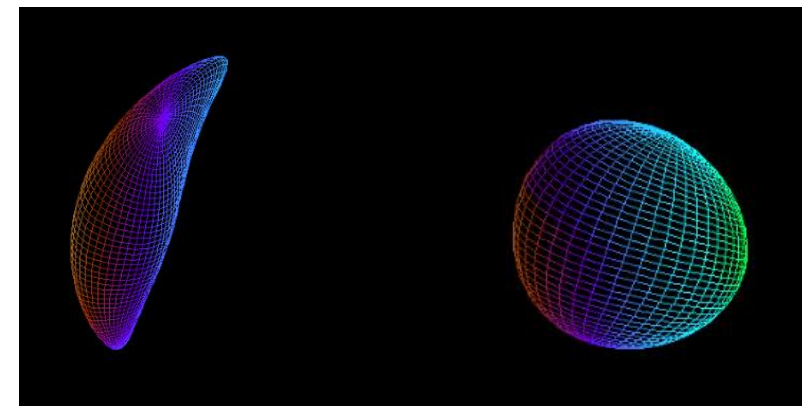
Exoplaneta u standardní hvězdy

- Standardní hvězda: zdroj příchozího toku energie s nízkou entropií
- Chladná noční obloha: chladič zvyšující entropii okolního vesmíru odpadním teplem živých organismů



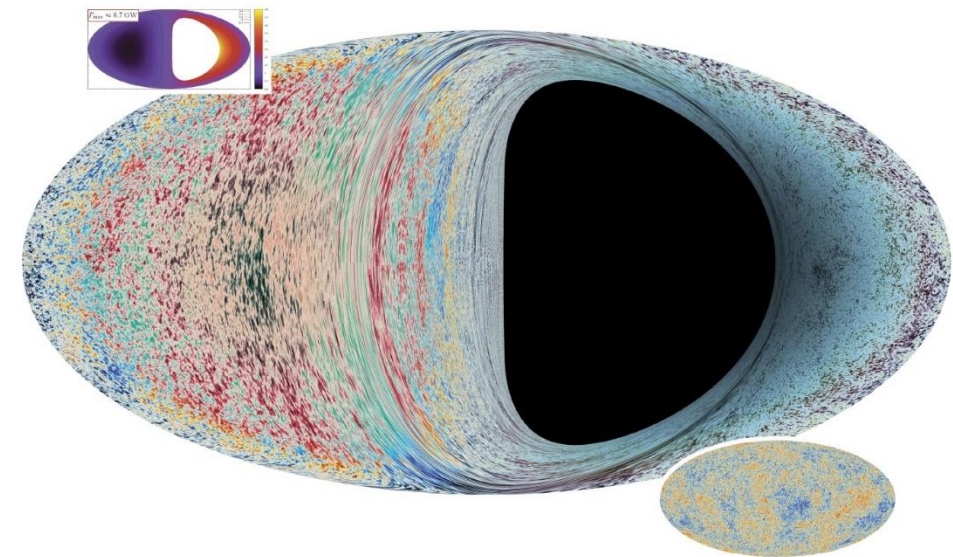
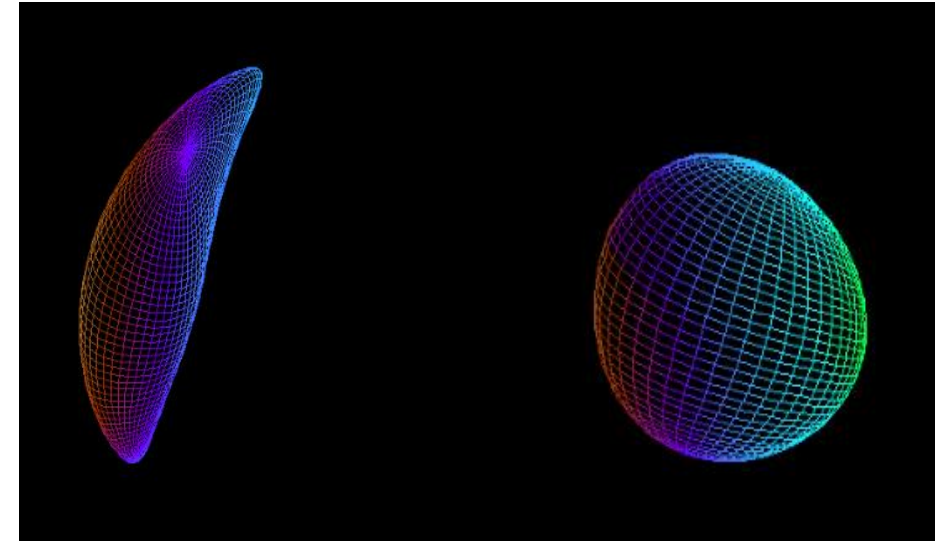
Černoděrová exoplaneta

- CMB zesilované extrémním gravitačním lensingem: zdroj příchozího toku energie s nízkou entropií
- Stín černé díry a chladná část oblohy: chladič zvyšující entropii okolního vesmíru odpadním teplem živých organismů



Černoděrová exoplaneta

- Extrémní gravitační pole extrémně rychle rotující Kerrovy černé díry v blízkosti ISCO (a tím i horizontu událostí)
- Frame-draging effect strhující záření ve směru rotace černé díry
- Extrémní (subsvětelná) orbitální rychlost exoplanety – dopplerovské efekty (STR)
- Stín černé díry a chladná část oblohy: chladič zvyšující entropii okolního vesmíru odpadním teplem živých organismů



Ohřev černoděrové exoplanety gravitačně zesíleným CMB

Kerr metric – rotating Kerr black hole

$$ds^2 = - \left(1 - \frac{2r}{\Sigma}\right) dt^2 - \frac{4ra}{\Sigma} \sin^2 \theta dt d\phi + \frac{\Sigma}{\Delta} dr^2 + \\ + \Sigma d\theta^2 + \left(r^2 + a^2 + \frac{2ra^2 \sin^2 \theta}{\Sigma}\right) \sin^2 \theta d\phi^2$$

$$\Sigma \equiv r^2 + a^2 \cos^2 \theta \text{ a } \Delta \equiv r^2 - 2r + a^2. \quad G = c = M = 1.$$

Outer event. horizont

$$R_+ = 1 + \sqrt{1 - a^2}$$

Innermost stable circular orbit

$$R_{\text{ISCO}\pm} = (3 + Z_2 \mp \sqrt{(3 - Z_1)(3 + Z_1 + 2Z_2)}),$$

$$Z_1 = 1 + (1 - a^2)^{1/3}((1 + a)^{1/3} + (1 - a)^{1/3}) \text{ a } Z_2 = (3a^2 + Z_1^2)^{1/2}$$

Exoplanet as black body

Incoming energy

$$W = \pi R^2 \Phi$$

$$\text{On Earth} \approx 1.603 \times 10^{17} \text{ W}$$

Radiating power

$$W = \sigma 4\pi R^2 T^4$$

Estimated temperature

$$T = \sqrt[4]{\frac{\Phi}{4\sigma}} \quad \leftarrow \text{Solar constant}$$

Transformace black-body spektrálního profilu CMB na Multi-black body spektrum

Frekvenční posun	Transformace black-body spektra	Transformovaná teplota CMB
$I_{obs} = I_0 g^3$ $\nu_{obs} = g \nu_0$	$I_{obs, \nu_{obs}} = \frac{2 h \nu_{obs}^3}{c^2} \frac{1}{e^{\frac{h \nu_{obs}}{k T_{obs}}} - 1}$	$T_{obs} = g T_{cmb}$

Výsledný tok (kvazi-sluneční konstanta) a spektrální profil CMB z celé lokální oblohy exoplanety

Faktor frekvenčního posunu
jako funkce úhlových
souřadnic na lokální obloze
exoplanety

$$g(\chi, \psi)$$

$$d\Phi = \sigma \frac{d\Omega}{\pi} T^4$$

$$\Phi = \frac{T_{cmb}^4 \sigma}{\pi} \int_0^{4\pi} g^4(\chi, \psi) d\Omega$$

Frekvenční posun CMB na exoplanetární lokální obloze

Zdroj CMB

Transformace časové složky lokálně normalizované čtyř-hybnosti fotonu CMB

$$g = \frac{p_{\langle t \rangle}}{p_t} = \frac{1}{\omega^{\langle \mu \rangle}_t p_{\langle \mu \rangle}}$$

Lokální komponenty čtyř-hybnosti fotonu CMB

$$\begin{aligned} p_{\langle t \rangle} &= -1, & p_{\langle \phi \rangle} &= -\sin \chi \cos \psi, \\ p_{\langle \theta \rangle} &= -\cos \chi, & p_{\langle r \rangle} &= -\sin \chi \sin \psi. \end{aligned}$$

Keplerien frame one-form tetrad
Lorentz boots of ZAMO tetrad

$$\omega^{\langle \mu \rangle}_\nu = \Lambda^{\langle \mu \rangle}_{(\alpha)} \omega^{(\alpha)}_\nu$$

$$\omega^{\langle t \rangle} = \gamma \left\{ \omega_t^{(t)} - \beta \omega_t^{(\phi)}, 0, 0, -\beta \omega_\phi^{(\phi)} \right\},$$

$$\omega^{\langle r \rangle} = \omega^{(r)}, \quad \omega^{\langle \theta \rangle} = \omega^{(\theta)},$$

