

# ФУНДАМЕНТАЛЬНІ ВЗАЄМОДІЇ ТА НОВА ФІЗИКА

Павло Наказной  
*Pavel.Nakaznoy@gmail.com*

Фізико-технічний інститут НТУУ "КПІ"

напрям "прикладна фізика"  
спецкурс "вступ до спеціальності"  
25.02.2015 р.



# ЕПІГРАФ

Никто не обнимет необъятное  
К.Прутков



# ПОНЯТТЯ ВЗАЄМОДІЇ



# ПОНЯТТЯ ВЗАЄМОДІЇ

- Фізика — наука про структуру матерії та її рух



# ПОНЯТТЯ ВЗАЄМОДІЇ

- Фізика — наука про структуру матерії та її рух
- Рух тіл відбувається внаслідок взаємодії



# ПОНЯТТЯ ВЗАЄМОДІЇ

- Фізика — наука про структуру матерії та її рух
- Рух тіл відбувається внаслідок взаємодії
- Задача фізики — описати взаємодії!



# ПОНЯТТЯ ВЗАЄМОДІЇ

- Фізика — наука про структуру матерії та її рух
- Рух тіл відбувається внаслідок взаємодії
- Задача фізики — описати взаємодії!
- Всі взаємодії можуть бути зведені до декількох (фундаментальних):



# ПОНЯТТЯ ВЗАЄМОДІЇ

- Фізика — наука про структуру матерії та її рух
- Рух тіл відбувається внаслідок взаємодії
- Задача фізики — описати взаємодії!
- Всі взаємодії можуть бути зведені до декількох (фундаментальних):
  - Гравітаційна взаємодія





# ПОНЯТТЯ ВЗАЄМОДІЇ

- Фізика — наука про структуру матерії та її рух
- Рух тіл відбувається внаслідок взаємодії
- Задача фізики — описати взаємодії!
- Всі взаємодії можуть бути зведені до декількох (фундаментальних):
  - Гравітаційна взаємодія — забезпечує існування мегасвіту та пов'язує з ним макроскопічні тіла



# ПОНЯТТЯ ВЗАЄМОДІЇ

- Фізика — наука про структуру матерії та її рух
- Рух тіл відбувається внаслідок взаємодії
- Задача фізики — описати взаємодії!
- Всі взаємодії можуть бути зведені до декількох (фундаментальних):
  - Гравітаційна взаємодія — забезпечує існування мегасвіту та пов'язує з ним макроскопічні тіла
  - Електромагнітна взаємодія



# ПОНЯТТЯ ВЗАЄМОДІЇ

- Фізика — наука про структуру матерії та її рух
- Рух тіл відбувається внаслідок взаємодії
- Задача фізики — описати взаємодії!
- Всі взаємодії можуть бути зведені до декількох (фундаментальних):
  - Гравітаційна взаємодія — забезпечує існування мегасвіту та пов'язує з ним макроскопічні тіла
  - Електромагнітна взаємодія — забезпечує існування атомів та молекул



# ПОНЯТТЯ ВЗАЄМОДІЇ

- Фізика — наука про структуру матерії та її рух
- Рух тіл відбувається внаслідок взаємодії
- Задача фізики — описати взаємодії!
- Всі взаємодії можуть бути зведені до декількох (фундаментальних):
  - Гравітаційна взаємодія — забезпечує існування мегасвіту та пов'язує з ним макроскопічні тіла
  - Електромагнітна взаємодія — забезпечує існування атомів та молекул
  - Сильна взаємодія



# ПОНЯТТЯ ВЗАЄМОДІЇ

- Фізика — наука про структуру матерії та її рух
- Рух тіл відбувається внаслідок взаємодії
- Задача фізики — описати взаємодії!
- Всі взаємодії можуть бути зведені до декількох (фундаментальних):
  - Гравітаційна взаємодія — забезпечує існування мегасвіту та пов'язує з ним макроскопічні тіла
  - Електромагнітна взаємодія — забезпечує існування атомів та молекул
  - Сильна взаємодія — забезпечує наявність хімічних елементів



# ПОНЯТТЯ ВЗАЄМОДІЇ

- Фізика — наука про структуру матерії та її рух
- Рух тіл відбувається внаслідок взаємодії
- Задача фізики — описати взаємодії!
- Всі взаємодії можуть бути зведені до декількох (фундаментальних):
  - Гравітаційна взаємодія — забезпечує існування мегасвіту та пов'язує з ним макроскопічні тіла
  - Електромагнітна взаємодія — забезпечує існування атомів та молекул
  - Сильна взаємодія — забезпечує наявність хімічних елементів
  - Слабка взаємодія



