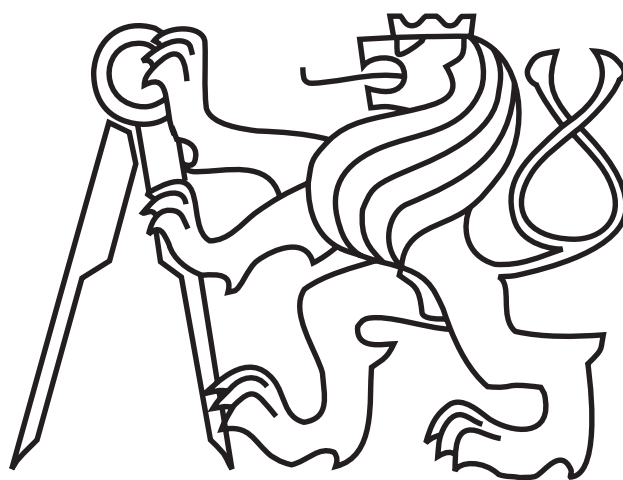


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

Astrofyzika



Petr Kubašta

Vypracované otázky od Milana Červenky
(verze z 13.5.2012)

Praha, 2012

Tento soubor vypracovaných otázek vznikl neoficiálně pro kurz Astrofyzika. Tato práce neprošla žádnou revizí ani recenzí. Autor se nezaručuje za absolutní správnost všech odpovědí.

V případě, že naleznete chybu prosím, kontaktujte autora na email: kubaspet@fel.cvut.cz

Chybí: 6, 54, 55, 63 , 72-78

1. Co je astronomická jednotka, jaká je zhruba její velikost?

Astronomická jednotka (AU): střední vzdálenost Země od Slunce, 150×10^6 km.

2. Zhruba jak daleko je od Slunce nejvzdálenější objekt vyrobený člověkem a co to je?

Nejvzdálenější člověkem vyrobené těleso, sonda Voyager 1, bylo 31. prosince 2007 ve vzdálenosti 104,93 AU od Slunce.

3. Co je světelný rok?

Světelný rok (ly): vzdálenost, kterou světlo ulétne za jeden rok, 9.46×10^{12} km.

4. Jak je definován parsek?

Parsek (pc), paralaktická sekunda: vzdálenost, ze které by poloměr oběžné dráhy Země byl kolmo k zornému paprsku vidět pod úhlem 1", 30.9×10^{12} km.

5. Jaký je vztah mezi parsekem a světelným rokem?

$1pc = 3.27ly$ Parsek je tedy více než 3 krát větší než světelný rok.

6. Co je paralaxa?

TODO: Čím je objekt dál, tím má menší paralaxu.

7. Jak vzdálená je nejbližší hvězda od Slunce (Od Země)?

Od Slunce:

Hvězda se jmenuje *Proxima Centauri*. Od země je vzdálena asi 4,2 ly či 270 000 AU. (předpokládám, že to stačí i jako vzdálenost od Slunce)

Od Země:

Je nejbližší hvězda Slunce a vzdálenost je 1AU.

8. Jak daleko je zhruba Slunce od středu naší Galaxie?

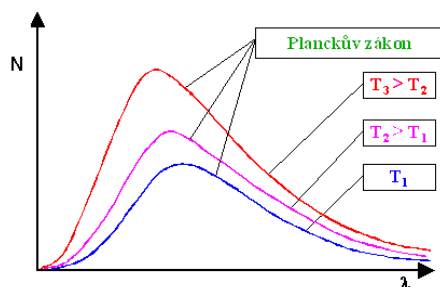
Slunce je hvězdou průměrné velikosti a ani jeho poloha v naší Galaxii není nijak výjimečná. Leží asi v 1/3 průměru disku Galaxie (přibližně 30 000 světelných roků od jejího středu).

