

# Podstawy astrofizyki i astronomii

Andrzej Odrzywołek

Zakład Teorii Względności i Astrofizyki, Instytut Fizyki UJ

26 lutego 2019



- astronomia jest nauką rozwiniętą już w starożytności
- początkowo dziedzina o charakterze matematyczno - obserwacyjnym (bez użycia teleskopu, trygonometria sferyczna wcześniejsza niż liczba zero)
- astrofizyka możliwa dopiero po ustaleniu prawdziwej natury ciał niebieskich (*Dialogi Galileusza*)
- kosmos to darmowe laboratorium warunków fizycznych odległych od ziemskich
- współcześnie różnice pomiędzy astronomią a astrofizyką zacierają się i mają charakter głównie społecznościowy

- 1 przygotowanie do dalszego studiowania tematu
  - terminologia, pojęcia
- 2 ogólne wykształcenie
- 3 ukazanie związków pomiędzy nami a Kosmosem (*jako w niebie tak i na Ziemi*)
- 4 poszukiwanie odpowiedzi na pytania fundamentalne:  
**pochodzenie pierwiastków, życia, początek i koniec, czy jesteśmy sami we Wszechświecie**
- 5 zjawiska astronomiczne jako test praw fizyki:  
**ekstremalne gęstości, temperatury, pola magnetyczne itd.**
- 6 eleganckie zastosowania i rachunki fizyki teoretycznej
- 7 perspektywa podboju kosmosu: dokąd się udać i po co?

- 1 astrofizyka jądrowa (*nuclear astrophysics*)
  - gwiazdy neutronowe, supernowe, ewolucja gwiazd, nukleosynteza
- 2 astrofizyka cząstek (*astroparticle physics*)
  - neutrino, ciemna materia, promieniowanie kosmiczne
  - Seminarium Astrofizyczne, WFAIS.IF-AK010.2
- 3 astrofizyka wysokich energii (*high-energy astronomy*)

Wstęp do astrofizyki wysokich energii, OA.IHEA, M. Dainotti

- aktywne jądra galaktyk (AGN)
  - pozostałości po supernowych, dyski akrecyjne, pulsary, magnetary
- 4 kosmologia, OTW (*cosmology, GR*) Ogólna teoria względności,  
WFAIS.IF-FT115.0, P. Bizoń, A. Rostworowski; Kosmologia teoretyczna, WFAIS.IF-AK002.0, E. Malec, P. Mach; Współczesna Kosmologia, OA.MK, S, Szybka
    - czarne dziury (zderzenia), fale grawitacyjne
  - 5 zagadnienie N-ciał, Wybrane zagadnienia mechaniki nieba, WFAIS.IF-AK001.0, Z.

Golda, K. Głód, F. Ficek

- **historycznie:** zaczynając od płaskiej Ziemi na grzbietach czterech słoni



- **historycznie:** zaczynając od płaskiej Ziemi na grzbietach czterech słoni

- **historycznie:** zaczynając od płaskiej Ziemi na grzbietach czterech słoni
- **fizycznie:** zaczynamy od wyłożenia i wyprowadzenia niezbędnych praw i wzorów:

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu} \text{ (r. Einsteina)}$$

$$\frac{\partial F_{\mu\nu}}{\partial\mu} = J_\nu, \quad \frac{\partial F_{\mu\nu}}{\partial\lambda} + \frac{\partial F_{\nu\lambda}}{\partial\mu} + \frac{\partial F_{\lambda\mu}}{\partial\nu} = 0 \text{ (r. Maxwella)}$$

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4}B_{\mu\nu}B^{\mu\nu} - \frac{1}{8}\text{tr}(\mathbf{W}_{\mu\nu}\mathbf{W}^{\mu\nu}) - \frac{1}{2}\text{tr}(\mathbf{G}_{\mu\nu}\mathbf{G}^{\mu\nu}) \\ + \dots \text{ (Model Standardowy)}$$

$$Z = \frac{1}{h^3} \int e^{-\beta H(q,p)} d^3q d^3p, \quad \beta = \frac{1}{kT} \text{ (termodynamika)}$$

- **historycznie:** zaczynając od płaskiej Ziemi na grzbietach czterech słoni
- **fizycznie:** zaczynamy od wyłożenia i wyprowadzenia niezbędnych praw i wzorów



- **historycznie:** ~~zaczynając od płaskiej Ziemi na grzbietach czterech słoni~~
- **fizycznie:** ~~zaczynamy od wyłożenia i wyprowadzenia niezbędnych praw i wzorów~~
- **metodą Chandrasekhara:** wykładam to co aktualnie badam, nie zwracając uwagi na nazwę przedmiotu i jego program