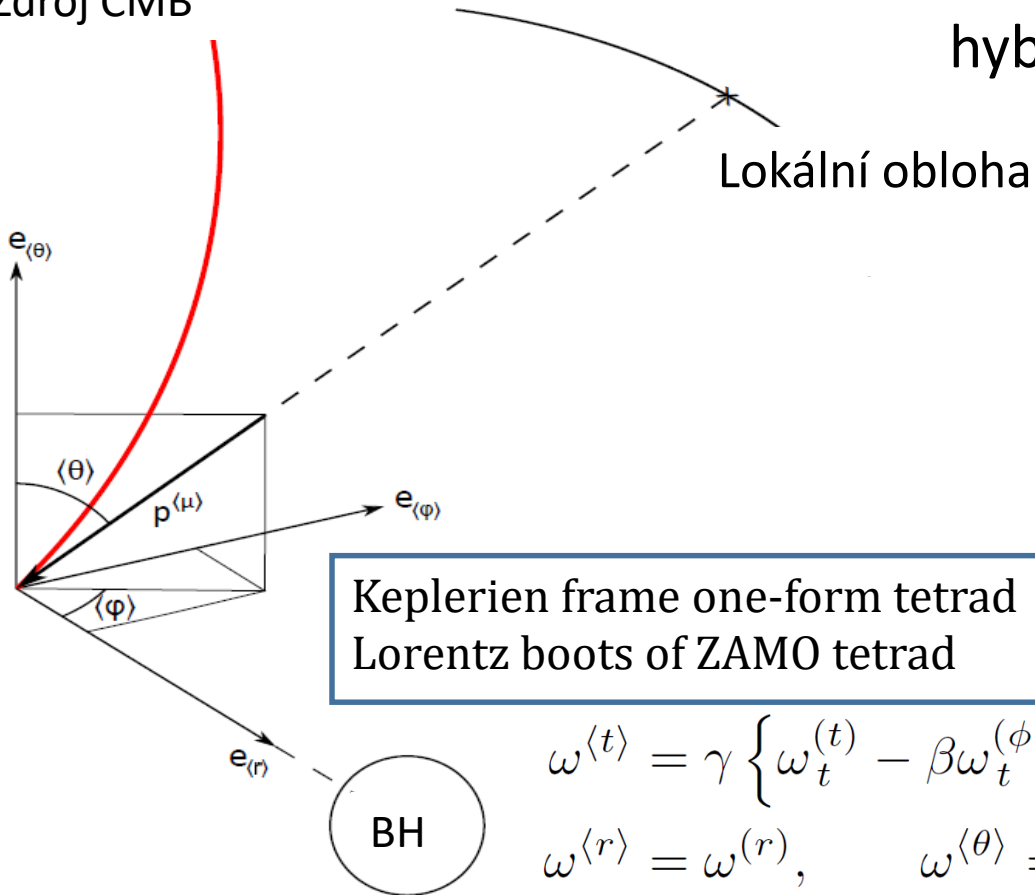
$$\omega^{\langle \phi \rangle} = \gamma \left\{ \omega_t^{(\phi)} - \beta \omega_t^{(t)}, 0, 0, \omega_\phi^{(\phi)} \right\},$$

$$\gamma \equiv (1 - \beta^2)^{-1/2} \quad \beta = \frac{r^2 + a^2 - 2a\sqrt{r}}{\sqrt{\Delta}(r^{3/2} + a)}$$

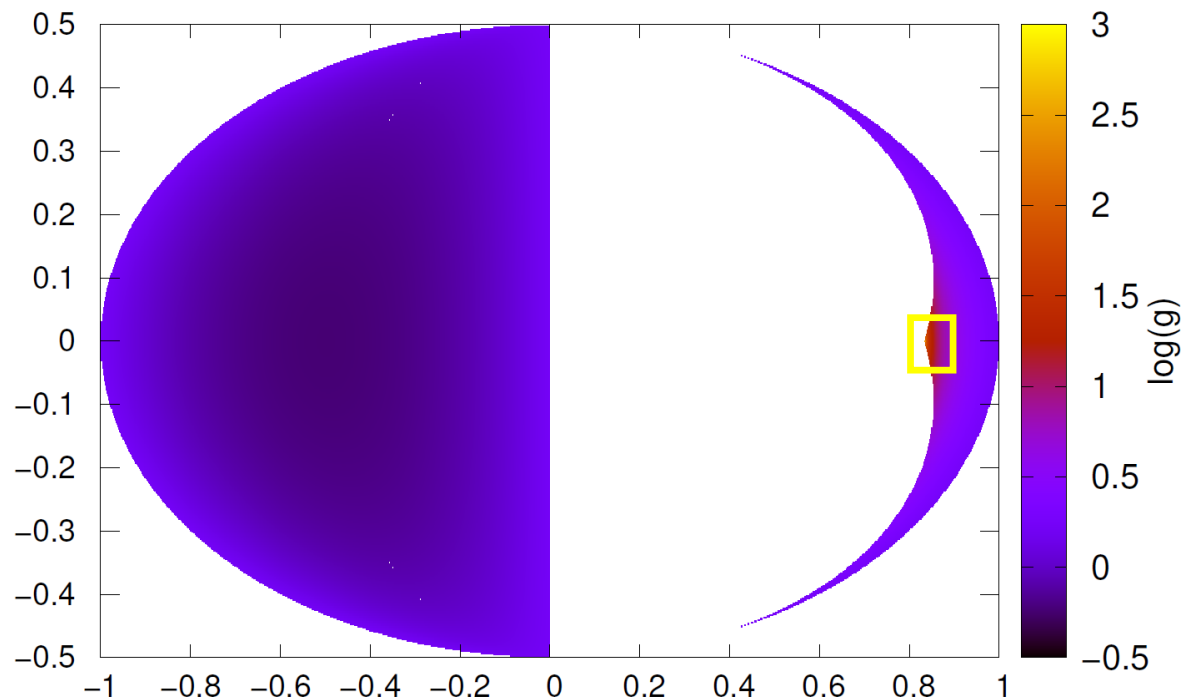
Výsledný vzorec pro g-faktor

$$g(\chi, \psi) = \frac{\sqrt{1 - \beta^2}}{X - Y \sin \chi \cos \psi}$$

$$X = \omega_t^{(t)} - \beta \omega_t^{(\phi)} \quad Y = \omega_t^{(\phi)} - \beta \omega_t^{(t)}$$