9. Jaký má zhruba průměr naše galaxie?

100 000 ly

10. Co vyjadřuje Planckův vyzařovací zákon?

Závislost spektrální hustoty vyzařování na vlnové délce, respektive teplotě. Planckův vyzařovací zákon má po zjednodušení tvar: $N(\lambda, T) = \frac{c_1}{\lambda^5 (e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1)}$, kde c_1 a c_2 jsou konstanty, λ je vlnová délka záření a konečné T je termodynamická teplota $[K]$



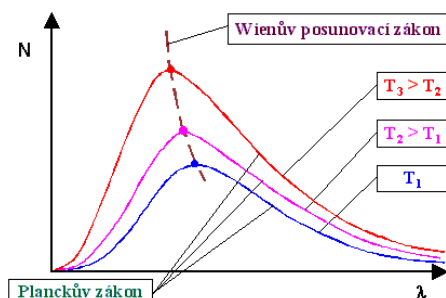
Obrázek 1: Závislost spektrální hustoty vyzařování na vlnové délce, pro různé teploty.
[Z link](#)

11. Jak zní Wienův posunovací zákon?

$$\lambda_{max} = \frac{b}{T}$$

Kde λ_{max} je vlnová délka maxima vyzařování, $T[K]$ je teplota tělesa a $b = 2,898 mm.K$ je tzv. Wienova konstanta.

S rostoucí teplotou zářícího absolutně černého tělesa se maxima spektrální hustoty vyzařování posouvají k menším vlnovým délkám (větším frekvencím). Více zde [link](#).



Obrázek 2: Wienův zákon - posun maxim spektrální hustoty v závislosti na teplotě.
[Z link](#)

12. **Jak zní Stefanův-Boltzmannův zákon?**

Intenzita vyzařování I roste se čtvrtou mocninou termodynamické teploty.

$$I = \int_0^\infty N(\lambda, T) d\lambda = \sigma T^4$$

Kde $I[W.m^{-2}]$ a $\sigma = 5,6704.10^{-8} W.m^{-2}.K^{-4}$ je Stefan-Boltzmanova konstanta. Výpočet určuje celkový výkon na všech vlnových délkách na jednotku plochy (m^2)

13. **Na čem závisí vizuální jasnost hvězdy?**

Na velikosti jejího světelného toku a vzdálenosti pozorovatele. Podle vzorce:

$$j = \frac{\phi}{4\pi r^2}; \left[\frac{lm}{m^2}\right]$$

Kde ϕ je světelný tok (energie posuzovaná z hlediska citlivosti oka) a r je vzdálenost pozorovatele od hvězdy.

14. **Hvězdy A a B mají stejný poloměr, hvězda A má x-krát větší (termodynamickou) teplotu, než hvězda B. Kolikrát větší výkon vyzařuje hvězda A oproti B?**

Pokud má x-krát větší teplotu, tak vyzařuje x^4 krát více výkonu.

Výpočet vychází ze vztahu pro výpočet vyzařovaného výkonu hvězdou

$$L = I.S = 4\pi R^2 \sigma T^4$$

Kde $R[m]$ je poloměr hvězdy a $T[K]$ je její termodynamická teplota a $L[W]$ je zářivý výkon.

15. **Hvězdy A a B mají stejnou teplotu, hvězda A má x-krát větší průměr, než hvězda B. Kolikrát větší výkon vyzařuje hvězda A oproti B?**

Hvězda A bude mít x^2 - krát větší výkon než hvězda B. Viz předchozí vztah.

16. **Jaká je intenzita slunečního záření ve vzdálenosti x astronomických jednotek od Slunce oproti intenzitě v blízkosti Země?**

Je x^2 krát menší. Záření se šíří po povrchu koule. Intenzita klesá s kvadrátem vzdálenosti.

Vychází ze vztahu $I = \frac{L}{S}[W \cdot m^{-2}]$. Pro kouli nabude vztah tvaru $I = \frac{L}{4\pi r^2}[W \cdot m^{-2}]$.

17. Co je, a jakou zhruba hodnotu má sluneční konstanta?

Sluneční konstanta je množství sluneční energie dopadající kolmo na $1 m^2$ povrchu za sekundu mimo atmosféru Země. Hodnota sluneční konstanty je $1.4 kW/m^2$.

18. Jaká je zhruba povrchová teplota slunce?

Asi $5800 K$.

19. Jak je definována (relativní) magnituda?

Magnituda (hvězdná velikost) pro libovolné hvězdy: $m = -2,5 \log(\frac{j}{j_0})$, kde j_0 byla určena definitoricky pro hvězdu magnitudy 0.

Pogsonova rovnice $m_1 - m_2 = -2,5 \log(\frac{j_1}{j_2})$, kde j_1 a j_2 jsou hustoty světelného toku (množství světla dopadajících na jednotku plochy za jednotku času) a m_1 a m_2 jsou magnitudy. Dále viz [link](#).