# ПОНЯТТЯ ВЗАЄМОДІЇ

- Фізика — наука про структуру матерії та її рух
- Рух тіл відбувається внаслідок взаємодії
- Задача фізики — описати взаємодії!
- Всі взаємодії можуть бути зведені до декількох (фундаментальних):
  - Гравітаційна взаємодія — забезпечує існування мегасвіту та пов'язує з ним макроскопічні тіла
  - Електромагнітна взаємодія — забезпечує існування атомів та молекул
  - Сильна взаємодія — забезпечує наявність хімічних елементів
  - Слабка взаємодія — забезпечує горіння зірок, яке є джерелом енергії та забезпечило створення хімічних елементів під час еволюції Всесвіту



# ПОНЯТТЯ ВЗАЄМОДІЇ

- Фізика — наука про структуру матерії та її рух
- Рух тіл відбувається внаслідок взаємодії
- Задача фізики — описати взаємодії!
- Всі взаємодії можуть бути зведені до декількох (фундаментальних):
  - Гравітаційна взаємодія — забезпечує існування мегасвіту та пов'язує з ним макроскопічні тіла
  - Електромагнітна взаємодія — забезпечує існування атомів та молекул
  - Сильна взаємодія — забезпечує наявність хімічних елементів
  - Слабка взаємодія — забезпечує горіння зірок, яке є джерелом енергії та забезпечило створення хімічних елементів під час еволюції Всесвіту
  - Всі фундаментальні взаємодії необхідні для існування сучасного Всесвіту, жодну неможна "вимкнути"!





# КУБ ТЕОРІЙ

- Засобом вивчення (мовою опису) фундаментальних взаємодій є їх опис за допомогою основних (фундаментальних) теорій:



# КУБ ТЕОРІЙ

- Засобом вивчення (мовою опису) фундаментальних взаємодій є їх опис за допомогою основних (фундаментальних) теорій:
- Класична механіка Ньютона



# КУБ ТЕОРІЙ

- Засобом вивчення (мовою опису) фундаментальних взаємодій є їх опис за допомогою основних (фундаментальних) теорій:
- Класична механіка Ньютона (принцип відносності та закон гравітації Ньютона)



# КУБ ТЕОРІЙ

- Засобом вивчення (мовою опису) фундаментальних взаємодій є їх опис за допомогою основних (фундаментальних) теорій:
- Класична механіка Ньютона (принцип відносності та закон гравітації Ньютона)
- Теорія відносності Айнштейна



# КУБ ТЕОРІЙ

- Засобом вивчення (мовою опису) фундаментальних взаємодій є їх опис за допомогою основних (фундаментальних) теорій:
- Класична механіка Ньютона (принцип відносності та закон гравітації Ньютона)
- Теорія відносності Айнштейна (принцип відносності Айнштейна та принцип еквівалентності)



# КУБ ТЕОРІЙ

- Засобом вивчення (мовою опису) фундаментальних взаємодій є їх опис за допомогою основних (фундаментальних) теорій:
- Класична механіка Ньютона (принцип відносності та закон гравітації Ньютона)
- Теорія відносності Айнштейна (принцип відносності Айнштейна та принцип еквівалентності)
- Квантова механіка



# КУБ ТЕОРІЙ

- Засобом вивчення (мовою опису) фундаментальних взаємодій є їх опис за допомогою основних (фундаментальних) теорій:
- Класична механіка Ньютона (принцип відносності та закон гравітації Ньютона)
- Теорія відносності Айнштейна (принцип відносності Айнштейна та принцип еквівалентності)
- Квантова механіка (корпускулярно-хвильовий дуалізм)