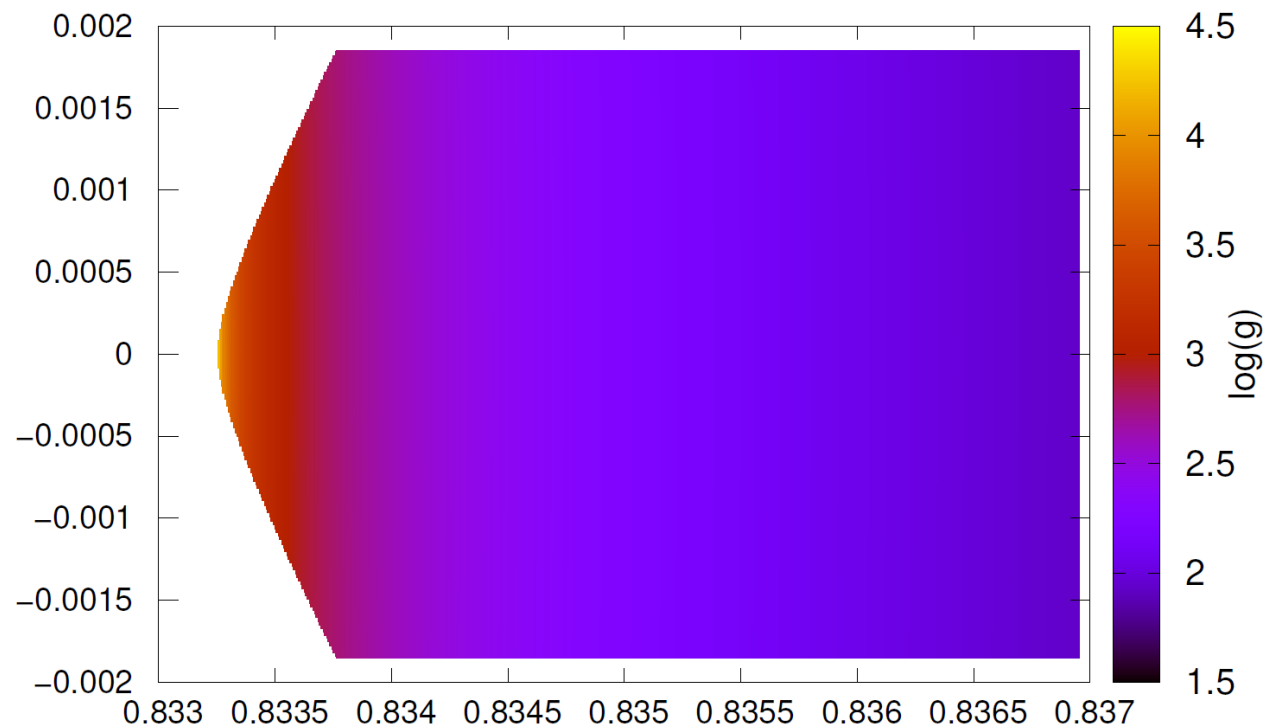


Numerické metody

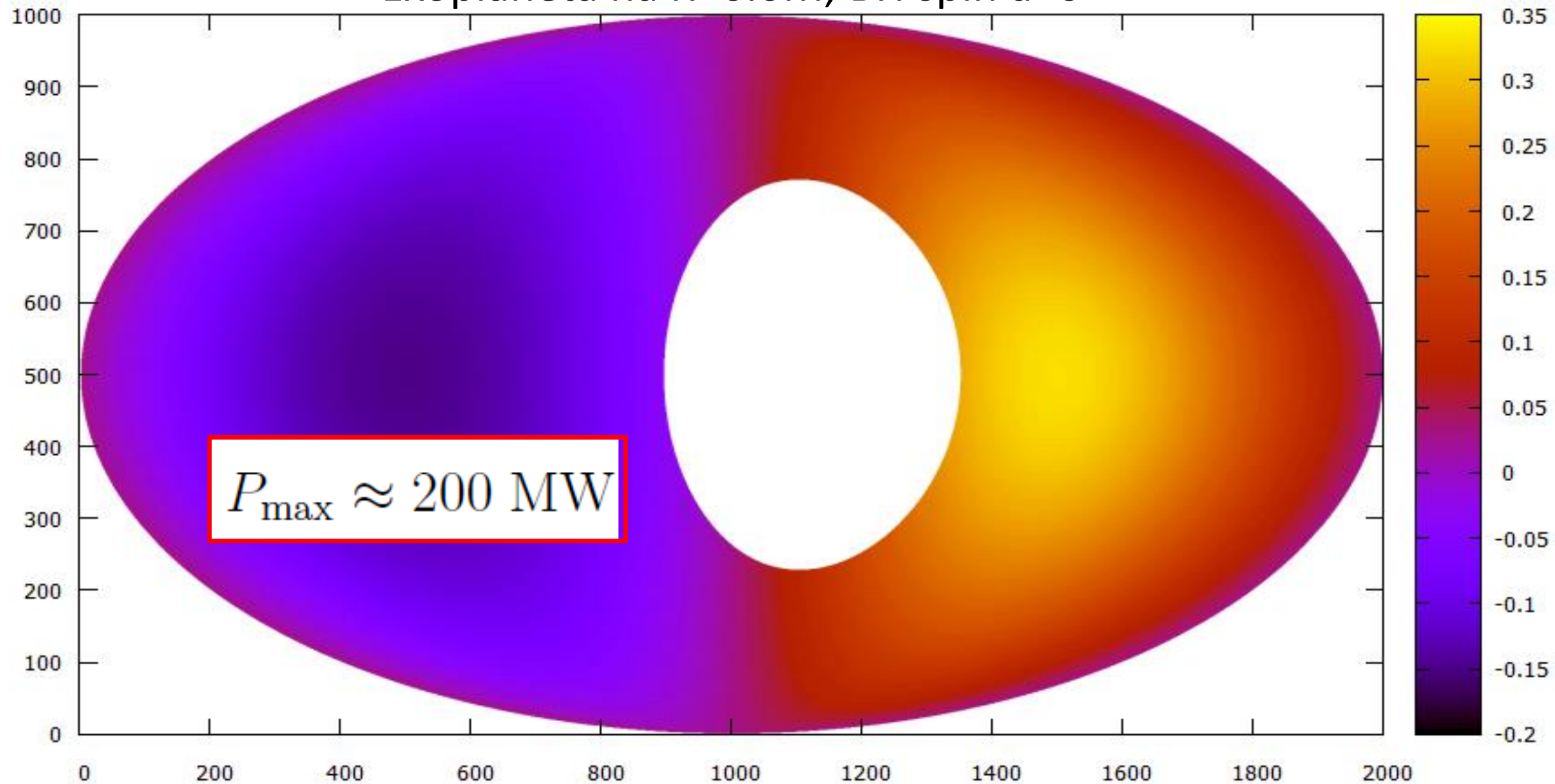


Více než 99% energetického toku CMB pochází z velmi horké oblasti na zoomované pravé mapě:

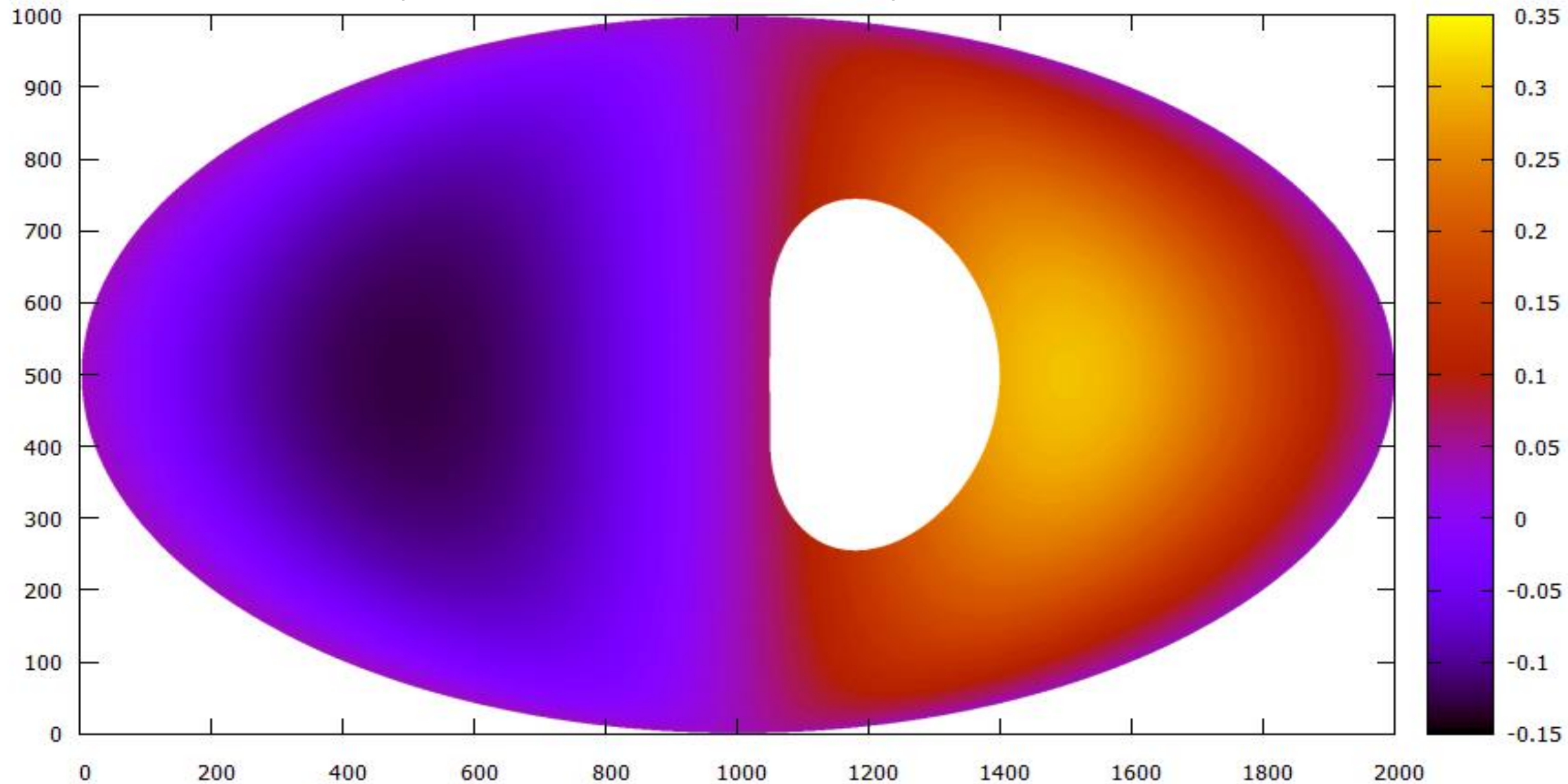
$$\Phi = \frac{8 \sigma T_{cmb}^4}{\pi n^2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{2n} g_{ij}^4(\chi_{ij}, \psi_{ij})$$



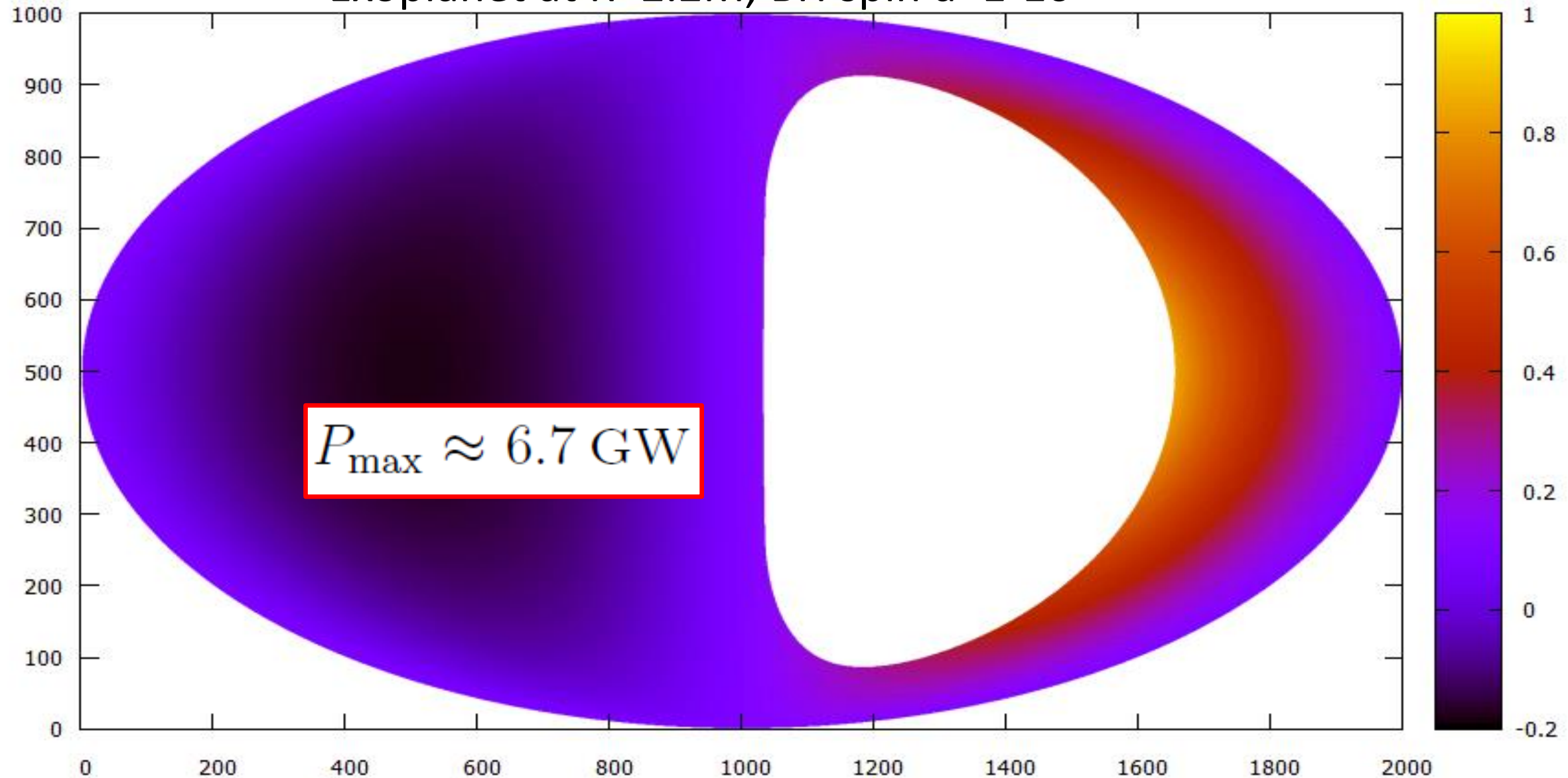
Mapa frekvenčního posunu ($\log_{10} g$) na lokální exoplanetární obloze
Exoplaneta na $R=6.0M$, BH spin $a=0$