Magnitudy takto vypočtené odpovídají historickému dělení hvězd do šesti skupin (0 nejjasnější, 5 nejméně jasné pozorovatelné okem).

20. Jak je definována absolutní magnituda?

Absolutní magnituda M je magnituda (relativní), kterou by hvězda měla ve vzdálenosti $10pc$. Zadáváme-li vzdálenost hvězdy r v parsecích, platí mezi relativní a absolutní magnitudou vztah.

$$M = m + 5 - 5 \log(r)$$

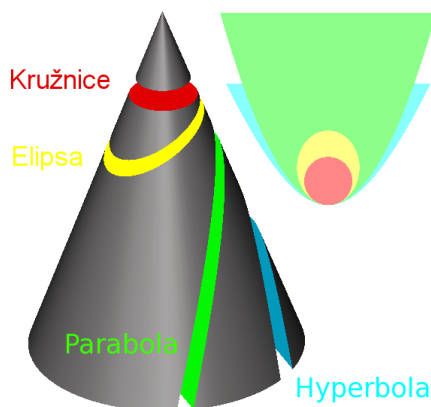
21. Jaké fyzikální veličiny porovnáváme u hvězd, když porovnáváme jejich relativní magnitudy?

Porovnáváme jejich hustoty světelného toku. Či-li jejich zdánlivou jasnost. (Jak se nám zdají býti na obloze jasné, nebere se v potaz jejich vzdálenost.)

22. Jaké fyzikální veličiny porovnáváme u hvězd, když porovnáváme jejich absolutní magnitudy?

Porovnáváme skutečné jasnosti hvězd. Jako by od nás byly všechny vzdálené stejně a to $10pc$.

23. **Která hvězda je na obloze nejjasnější?**
Slunce (Magnituda -26.73)
24. **Která hvězda je na noční obloze nejjasnější?**
Sirius
25. **Hvězda A má relativní magnitudu x , hvězda B má relativní magnitudu y . Kterou z nich na obloze vidíme jasnější?**
Jasnější je ta, která má menší relativní magnitudu.
26. **Objekt zhruba jaké relativní magnitudy ještě vidí neozbrojené lidské oko?** Relativní magnitudy 5 až 6.
27. **Co jsou to kuželosečky?**
Kuželosečka je rovinná křivka, která vznikne jako průnik roviny s pláštěm rotačního kuželu (tzv. kuželová plocha), přičemž rovina neprochází jeho vrcholem.



Obrázek 3: Kuželosečky

28. **Po jakých trajektoriích se pohybují planety ve sluneční soustavě?**
Planety obíhají kolem Slunce po eliptických drahách, v jejichž jednom společném ohnisku je Slunce. (1. Keplerův zákon)
29. **Jak zní třetí Keplerův zákon?**
Poměr druhých mocnin oběžných dob dvou planet se rovná poměru třetích mocnin délek hlavních poloos jejich trajektorií.

$$\frac{T_1^2}{T_2^2} = \frac{a_1^3}{a_2^3}$$

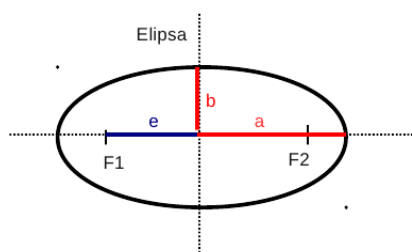
30. Planeta X má (v astronomických jednotkách) velkou poloosu a_x . Jaká je její oběžná perioda vyjádřená pomocí oběžné periody Země?

Vyjdeme z třetího Keplerova zákona.

$$\frac{T_z^2}{T_x^2} = \frac{1^3}{(a_x \cdot 1)^3}$$

$$T_x = T_z \sqrt{a_x^3}$$

31. Jaké numerické výstřednosti mají jednotlivé kuželosečky?
a ... velká poloosa



Obrázek 4: Elipsa

b ... malá poloosa

e ... délková výstřednost (excentricita)

Numerická excentricita je definována:

$$\varepsilon = \frac{e}{a}$$

Hodnota výstřednosti	Kuželosečka
$\varepsilon = 0$	kružnice
$0 < \varepsilon < 1$	elipsa
$\varepsilon = 1$	parabola
$\varepsilon > 1$	hyperbola

32. Co je 1. kosmická rychlost?

1. kosmická rychlost – rychlost, kterou potřebuje dosáhnout těleso zanedbatelné hmotnosti, aby obíhalo po **kruhové dráze** kolem planety; uvažujeme hodnotu na úrovni povrchu planety. Na Zemi tato rychlost činí **7,9 km/s**. Viz [link](#).