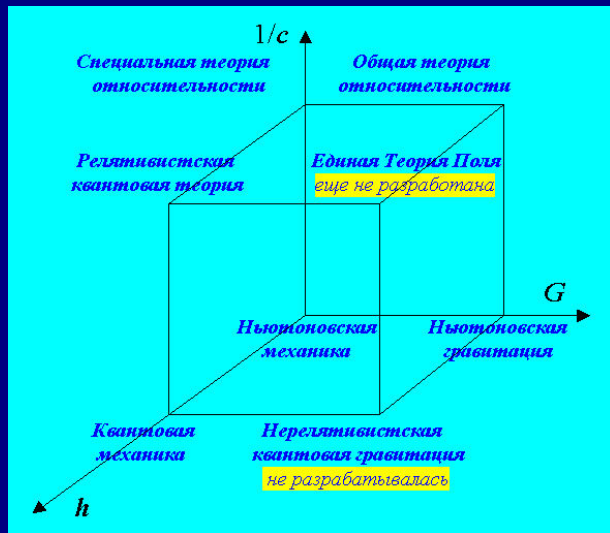
# КУБ ТЕОРІЙ

- Засобом вивчення (мовою опису) фундаментальних взаємодій є їх опис за допомогою основних (фундаментальних) теорій:
- Класична механіка Ньютона (принцип відносності та закон гравітації Ньютона)
- Теорія відносності Айнштейна (принцип відносності Айнштейна та принцип еквівалентності)
- Квантова механіка (корпускулярно-хвильовий дуалізм)
- Вказані теорії можуть поєднуватись для опису конкретних задач

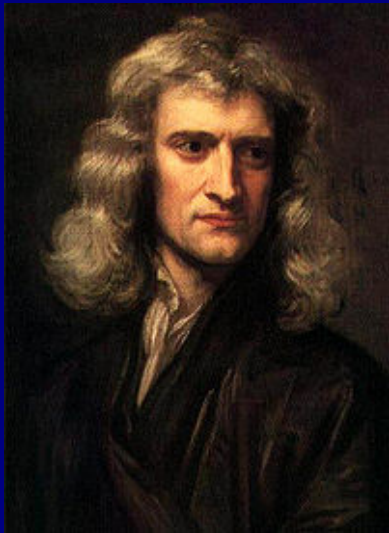




# КУБ ТЕОРИЙ



# ТЕОРІЯ НЬЮТОНА: ТРИУМФ ТА ПОРАЗКА



# ТЕОРІЯ НЬЮТОНА: ТРИУМФ ТА ПОРАЗКА

- 1687 — "Математичні начала натуральної філософії"



# ТЕОРІЯ НЬЮТОНА: ТРИУМФ ТА ПОРАЗКА

- 1687 — "Математичні начала натуральної філософії"
- Простір та час абсолютні: часові та просторові проміжки не залежать від спостерігача



# ТЕОРІЯ НЬЮТОНА: ТРИУМФ ТА ПОРАЗКА

- 1687 — "Математичні начала натуральної філософії"
- Простір та час абсолютні: часові та просторові проміжки не залежать від спостерігача
- Принцип дальності

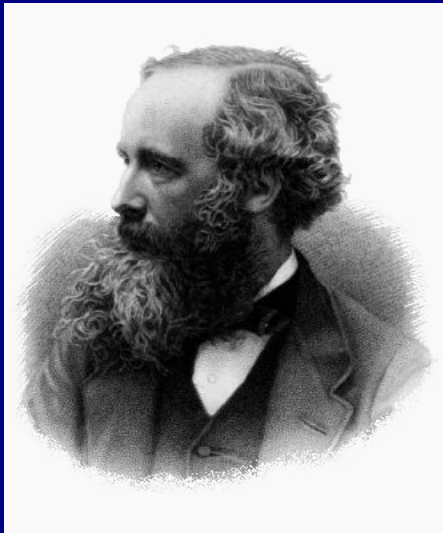


# ТЕОРІЯ НЬЮТОНА: ТРИУМФ ТА ПОРАЗКА

- 1687 — "Математичні начала натуральної філософії"
- Простір та час абсолютні: часові та просторові проміжки не залежать від спостерігача
- Принцип дальності
- 200 років триумфу!



# ТЕОРІЯ НЬЮТОНА: ТРИУМФ ТА ПОРАЗКА



# ТЕОРІЯ НЬЮТОНА: ТРИУМФ ТА ПОРАЗКА

- 1687 — "Математичні начала натуральної філософії"
- Простір та час абсолютні: часові та просторові проміжки не залежать від спостерігача
- Принцип дальності
- 200 років триумфу!
- 1864 — "Динамічна теорія електромагнітного поля" (Максвелл). Початок проблем





# ТЕОРІЯ НЬЮТОНА: ТРИУМФ ТА ПОРАЗКА

- 1687 — "Математичні начала натуральної філософії"
- Простір та час абсолютні: часові та просторові проміжки не залежать від спостерігача
- Принцип дальності
- 200 років триумфу!
- 1864 — "Динамічна теорія електромагнітного поля" (Максвелл). Початок проблем