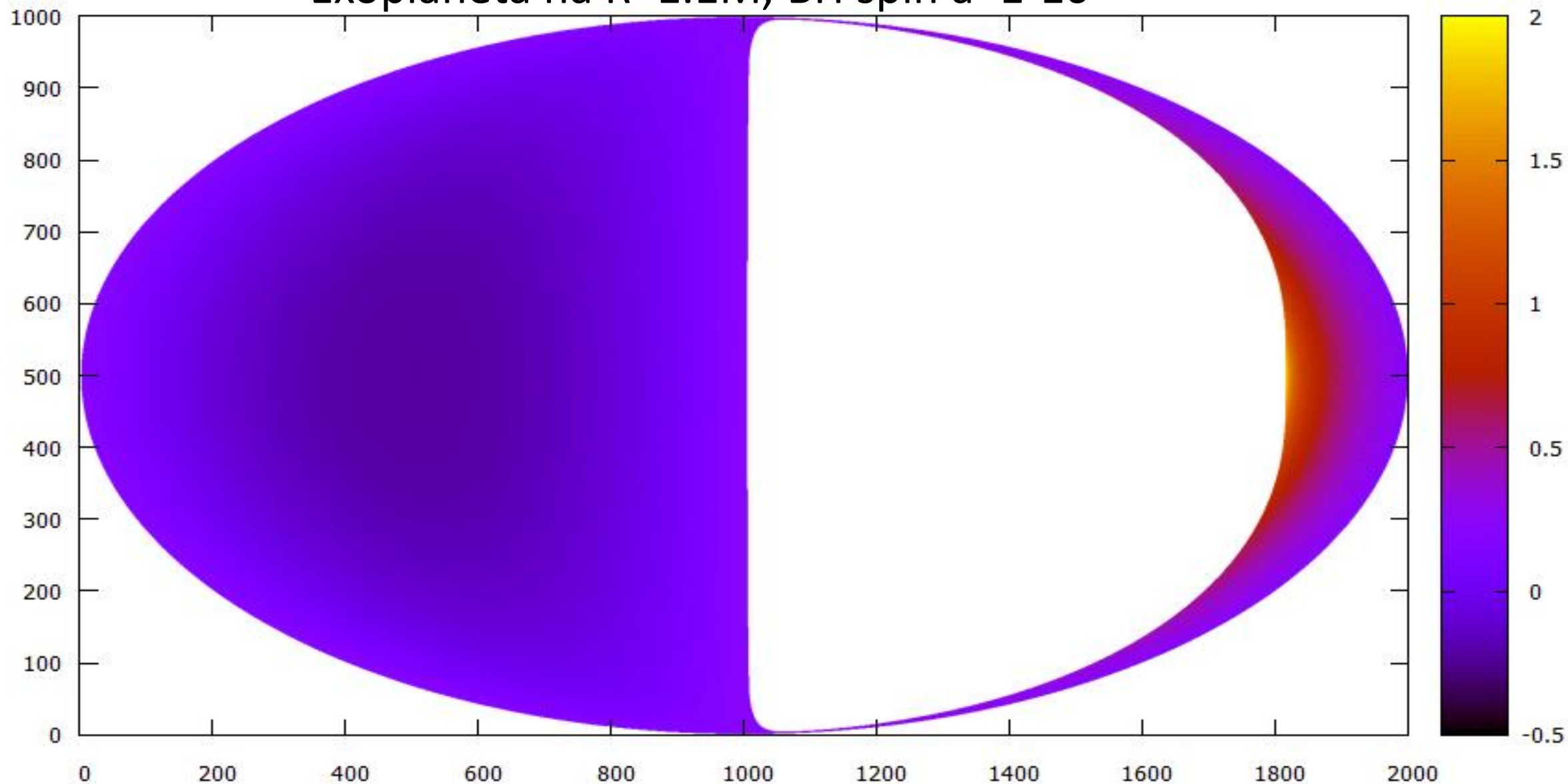
Mapa frekvenčního posunu ($\log_{10} g$) na lokální exoplanetární obloze
Exoplaneta na $R=6.0M$, BH spin $a=1-10^{-14}$



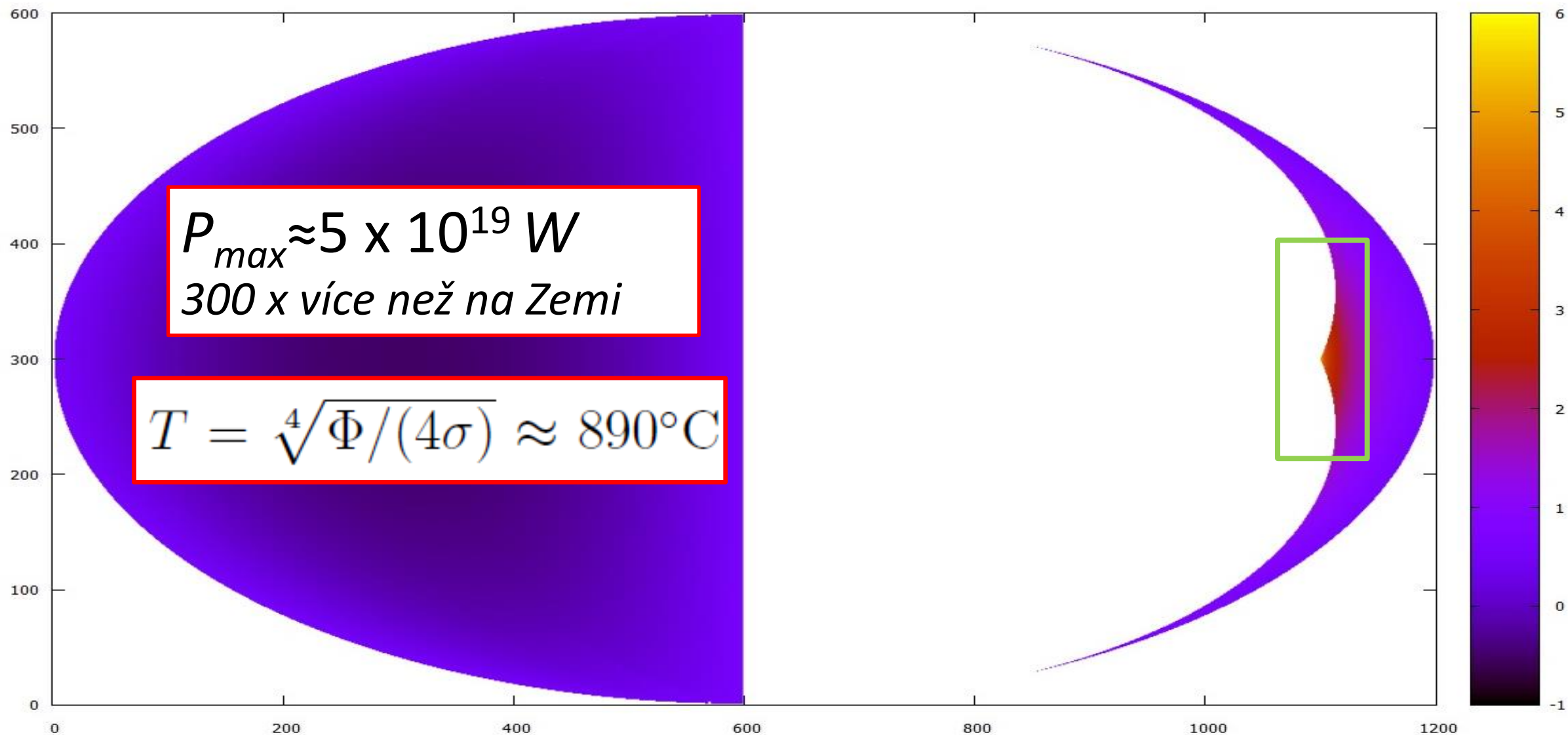
Mapa frekvenčního posunu ($\log_{10} g$) na lokální exoplanetární obloze
Exoplanet at $R=2.2M$, BH spin $a=1-10^{-14}$



Mapa frekvenčního posunu ($\log_{10} g$) na lokální exoplanetární obloze
Exoplaneta na $R=1.1M$, BH spin $a=1-10^{-14}$



Mapa frekvenčního posunu ($\log_{10} g$) na lokální exoplanetární obloze Exoplaneta na $R=1.0000378M$, BH spin $a=1-10^{-14}$ (planeta Millerové)