33. **Co je 2. kosmická rychlost, jaká je její velikost?**

Minimální **úniková** rychlost z povrchu planety. Těleso se pohybuje po **parabole**. $v_{II} = 11,2 \text{ km.s}^{-1}$

34. **Jaký je vztah mezi první a druhou kosmickou rychlostí?**

$$v_{II} = \sqrt{2}.v_I$$

35. **Co je třetí kosmická rychlost?**

Úniková rychlost ze sluneční soustavy. Tedy rychlost potřebná k úniku gravitačního působení Slunce. Těleso se pohybuje po hyperbolické dráze.

K odletu z míst oběžné dráhy Země je třeba rychlosti 42,1 km/s, lze však využít oběžné rychlosti planety Země, ta činí 29,8 km/s. Potřebná dodatečná rychlost tak klesne na 12,4 km/s. Raketa však musí překonat gravitační pole Země. Třetí kosmická rychlost proto je **16,7 km/s** při startu ze zemského povrchu (tak se udává nejčastěji), případně 13,8 km/s pro odlet z vyčkávací dráhy kolem Země. Viz [link](#)

36. **Co je čtvrtá kosmická rychlost?**

Jde o rychlost potřebnou k **dosažení Slunce**.

$$v_{IV} = \sqrt{v_{II}^2 + v_{zs}^2} = \sqrt{11,2^2 + 29,8^2} = 31,8 \text{ km.s}^{-1}$$

Kde v_{II} je 2. kosmická rychlost a v_{zs} je oběžná rychlost země kolem slunce. Projektil střílíme proti směru pohybu.

37. **Jakou rychlost musíme udělit projektilu, aby se pohyboval po parabolické trajektorii?**

2. kosmickou rychlost. Podle vztahu:

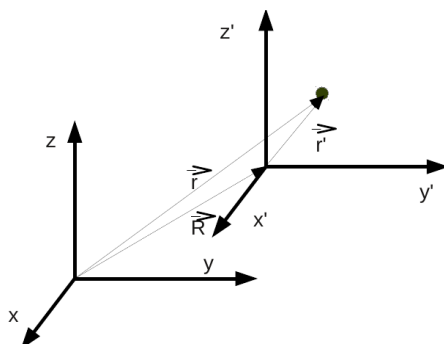
$$v_p = \sqrt{\frac{2GM_z}{R_z+h}}$$

38. **Jakým směrem musíme vystřelit projektil, aby vzhledem ke Slunci měl co možná největší rychlost?**

Proti směru pohybu Země kolem Slunce. Viz 4. kosmická rychlost.

39. Galileiho transformace.

$$t = t'$$



Obrázek 5: Obě soustavy jsou inerciální, čárkovaná se vůči nečárkované pohybuje konstantní rychlostí $\vec{V}$

$$\begin{aligned}\vec{r} &= \vec{r}' + \vec{R} \quad / \frac{d}{dt} \\ \frac{d\vec{r}}{dt} &= \frac{d\vec{r}'}{dt} + \frac{d\vec{R}}{dt} \\ \vec{v} &= \vec{v}' + \vec{V} \quad / \frac{d}{dt} \\ a &= a'\end{aligned}$$

40. Einsteinovi postuláty STR.

1) **Einsteinův princip relativity:** Fyzikální zákony jsou stejné pro pozorovatele ve všech inerciálních vztažných soustavách (IVS). Žádná IVS není privilegována.

2) **Neměnnost c:** Rychlost světla ve vakuu c , je stejná pro pozorovatele ve všech inerciálních vztažných soustavách, stejná ve všech směrech, a nezávisí na rychlosti zdroje.