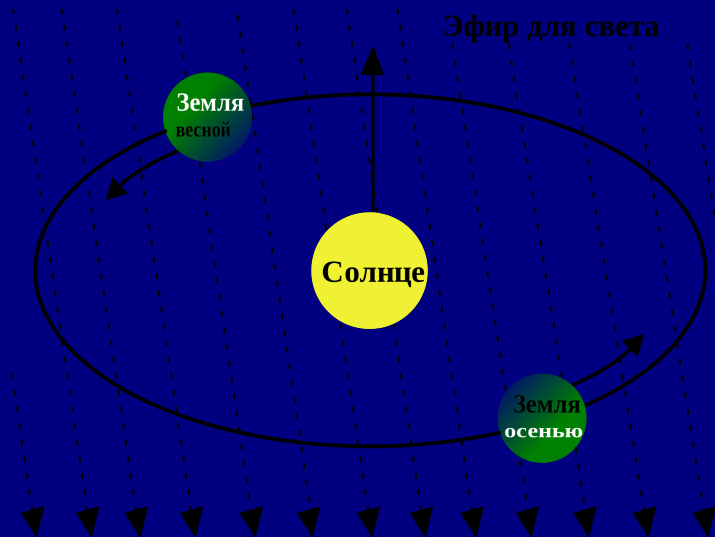


# ТЕОРІЯ НЬЮТОНА: ТРИУМФ ТА ПОРАЗКА

- 1687 — "Математичні начала натуральної філософії"
- Простір та час абсолютні: часові та просторові проміжки не залежать від спостерігача
- Принцип дальності
- 200 років триумфу!
- 1864 — "Динамічна теорія електромагнітного поля" (Максвелл). Початок проблем
- Рівняння електромагнітного поля не задовольняють принципу відносності Ньютона



# ТЕОРІЯ НЬЮТОНА: ТРИУМФ ТА ПОРАЗКА

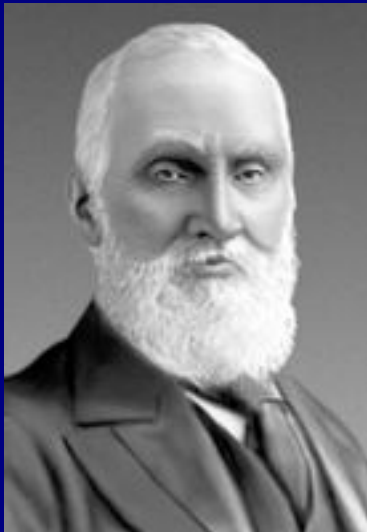


# ТЕОРІЯ НЬЮТОНА: ТРИУМФ ТА ПОРАЗКА

- 1687 — "Математичні начала натуральної філософії"
- Простір та час абсолютні: часові та просторові проміжки не залежать від спостерігача
- Принцип дальності
- 200 років триумфу!
- 1864 — "Динамічна теорія електромагнітного поля" (Максвелл). Початок проблем
- Рівняння електромагнітного поля не задовольняють принципу відносності Ньютона
- 1881 — 1887 — Швидкість світла (збурення ефіру) не залежить від швидкості спостерігача (Майкельсон, Морлі)



# АНЕКДОТ ВІД КЕЛЬВІНА



# АНЕКДОТ ВІД КЕЛЬВІНА

- 1900 — Лорд Кельвін: дві хмаринки у сучасній фізиці



# АНЕКДОТ ВІД КЕЛЬВІНА

- 1900 — Лорд Кельвін: дві хмаринки у сучасній фізиці
  - Труднощі з розумінням випромінювання чорного тіла



# АНЕКДОТ ВІД КЕЛЬВІНА

- 1900 — Лорд Кельвін: дві хмаринки у сучасній фізиці
  - Труднощі з розумінням випромінювання чорного тіла
    - "дощик" — квантова теорія





# АНЕКДОТ ВІД КЕЛЬВІНА

- 1900 — Лорд Кельвін: дві хмаринки у сучасній фізиці
  - Труднощі з розумінням випромінювання чорного тіла
    - "дощик" — квантова теорія
  - Труднощі з описом руху Землі скрізь ефір



# АНЕКДОТ ВІД КЕЛЬВІНА

- 1900 — Лорд Кельвін: дві хмаринки у сучасній фізиці
  - Труднощі з розумінням випромінювання чорного тіла
    - "дощик" — квантова теорія
  - Труднощі з описом руху Землі скрізь ефір
    - "дощик" — спеціальна теорія відносності