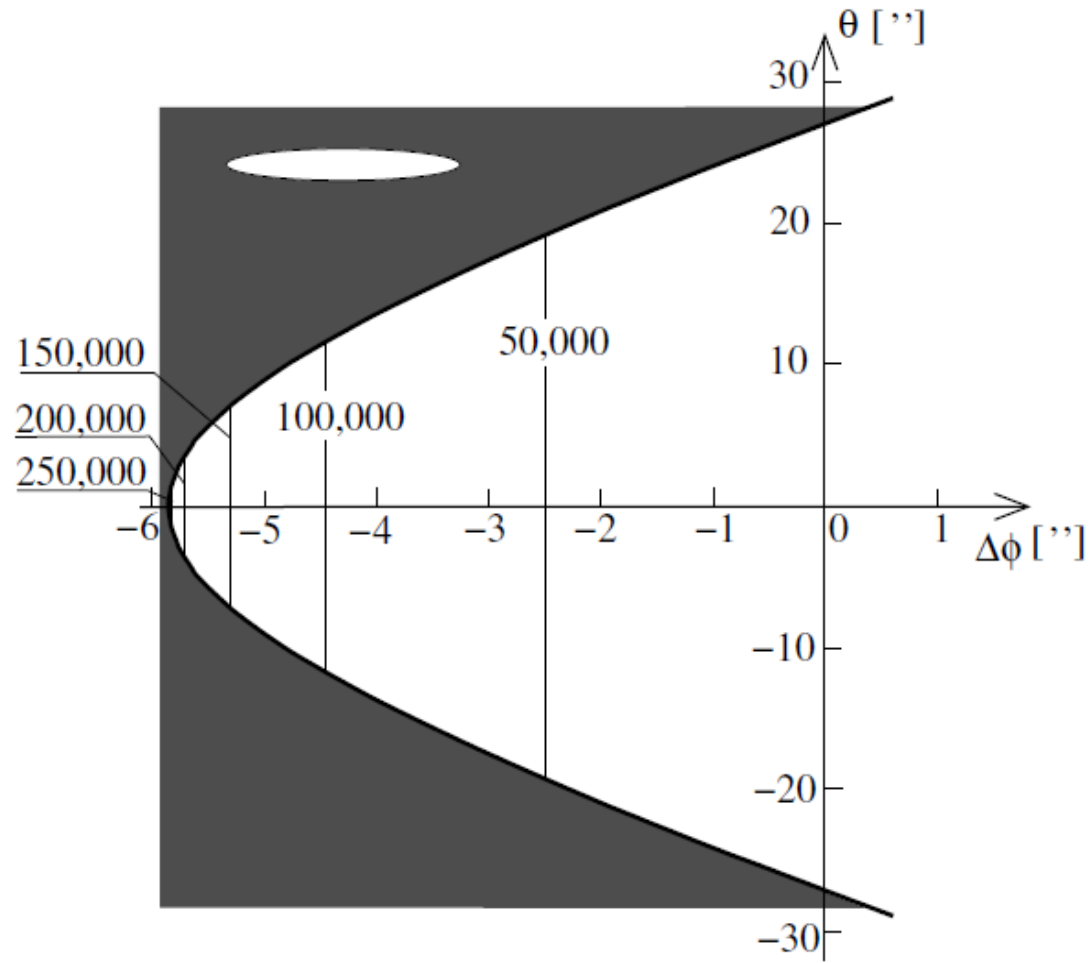
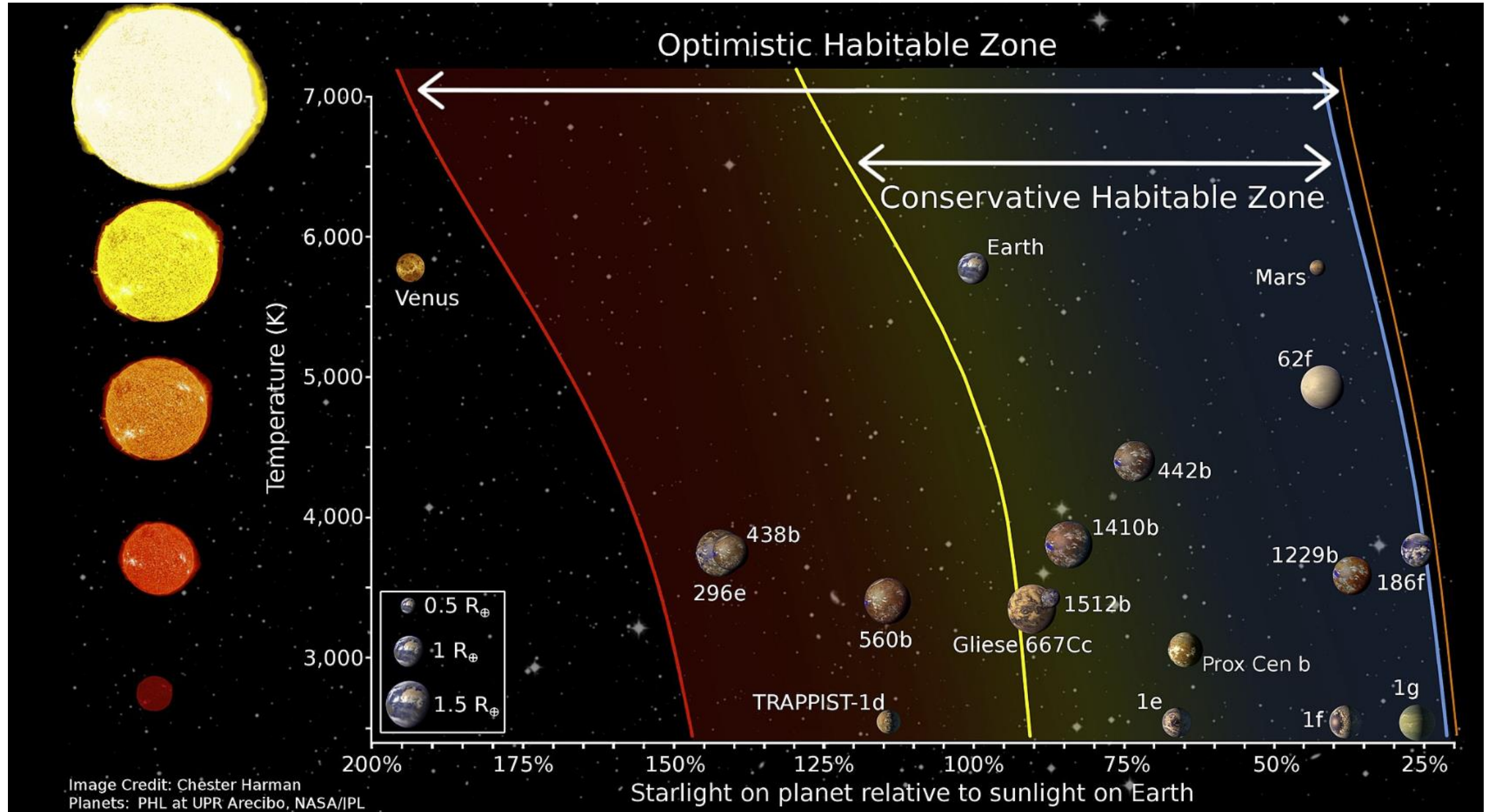


FIG. 4. Detail of the shadow boundary of a black hole for the case of Fig. 3(c) near $\theta = 0$ and $\phi = 150^\circ$, where $\Delta\phi \equiv \phi - 150^\circ$. The contour lines of constant temperature are shown, the number indicating relative temperature shift with respect to the temperature of background radiation measured by a distant observer. The light spot on the upper left shows the angular size of Neptune as seen from the Earth, for comparison (the shape is deformed due to different scales of θ and $\Delta\phi$).

Obyvatelná zóna kolem černých děr?



Obyvatelná zóna kolem černých děr?

Velmi hrubá aproximace (možnost existence kapalné vody)

**Studený okraj: solární konstanta (hustota toku energie)
jako na oběžné dráze Marsu, 589 W/m^2**

**Horký okraj: sluneční konstanta (hustota toku energie)
jako na oběžné dráze Venuše, 2611 W/m^2**

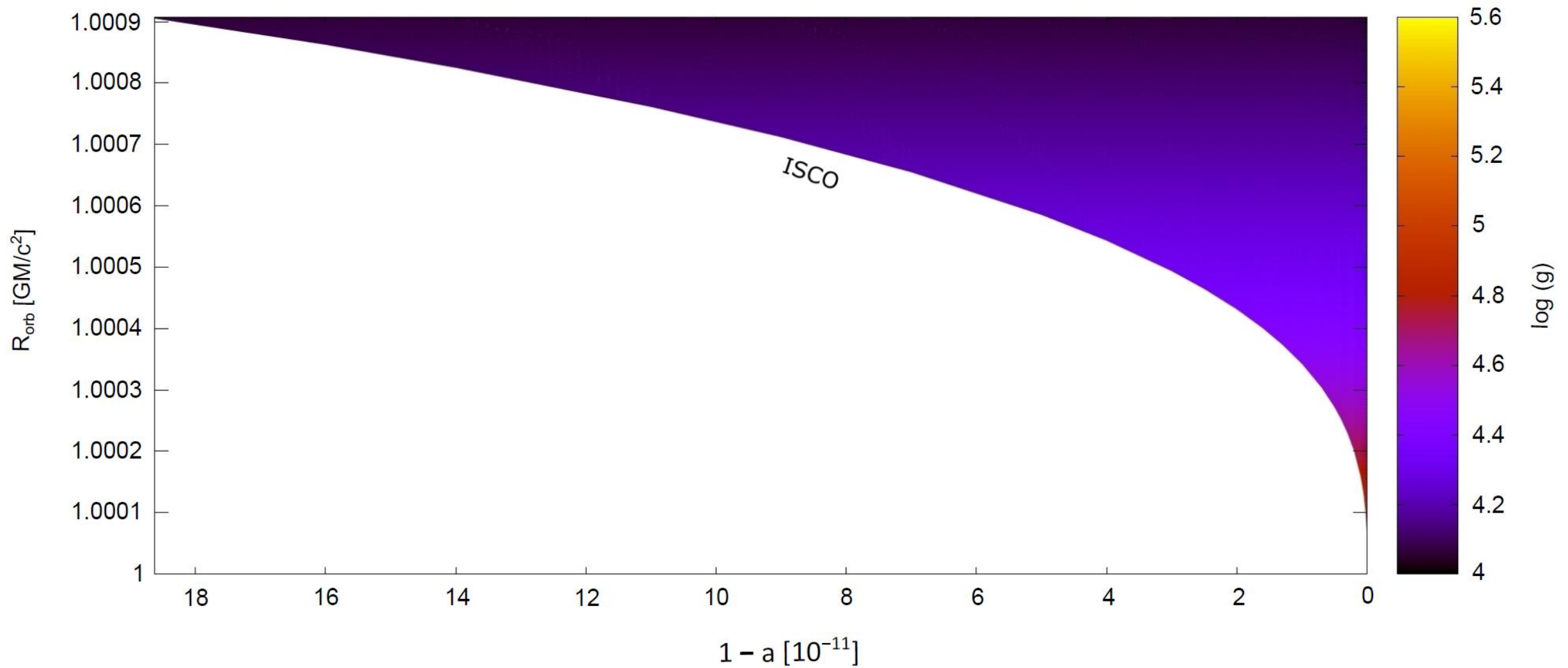


FIG. 4. The maximum frequency shift factor of the CMB coming from the exoplanetary local sky g (in a decadic logarithmic scale) as a function of the black hole spin a and the radius of the exoplanetary orbit R_{orb} .