- **historycznie:** ~~zaczynając od płaskiej Ziemi na grzbietach czterech słoni~~
- **fizycznie:** ~~zaczynamy od wyłożenia i wyprowadzenia niezbędnych praw i wzorów~~
- **metodą Chandrasekhara:** ~~wykładam to co aktualnie badam, nie zwracając uwagi na nazwę przedmiotu i jego program~~

- **historycznie:** zaczynając od płaskiej Ziemi na grzbietach czterech słoni
- **fizycznie:** zaczynamy od wyłożenia i wyprowadzenia niezbędnych praw i wzorów
- **metodą Chandrasekhara:** wykładam to co aktualnie badam, nie zwracając uwagi na nazwę przedmiotu i jego program
- **obserwacyjnie/sprzętowo:** omawiamy budowę teleskopów, kamer CCD, detektorów neutrin, promieniowania kosmicznego itd. i co można dzięki nim się dowiedzieć

- **historycznie:** ~~zaczynając od płaskiej Ziemi na grzbietach czterech słoni~~
- **fizycznie:** ~~zaczynamy od wyłożenia i wyprowadzenia niezbędnych praw i wzorów~~
- **metodą Chandrasekhara:** ~~wykładam to co aktualnie badam, nie zwracając uwagi na nazwę przedmiotu i jego program~~
- **obserwacyjnie/sprzętowo:** ~~omawiamy budowę teleskopów, kamer CCD, detektorów neutrin, promieniowania kosmicznego itd. i co można dzięki nim się dowiedzieć~~

- **historycznie:** ~~zaczynając od płaskiej Ziemi na grzbietach czterech słoni~~
- **fizycznie:** ~~zaczynamy od wyłożenia i wyprowadzenia niezbędnych praw i wzorów~~
- **metodą Chandrasekhara:** wykładam to co aktualnie badam, nie zwracając uwagi na nazwę przedmiotu i jego program
- **obserwacyjnie/sprzętowo:** omawiamy budowę teleskopów, kamer CCD, detektorów neutrin, promieniowania kosmicznego itd. i co można dzięki nim się dowiedzieć
- **geometrycznie:** zaczynamy od obiektów najbliższych (Ziemia, Układ Słoneczny) , poprzez gwiazdy, gromady kuliste, galaktyki, gromady galaktyk i pustki, a kończymy na Wszechświecie jako całości

- **historycznie:** ~~zaczynając od płaskiej Ziemi na grzbietach czterech słoni~~
- **fizycznie:** ~~zaczynamy od wyłożenia i wyprowadzenia niezbędnych praw i wzorów~~
- **metodą Chandrasekhara:** ~~wykładam to co aktualnie badam, nie zwracając uwagi na nazwę przedmiotu i jego program~~
- **obserwacyjnie/sprzętowo:** ~~omawiamy budowę teleskopów, kamer CCD, detektorów neutrin, promieniowania kosmicznego itd. i co można dzięki nim się dowiedzieć~~
- **geometrycznie:** ~~zaczynamy na Wszechświecie jako całości, poprzez gromady galaktyk i pustki, galaktyki, gromady kuliste, gwiazdy, układy planetarne, Układ Słoneczny a kończymy w systemie Ziemia-Księżyc~~

- **historycznie:** zaczynając od płaskiej Ziemi na grzbietach czterech słoni
- **fizycznie:** zaczynamy od wyłożenia i wyprowadzenia niezbędnych praw i wzorów
- **metodą Chandrasekhara:** wykładam to co aktualnie badam, nie zwracając uwagi na nazwę przedmiotu i jego program
- **obserwacyjnie/sprzętowo:** omawiamy budowę teleskopów, kamer CCD, detektorów neutrin, promieniowania kosmicznego itd. i co można dzięki nim się dowiedzieć
- **geometrycznie:** zaczynamy na Wszechświecie jako całości, poprzez gromady galaktyk i pustki, galaktyki, gromady kuliste, gwiazdy, układy planetarne, Układ Słoneczny a kończymy w systemie Ziemia-Księżyc
- **chronologicznie:** zgodnie z ewolucją Wszechświata: od Wielkiego Wybuchu do dziś

- 1 Jerzy Kreiner, *Astronomia z astrofizyką*, PWN, 1996
- 2 Mini seria „ASTROFIZYKA”:
  - Tom I, Michał Jaroszyński, *Galaktyki i budowa Wszechświata*,
  - Tom II, Marcin Kubiak, *Gwiazdy i materia międzygwiazdowa*
  - Tom III, Paweł Artymowicz, *Astrofizyka układów planetarnych*



- Tjeerd H. van Andel, Nowe spojrzenie na starą planetę, PWN, 2013
- Michał Różyczka, Jak powstają gwiazdy?, Alfa, 1990
- Stephen Hawking, Krótka historia czasu, Alfa, 1990
- Rudolf Kippenhahn, Na tropie tajemnic Słońca, Prószyński, 1997
- Steven Weinberg, Pierwsze trzy minuty, Prószyński, 1998
- Frank Drake, Dava Sobel, Czy jest tam kto?, Prószyński, 1995
- Richard Panek, Ciemna strona Wszechświata, Prószyński, 2011
- Arthur Koestler, Lunatycy, 2002, Zysk i S-ka
- Arthur I. Miller, Imperium gwiazd