# ЧИ МОЖНА ВВАЖАТИ ПРОСТІР ТА ЧАС АБСОЛЮТНИМИ?



# ЧИ МОЖНА ВВАЖАТИ ПРОСТІР ТА ЧАС АБСОЛЮТНИМИ?

- Вимірювати координати можна лише відносно чогось, час — це те що, показує годинник



# ЧИ МОЖНА ВВАЖАТИ ПРОСТІР ТА ЧАС АБСОЛЮТНИМИ?

- Вимірювати координати можна лише відносно чогось, час — це те що, показує годинник
- Вакуум не може бути системою відліку



# ЧИ МОЖНА ВВАЖАТИ ПРОСТІР ТА ЧАС АБСОЛЮТНИМИ?

- Вимірювати координати можна лише відносно чогось, час — це те що, показує годинник
- Вакуум не може бути системою відліку
- Айнштайн: "Ефір <вакуум> неможна уявити як такий, що складається з частин, за якими можна слідкувати в часі; такою властивістю володіє лише вагома матерія; також до нього не можна застосовувати поняття руху"



# ЧИ МОЖНА ВВАЖАТИ ПРОСТІР ТА ЧАС АБСОЛЮТНИМИ?

- Вимірювати координати можна лише відносно чогось, час — це те що, показує годинник
- Вакуум не може бути системою відліку
- Айнштайн: "Ефір <вакуум> неможна уявити як такий, що складається з частин, за якими можна слідкувати в часі; такою властивістю володіє лише вагома матерія; також до нього не можна застосовувати поняття руху"
- Швидкість світла у вакуумі повинна бути константою, або ефіру не існує!



# ЗАГАЛЬНА ТЕОРІЯ ВІДНОСНОСТІ

- Ньютонівська теорія гравітації не задовільняє принципу відносності (гравітацію не можна вимкнути)



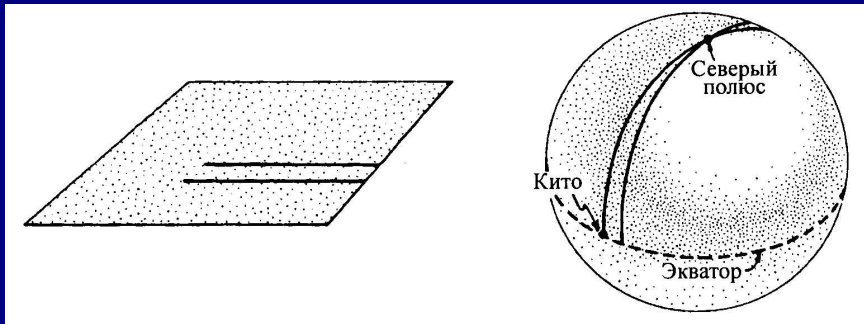


# ЗАГАЛЬНА ТЕОРІЯ ВІДНОСНОСТІ

- Ньютонівська теорія гравітації не задовільняє принципу відносності (гравітацію не можна вимкнути)
- Рух у викривленому просторі



# ЗАГАЛЬНА ТЕОРІЯ ВІДНОСНОСТІ



# ЗАГАЛЬНА ТЕОРІЯ ВІДНОСНОСТІ

- Ньютонівська теорія гравітації не задовільняє принципу відносності (гравітацію не можна вимкнути)
- Рух у викривленому просторі
- Принцип еквівалентності Айнштейна: викривлення простору-часу локально еквівалентно наявності деякого силового поля (гравітаційного)



# ЗАГАЛЬНА ТЕОРІЯ ВІДНОСНОСТІ

- Ньютонівська теорія гравітації не задовільняє принципу відносності (гравітацію не можна вимкнути)
- Рух у викривленому просторі
- Принцип еквівалентності Айнштейна: викривлення простору-часу локально еквівалентно наявності деякого силового поля (гравітаційного)
- Загальна теорія відносності — теорія викривленого простору-часу, що є локально плоским



# ЗАГАЛЬНА ТЕОРІЯ ВІДНОСНОСТІ

- Ньютонівська теорія гравітації не задовільняє принципу відносності (гравітацію не можна вимкнути)
- Рух у викривленому просторі
- Принцип еквівалентності Айнштейна: викривлення простору-часу локально еквівалентно наявності деякого силового поля (гравітаційного)
- Загальна теорія відносності — теорія викривленого простору-часу, що є локально плоским (інерціальним)