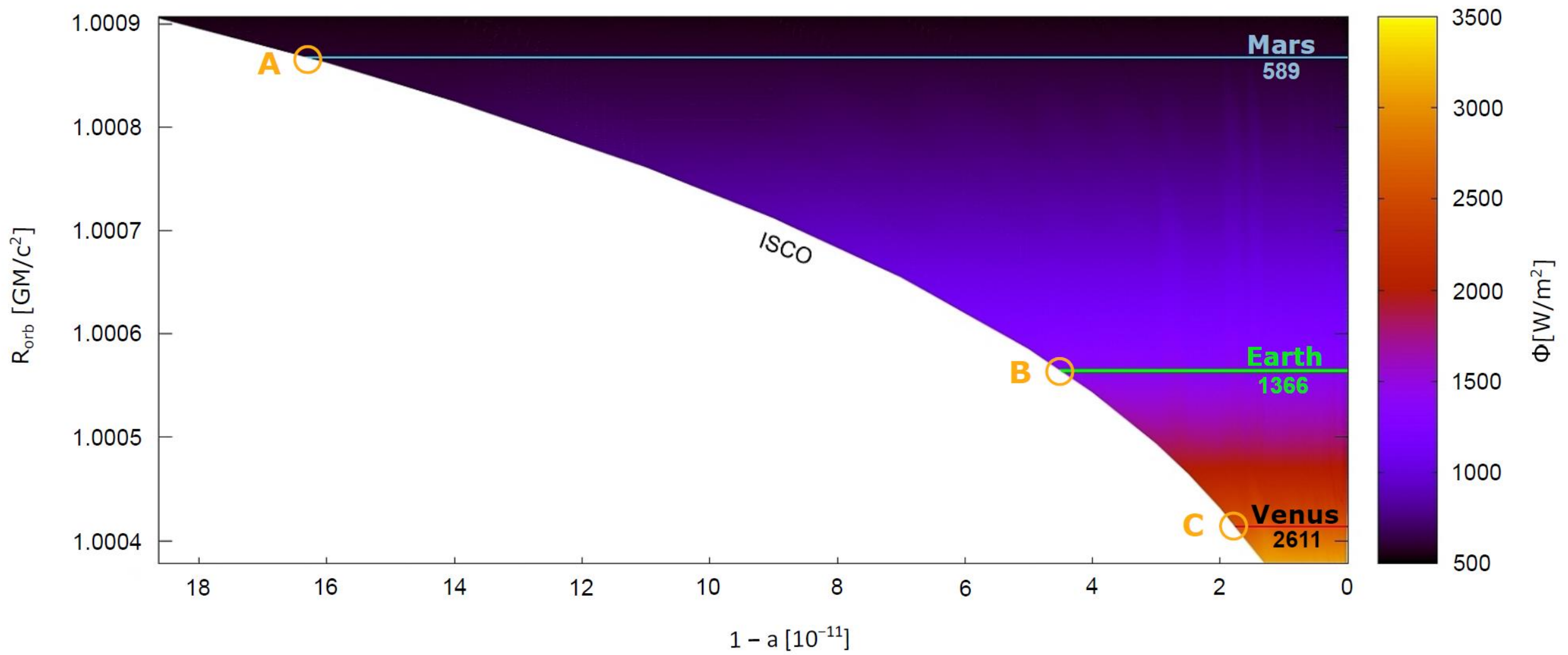


FIG. 5. The flux density of the CMB coming from the exoplanetary local sky (solar constant) Φ [W/m²] as a function of the black hole spin a and the radius of the exoplanetary orbit R_{orb} . The range of R_{orb} is restricted to the habitable zone only.

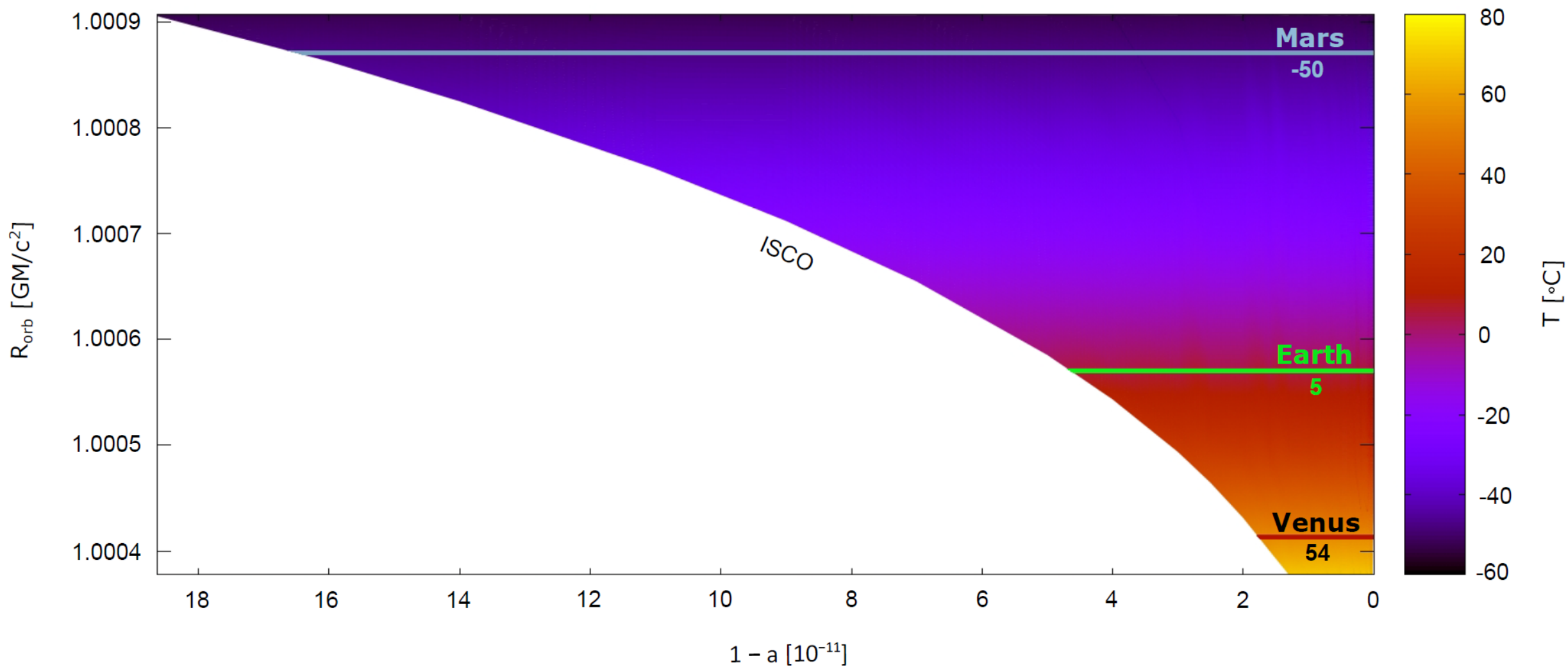


FIG. 6. Estimated temperature of the exoplanet T [°C] as a function of the black hole spin a and the radius of the exoplanetary orbit R_{orb} . The range of R_{orb} is restricted to the habitable zone only.