Lista pozycji uzupełniających, o znaczeniu historycznym lub znacznie przestarzałych, ale ciągle wartych przeczytania:

- Mikołaj Kopernik, O obrotach ciał niebieskich
- Galileusz, Dialog o dwu najważniejszych układach świata: ptolemeuszowym i kopernikowym
- Isaac Asimov, Wybuchające gwiazdy. Sekrety supernowych.

Zaliczenie będzie polegało na wcześniejszym przygotowaniu pisemnych odpowiedzi na 1-3 zadanych pytań z listy poniżej, a następnie ich ustnej „obrony”.

- 1 pytanie – dst
- 2 pytania – db
- 3 pytania – bdb

# Historia Wszechświata

Na początku był Wielki Wybuch (ang. Big Bang) ...

# Skąd wiemy, że nastąpił Wielki Wybuch?

Podstawą są następujące fakty obserwacyjne:

- 1 przesunięcie ku czerwieni światła  $z$ , przeliczone poprzez efekt Dopplera na prędkość ucieczki  $v = cz$  daje prawo Hubble'a, poprawne dla  $z \ll 1$

$$\vec{v} = H_0 \vec{r},$$

- 2 wiek obiektów (Układ Słoneczny, gwiazdy, gromady kuliste) jest skończony, maksymalnie kilkanaście miliardów lat
- 3 mikrofalowe promieniowanie tła oraz ilość wodoru i helu wskazują na wysokie temperatury w przeszłości
- 4 własności obserwowanego Wszechświata nie zależą od kierunku obserwacji
- 5 paradoks Olbersa

Do tego należy dodać założenia:

- zasada Kopernikańska (losowa, niewyróżniona, pozycja Ziemi we Wszechświecie)
- w przybliżeniu równomierny rozkład materii i promieniowania w „wielkiej skali”

oraz brak matematycznie stabilnych, statycznych rozwiązań.

# 0. Wielki wybuch

- Klasyczne (w odróżnieniu od kwantowych!) modele kosmologiczne przewidują **osobliwość** dla  $t = 0$ , czyli stan w którym:
  - gęstość,
  - temperatura,
  - krzywizna przestrzeni,
  - stała Hubble'a ...dążą do nieskończoności.
- **Warunki początkowe** są nieznane, ale powszechnie przyjmuje się, że parametry takie jak:
  - liczba barionowa, liczba leptonowa,
  - ładunek elektryczny,
  - moment pędu,
  - niejednorodności
  - entropia (!?)znikają (są równe zero).

# 1. Era Plancka

## Era „kwantowej grawitacji”

Za pomocą analizy wymiarowej można utworzyć *jednostki Plancka*, których wartości często podaje się jako panujące „na początku” Wielkiego Wybuchu.

$$t_{Pl} = \sqrt{\frac{hG}{c^5}} = 1.4 \times 10^{-43} \text{ s}, \quad m_{Pl} = \sqrt{\frac{hc}{G}},$$

$$\rho_{Pl} = \frac{c^5}{hG^2} = 10^{96} \text{ kg/m}^3, \quad d_{Pl} = \sqrt{\frac{hG}{c^3}} = 4 \times 10^{-35} \text{ m}$$

$$E_{Pl} \equiv kT_{Pl} = \sqrt{\frac{hc^5}{G}} = 3 \times 10^{19} \text{ GeV.}$$

## Długość Plancka a stała kosmologiczna

- 1 Stała kosmologiczna  $\Lambda \simeq 2 \times 10^{-52} \frac{1}{\text{m}^2}$ .
- 2  $\Lambda$  wyznacza pewną skalę odległości  $d_\Lambda = \frac{1}{\sqrt{\Lambda}} \simeq 10^{26} \text{ m}$  (około 10 mld lat świetlnych, rzędu „rozmiaru” Wszechświata)

3

$$\frac{d_\Lambda}{d_{\text{Planck}}} \simeq 2 \times 10^{60}$$



## Znany i poznawalny Wszechświat

- długość Plancka  $\sim 10^{-35}$  m
- horyzont kosmologiczny  $\sim 10^{27}$  m
- różnica skali  $10^{62}$

Zoom przez znany Wszechświat (American Museum of Natural History)

<http://htwins.net/scale2/>

<http://htwins.net/scale/>

## Zbiór Mandelbrota

- osiągalna dziś różnica skali ponad  $10^{1000}$

Mandelbrot zoom  $10^{1006}$

Mandelbrot zoom  $10^{227}$