41. Lorentzova transformace.

Předpokládáme, že souřadnicová soustava S' , se pohybuje vzhledem k soustavě S , rychlostí v a obě soustavy jsou inerciální. V při malých rychlostech přechází v Galileovu Přímá (od S do S') transformace prostoru a času je dána:

$$\begin{aligned}x' &= \frac{x-vt}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} \\ y' &= y \\ z' &= z \\ t' &= \frac{t-\frac{v}{c^2}x}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}\end{aligned}$$

Zpětná transformace:

$$\begin{aligned}x &= \frac{x' + vt'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \\y &= y' \\z &= z' \\t &= \frac{t' + \frac{v}{c^2}x'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}\end{aligned}$$

42. Jaký je vztah mezi Galileiho a Lorentzovou transformací?

Galileiho transformace je špatně, platí přibližně pro malé rychlosti. Při malých rychlostech lze v prvním přiblížení považovat Galileiho a Lorentzovu transformaci za shodné.

43. Dilatace času (jednoduchý příklad).

V soustavě S to vypadá, že v soustavě S' uplynul delší čas.

$$\Delta t = \frac{\Delta t'}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

nebo-li

$$\Delta t = \Delta t' \gamma$$

44. Kontrakce délek (jednoduchý příklad). Vyjadřuje zkracování rozměrů pohybujících se těles ve směru jejich pohybu.

$$l = l' \sqrt{1 - \beta^2}$$

45. Časoprostorový interval. Je veličina invariantní vůči Lorentzově transformaci.

$$s^2 = x^2 + y^2 + z^2 - c^2 t^2 = x'^2 + y'^2 + z'^2 - c^2 t'^2$$

Neboli

$$s_{AB}^2 = (x_B - x_A)^2 + (y_B - y_A)^2 + (z_B - z_A)^2 - c^2 (t_B - t_A)^2$$

Je-li

1) $s_{AB}^2 > 0$ platí $|\vec{r}_B - \vec{r}_A| > c|t_B - t_A|$, prostorová odlehlost je větší, než dokáže světlo za čas $|t_B - t_A|$ urazit (prostoru podobný interval).

2) $s_{AB}^2 = 0$ platí $|\vec{r}_B - \vec{r}_A| = c|t_B - t_A|$, události mohou být spojeny světlem.

3) $s_{AB}^2 < 0$ platí $|\vec{r}_B - \vec{r}_A| < c|t_B - t_A|$, události mohou být kauzálně spojeny (interval času podobný).

46. Minkowského metrika.

Časoprostorový interval:

$$ds^2 = -c^2 dt^2 + dx^2 + dy^2 + dz^2$$

47. Dopplerův jev pro světlo (vlastnosti).

Pro světlo nerozlišujeme zda se pohybuje pozorovatel nebo zdroj (jak je tomu u zvuku.). Rozlišujeme pouze zda se objekty vzdalují, nebo přibližují.

1) Vzdalují se - pozorovatel bude pozorovat nižší frekvence.

$$f = \sqrt{\frac{c-v}{c+v}} f_0$$

$$f < f_0$$

f ... pozorovaná frekvence

f_0 ... frekvence v pozorované soustavě

v ... rychlost vzdalování

2) Přibližují se - pozorovatel bude pozorovat vyšší frekvence.

$$f = \sqrt{\frac{c+v}{c-v}} f_0$$

$$f > f_0$$

f ... pozorovaná frekvence

f_0 ... frekvence v pozorované soustavě

v ... rychlost přibližování

48. Schwarzschildova metrika.

Popisuje zakřivení prostoročasu v okolí nerotujícího sféricky symetrického objektu.

$$(ds)^2 = -c^2 \left(1 - \frac{r_g}{r}\right) (dt)^2 + \frac{(dr)^2}{1 - \frac{r_g}{r}} + r^2 (d\vartheta)^2 + r^2 \sin^2 \vartheta (d\varphi)^2$$

$$r_g = \frac{2GM}{c^2}$$

r_g ... Schwarziöldův poloměr

G ... Gravitační konstanta

M ... hmotnost objektu

Všimněme si, že Schwarzioldův poloměr závisí na hmotnosti objektu, který vytváří pokrivení prostoročasu (hvězda, černá díra). První člen metriky říká, že čas plyne v různých vzdálenostech od objektu různě rychle.

Vlastnosti:

- popisuje zakřivený prostoročas vně hmoty - pro $r \gg r_g$ přechází v Minkowského metriku - pro $r \rightarrow r_g$ má singularitu (dělení nulou) $\Rightarrow$ radiální vzdálenosti nekonečné a časy jdou k nule.

49. Co je to černá díra?

Černé díry jsou velice hmotné hvězdy, kterým neunikne ani světlo. Dále viz například [link](#).