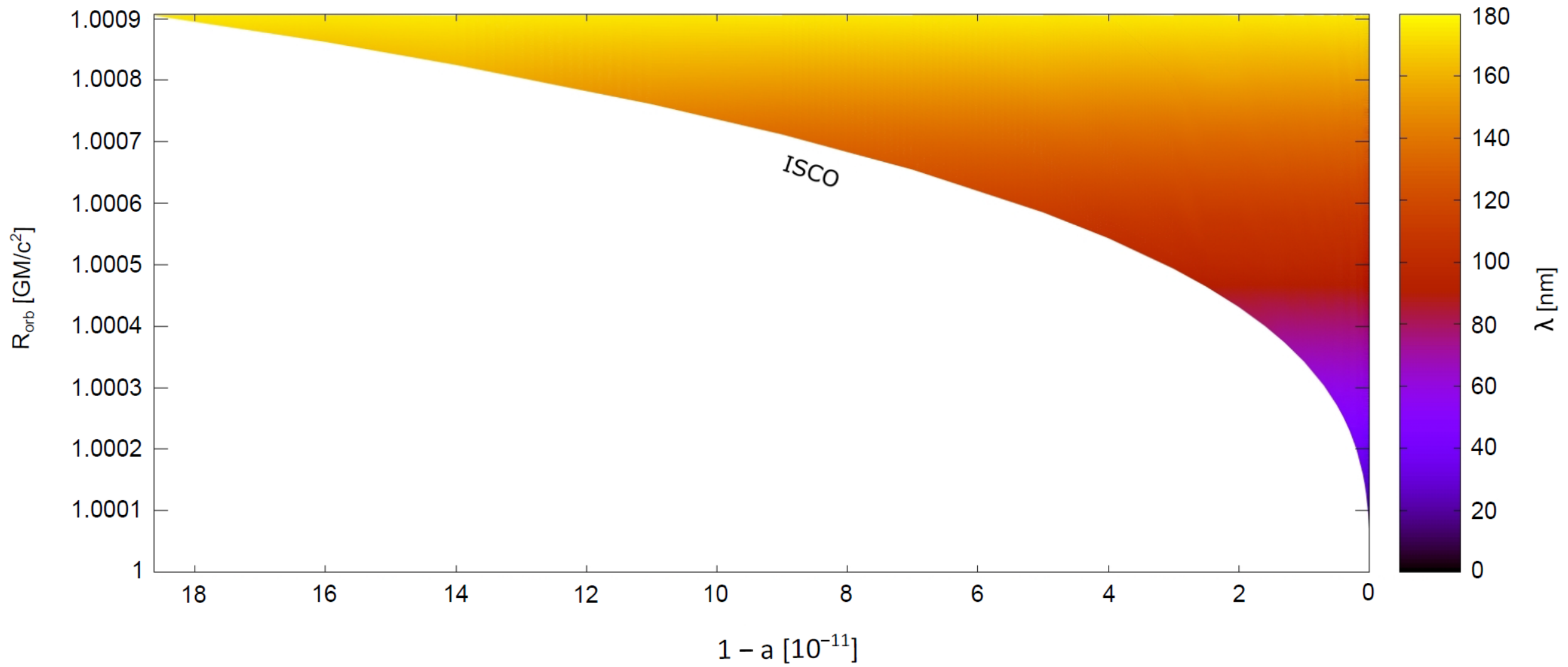
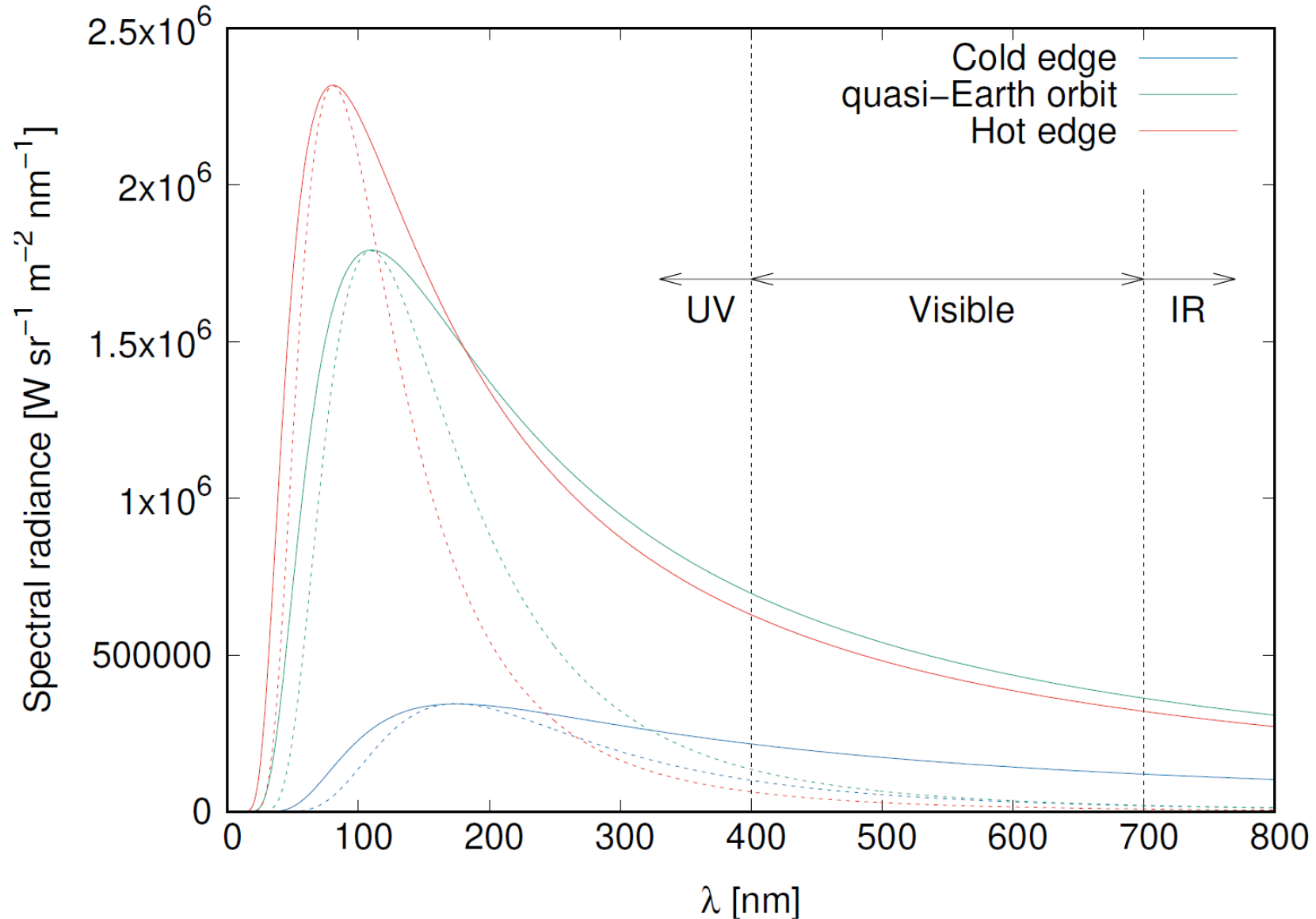


FIG. 7. Peak wavelength of the resulting multi-black-body spectrum of incoming CMB λ_{max} [nm] as a function of the black hole spin a and the radius of the exoplanetary orbit R_{orb} .

Spektrální profily CMB příchozího z lokální oblohy exoplanety obíhající v obyvatelné zóně kolem extrémní Kerrovy černé díry



Stabilita vůči slapovým silám

Tidal disruption radius

$$R_t = \left(\frac{M}{m_\star} \right)^{\frac{1}{3}} r_\star$$

Earth' s sized exoplanet

$$m_\star = 5.97 \cdot 10^{24} \text{kg} , r_\star = 6.37 \cdot 10^6 \text{ m}$$

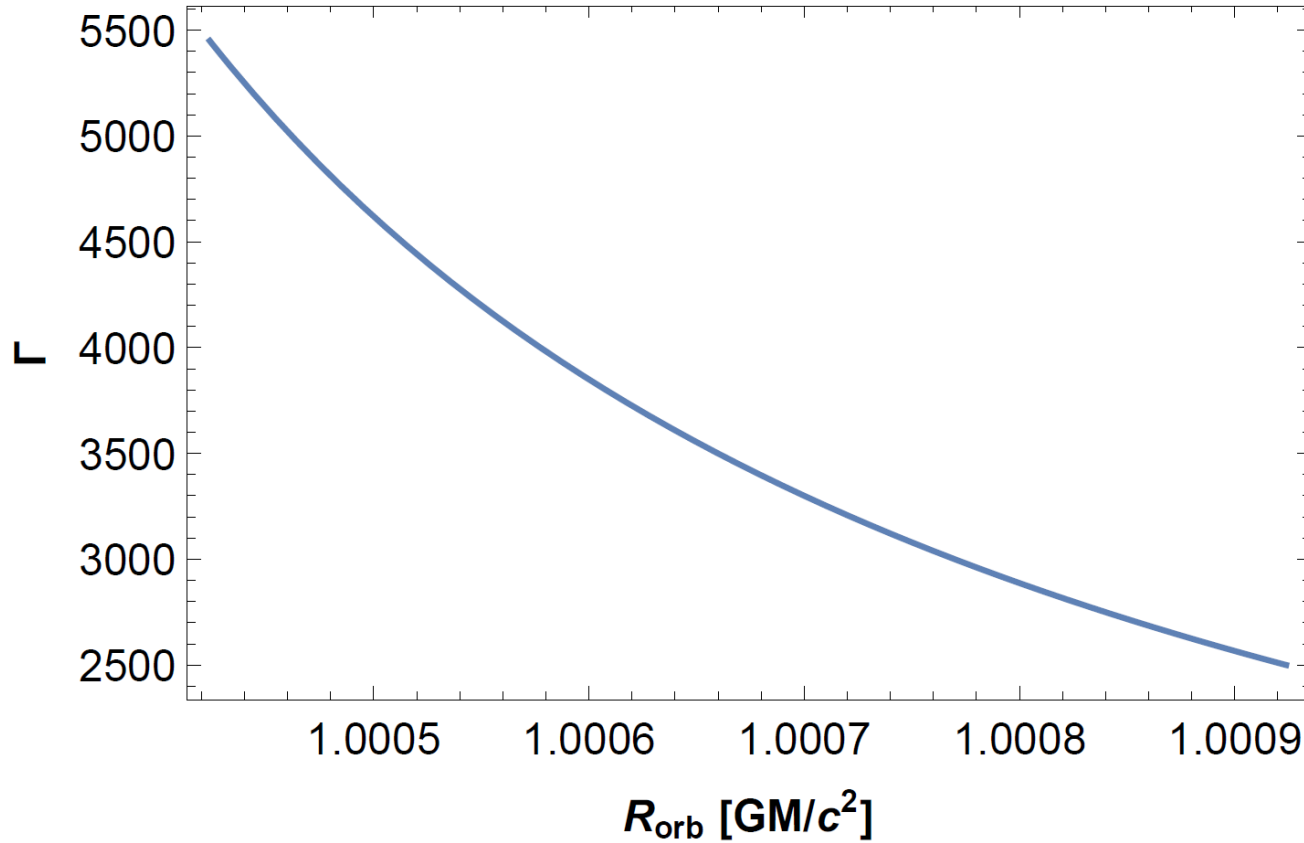
Black hole mass

$$M \sim 1.63 \cdot 10^8 m_\odot$$

Habitable zone width

$$1.667 \cdot 10^5 \text{ km}$$

Časová dilatace v obyvatelné zóně



$$\Gamma = \gamma \sqrt{\frac{A}{\Delta \Sigma}}$$

FIG. 3. The time dilation factor Γ as a function of the radial coordinate of the exoplanetary circular orbit. The range of the radial coordinate is restricted to the habitable zone, the spin is fixed to the extreme value of $a = 1$.

Závěry

- Obyvatelná zóna může vzniknout v těsné blízkosti supermasivních, téměř extrémních rotujících černých děr se spinem $a \geq 1 - 1.64 \cdot 10^{-10}$.
- Hmotnost BH zajišťující odolnost exoplanety vůči slapovému roztrhání v obyvatelné zóně musí být $M \geq 1.63 \cdot 10^8 m_{\odot}$
- Studený okraj obyvatelné zóny se nachází na $R_{orb} = 1.00090 GM/c^2$
- Horká okraj obyvatelné zóny se nachází na $R_{orb} = 1.00042 GM/c^2$

ANATOMY OF A BLACK HOLE

DOPPLER BEAMING

Light from glowing gas in the accretion disc is brighter on the side where material is moving towards us, and fainter where it's moving away

FAR SIDE OF ACCRETION DISC

The black hole's gravity alters the path of light from the far side of the disc

PHOTON RING

This ring of light is composed of multiple distorted images of the disc. The images become fainter closer to the black hole

EVENT HORIZON

The 'point of no return', from which nothing, not even light, escapes

ACCRETION DISC HABITABLE ZONE

The orbit of a potentially habitable planet (blue region) warmed by the accretion disc

ACCRETION DISC

Hot, thin, rotating disc (orange bands) formed by matter spiralling towards the black hole

CMB HABITABLE ZONE

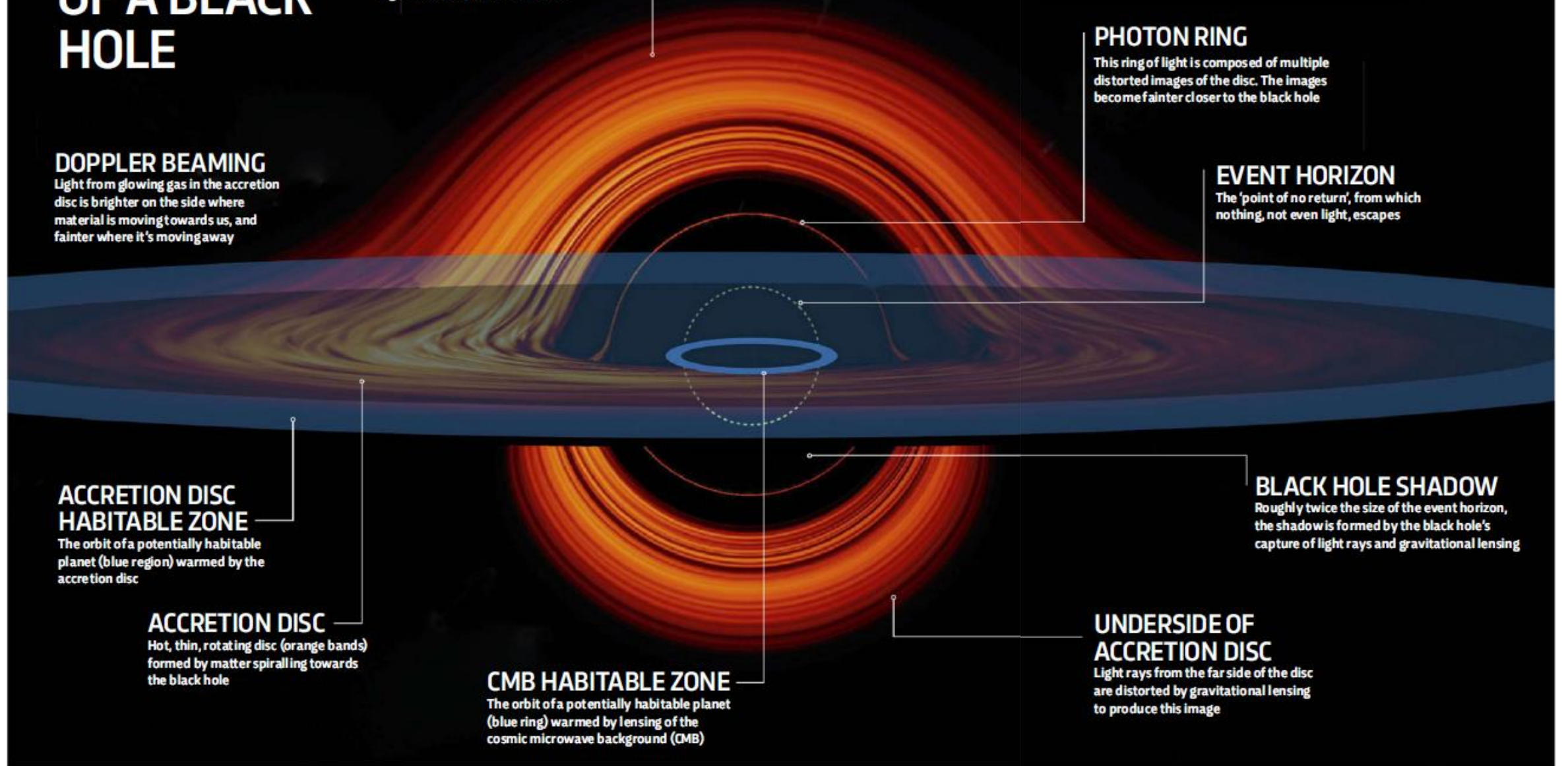
The orbit of a potentially habitable planet (blue ring) warmed by lensing of the cosmic microwave background (CMB)

BLACK HOLE SHADOW

Roughly twice the size of the event horizon, the shadow is formed by the black hole's capture of light rays and gravitational lensing

UNDERSIDE OF ACCRETION DISC

Light rays from the far side of the disc are distorted by gravitational lensing to produce this image



Reference

- Opatrný, Tomáš; Richterek, Lukáš; Bakala, Pavel: **Life under a black sun**, 2017, American Journal of Physics, Vol 85/1
- Bakala, Pavel ; Dočekal Jan, Turoňová, Zuzana: **Habitable zones around almost extremely spinning black holes (black sun revisited)**, 2020, Astrophysical Journal, Vol 889/1, id.41

DAILY NEWS 18 January 2016

Black hole sun could support bizarre life on orbiting planets

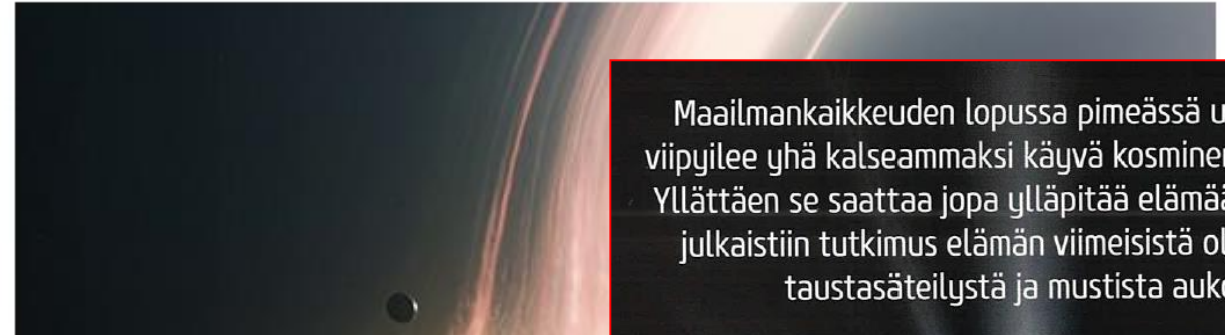


Čeští vědci popsali, jak by život mohl bujet kolem černé díry!



Под мертвым солнцем

Вблизи черных дыр допустили существование жизни



Maailmankaikkeuden lopussa pimeässä universumissa viipyy yhä kalseammaksi käyvä kosminen taustasäteily. Yllättäen se saattaa jopa ylläpitää elämää. Joulukuussa julkaistiin tutkimus elämän viimeisistä oljenkorsista taustasäteilyä ja mustista aukoista.

TEKSTI MARKUS HOTAKAINEN

BBC HOW NEW TECH IS SOLVING THE OCEAN'S BIGGEST MYSTERIES

Science Focus

IT'S LIFE, JIM, BUT NOT AS WE KNOW IT

Meet the engineer
BUILDING BIOLOGICAL ROBOTS

Why are there so many
COVID-19 SYMPTOMS?

How researchers
TRACK THE PLANKTON

IS THERE LIFE AROUND BLACK HOLES?

The theory that could redefine the hunt for alien worlds

experienced by our sun and Earth. to provide a source of useable space, but what if you flip the script? Jacky University in Olomouc, and Soundgarden.

исследование на сайте а New Scientist. «Лента.ру» ученых, посвященных во

Science

Contents ▾

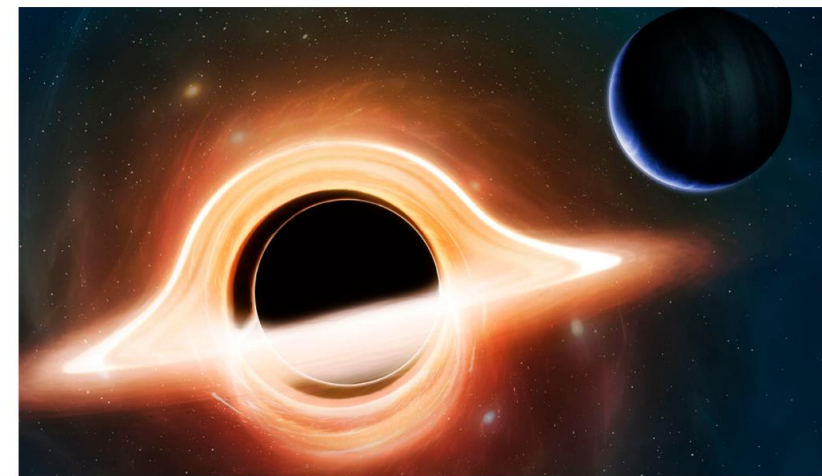
News ▾

Careers ▾

Journals ▾

[Read our COVID-19 research and news.](#)

SHARE



Life around a black hole? Possible, but no place like home MARK GARLICK/SCIENCE PHOTO LIBRARY

Could a habitable planet orbit a black hole?

Děkuji za pozornost