50. Jak závisí Schwarzschildův "poloměr" na hmotnosti objektu?

$$r_g = \frac{2GM}{c^2}$$

r_g ... Schwarzioldův poloměr

G ... Gravitační konstanta

M ... hmotnost objektu

Čím větší je hmotnost objektu, tím větší je Schwarzioldův poloměr.

51. Jak se projevuje zakřivení prostoru v okolí hmotného objektu?

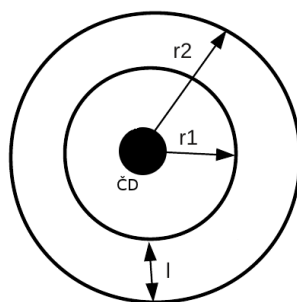
Podle schwarzioldovy metriky, prostorové členy:

$$(dl)^2 = \frac{(dr)^2}{1 - \frac{r_g}{r}} + r^2(d\vartheta)^2 + r^2 \sin^2 \vartheta (d\varphi)^2$$

Pro radiální vzdálenost $l \neq r_2 - r_1$, ale musí se počítat jako $l = \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{\sqrt{1 - \frac{r_g}{r}}}$

52. Jaká je prostoročasová vzdálenost dvou událostí propojených světelným signálem?

Pro dvě události propojené světlem, je prostoročasová vzdálenost vždy 0.



$$(ds)^2 = 0$$

$$\Delta s = 0$$

Náznak odvození:

$$(\Delta s)^2 = -c^2(\Delta t)^2 + (\Delta l)^2$$

$$\Delta l = c \cdot \Delta t$$

53. Jak se počítá vlastní čas z metriky?

Základní myšlenkou je, že invariant $(ds)^2$, který má rozměr délky, převedeme na invariant $d\tau$, který má rozměr času. $d\tau$ se nazývá vlastní čas, a je to čas spojený se sledovaným tělesem. Je invariantní vůči Lorentzově transformaci.

Tak například výpočet pro Schwarziela:

$$(ds)^2 = -c^2(d\tau)^2$$

$$-c^2\left(1 - \frac{r_g}{r}\right)(dt)^2 = -c^2(d\tau)^2$$

$$d\tau = \sqrt{1 - \frac{r_g}{r}} dt$$

Z tohoto například vyplývá, že když se blíží $r \rightarrow r_g$, čas se prodlužuje. (čím blíž k objektu, tím plyne čas pomaleji.)

54. Šíření světla v blízkosti hmotných objektů?

55. Gravitační Dopplerův jev?

56. Jak plyne čas v gravitačním poli?

Čím jsme blíže ke hmotnému objektu, tím plyne čas pomaleji.

57. Friedmanova metrika?

Metrika nestacionárního homogenního izotropního vesmíru. Je to tedy metrika, která bere v potaz expanzi vesmíru (nestacionární).

$$(ds)^2 = -c^2(dt)^2 + a^2(t)\left[\frac{(dr)^2}{1-kr^2} + r^2 d\vartheta + r^2 \sin^2 \vartheta (d\varphi)^2\right]$$

$a(t)$... expanzní funkce (rozpínání vesmíru v čase)

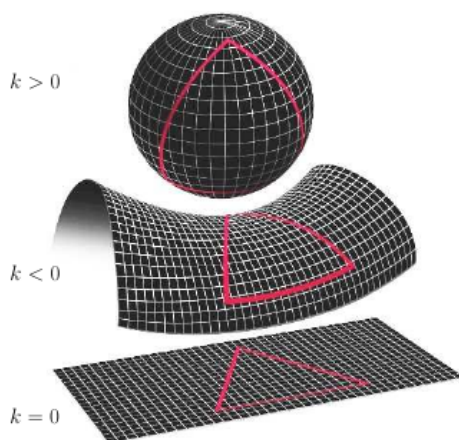
k ... je Gaussova skalární křivost.

58. Význam expanzní funkce?

$a(t)$ z Friedmanovy metriky. Funkce času $a(t)$ udávající, jakým způsobem se s časem mění vzdálenosti v rozpínajícím se vesmíru. Můžeme si ji představit jako poměr vzdálenosti libovolných dvou vzdálených objektů ve vesmíru dnes a v minulosti. Více [link](#).

59. Skalární křivost vesmíru – jakých hodnot může nabývat?

Jak je vidět na obrázku 6. Vesmír může být kladně zakřivený ($k>0$),



Obrázek 6: Dvourozměrné analogie různých geometrií vesmíru v závislosti na hodnotách parametru k (opraveno podle [link](#)).

plochý ($k=0$) nebo záporně zakřivený ($k<0$).

Dále si všimněte, že prostory s kladnou křivostí vedou na konečný objem. Modely se zápornou nebo nulovou křivostí vedou na objem nekonečný. Tento závěr platí ale pouze pokud mluvíme o modelech bez děr.

Součet úhlů	Odpovídající křivost
$\alpha + \beta + \gamma > 180^\circ$	$k > 0$
$\alpha + \beta + \gamma = 180^\circ$	$k = 0$
$\alpha + \beta + \gamma < 180^\circ$	$k < 0$

60. Jednoduché (principiální) testy skalární křivosti vesmíru.

Lze vyzkoušet pomocí součtu úhlů v trojúhelníku.

61. Souvislost objemu vesmíru a skalární křivosti?

Ve Friedmanově geometrii vedou prostory s kladnou křivostí ($k > 0$) na konečný objem Vesmíru, modely se zápornou a nulovou křivostí ($k \leq 0$) na nekonečný objem.

To ale platí jen pro Vesmíry jednoduše souvislé („bez děr“). Vesmír, kterému by ve dvou dimenzích odpovídal například toroid nebo dvojtoroid již není jednoduše souvislý. Upustíme-li od požadavku na jednoduchou souvislost, může existovat Vesmír s konstantní zápornou křivostí a přesto konečným objemem. Viz [astrofyzika v příkladech](#).

62. Vlastnosti kladně zakřiveného vesmíru?

- Nemá hranici
- Má konečný objem
- Součet úhlů v trojúhelníku je větší než 180°
- Lze jej z principu obejít do kola
- Obvod kruhu je menší než $2\pi r$

63. Kosmologický posuv.

Posuv spektrálních čar k červenému konci spektra díky rozpínání vesmíru. Při rozpínání dochází nejen ke vzájemnému vzdalování galaxií, ale i k prodlužování vlnových délek záření. Spektrum vzdálených objektů ve vesmíru se tak jeví posunuté směrem k červené až infračervené oblasti. Kosmologický červený posuv je definován předpisem $z = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0}$, kde λ_0 je vlnová délka spektrální čáry v okamžiku vyslání paprsku, λ je vlnová délka téže spektrální čáry v okamžiku zachycení paprsku. Malé kosmologické červené posuvy lze interpretovat pomocí Dopplerova jevu. Viz [link](#).

64. Jaké je stáří vesmíru?

Asi 13,75 miliard let.

65. Jak velký je pozorovatelný vesmír?

Průměr vesmíru je asi 93 miliard ly (světelných let).

66. Co je reliktní záření?

Reliktní záření je elektromagnetické záření, které přichází z vesmíru. Podle teorie standardního modelu vesmíru se 379 tisíc let po velkém třesku oddělilo záření od hmoty s počáteční teplotou okolo 3000 kelvinů. Nyní má maximální intenzitu na vlnové délce 1 mm.

67. Jakou má v současnosti reliktní záření teplotu?

2,725 K

68. Hubblův zákon.

Zákon všeobecné expanze vesmíru. Pozorovaná radiální rychlost galaxií v je přímo úměrná jejich vzdálenosti od pozorovatele. Hubblův zákon umožňuje určovat vzdálenosti galaxií na základě jejich červeného posuvu.

$$v = R \cdot H$$

v ... rychlost, kterou se vůči sobě pohybují galaxie

R ... vzdálenost galaxií

H ... Hubblova konstanta cca. 74 (km/s)/Mpc

Čím jsou objekty vzdálenější tím rychleji se vzdalují.

69. Jak se v současnosti vesmír rozpíná.

Podle Hubblova zákona. Platí kosmologický princip.

70. Jaký je poměr hmoty / temné hmoty / temné energie ve vesmíru?

71. Jak se v současnosti projevuje temná energie na rozpínání vesmíru?

Temná energie je zodpovědná za zrychlenou expanzi vesmíru. Temná

Název hmoty	Poměrné zastoupení
73 %	temná energie
23 %	temná hmota
3 %	atomární látka
1 %	svítící atomární látka

energie je jakési fluidum, rovnoměrně vyplňující celý Vesmír, které nejeví strukturu, její hustota se nemění s časem.