# ЗАГАЛЬНА ТЕОРІЯ ВІДНОСНОСТІ

- Ньютонівська теорія гравітації не задовільняє принципу відносності (гравітацію не можна вимкнути)
- Рух у викривленому просторі
- Принцип еквівалентності Айнштейна: викривлення простору-часу локально еквівалентно наявності деякого силового поля (гравітаційного)
- Загальна теорія відносності — теорія викривленого простору-часу, що є локально плоским (інерціальним)
- Простір-час - ріманів многовид



# ЗАГАЛЬНА ТЕОРІЯ ВІДНОСНОСТІ

- Ньютонівська теорія гравітації не задовільняє принципу відносності (гравітацію не можна вимкнути)
- Рух у викривленому просторі
- Принцип еквівалентності Айнштейна: викривлення простору-часу локально еквівалентно наявності деякого силового поля (гравітаційного)
- Загальна теорія відносності — теорія викривленого простору-часу, що є локально плоским (інерціальним)
- Простір-час - ріманів многовид
- $g_{\mu\nu}$  — метрика простору-часу



# ЗАГАЛЬНА ТЕОРІЯ ВІДНОСНОСТІ

- Ньютонівська теорія гравітації не задовільняє принципу відносності (гравітацію не можна вимкнути)
- Рух у викривленому просторі
- Принцип еквівалентності Айнштейна: викривлення простору-часу локально еквівалентно наявності деякого силового поля (гравітаційного)
- Загальна теорія відносності — теорія викривленого простору-часу, що є локально плоским (інерціальним)
- Простір-час - ріманів многовид
- $g_{\mu\nu}$  — метрика простору-часу:  $ds^2 = g_{\mu\nu}dx^\mu dx^\nu$





# ЗАГАЛЬНА ТЕОРІЯ ВІДНОСНОСТІ

- Ньютонівська теорія гравітації не задовільняє принципу відносності (гравітацію не можна вимкнути)
- Рух у викривленому просторі
- Принцип еквівалентності Айнштейна: викривлення простору-часу локально еквівалентно наявності деякого силового поля (гравітаційного)
- Загальна теорія відносності — теорія викривленого простору-часу, що є локально плоским (інерціальним)
- Простір-час - ріманів многовид
- $g_{\mu\nu}$  — метрика простору-часу:  $ds^2 = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu$
- Рівняння Айнштейна  $R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}R g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu}$



# ЗАГАЛЬНА ТЕОРІЯ ВІДНОСНОСТІ

- Ньютонівська теорія гравітації не задовільняє принципу відносності (гравітацію не можна вимкнути)
- Рух у викривленому просторі
- Принцип еквівалентності Айнштейна: викривлення простору-часу локально еквівалентно наявності деякого силового поля (гравітаційного)
- Загальна теорія відносності — теорія викривленого простору-часу, що є локально плоским (інерціальним)
- Простір-час - ріманів многовид
- $g_{\mu\nu}$  — метрика простору-часу:  $ds^2 = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu$
- Рівняння Айнштейна  $R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}R g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu}$
- Айнштейн: "Речовина вказує простору як сгинатись, простір вказує речовині як рухатись"



# ЗАГАЛЬНА ТЕОРІЯ ВІДНОСНОСТІ

- Ньютонівська теорія гравітації не задовільняє принципу відносності (гравітацію не можна вимкнути)
- Рух у викривленому просторі
- Принцип еквівалентності Айнштейна: викривлення простору-часу локально еквівалентно наявності деякого силового поля (гравітаційного)
- Загальна теорія відносності — теорія викривленого простору-часу, що є локально плоским (інерціальним)
- Простір-час - ріманів многовид
- $g_{\mu\nu}$  — метрика простору-часу:  $ds^2 = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu$
- Рівняння Айнштейна  $R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu}$
- Айнштейн: "Речовина вказує простору як сгинатись, простір вказує речовині як рухатись"
- Рівняння гравітаційного поля — істотно нелінійні диференціальні рівняння у частинних похідних!



# СПОСТЕРЕЖЕННЯ ЕФЕКТІВ ЗТВ

- Деякі класичні ефекти ЗТВ (прямі спостереження):



# СПОСТЕРЕЖЕННЯ ЕФЕКТІВ ЗТВ

- Деякі класичні ефекти ЗТВ (прямі спостереження):
  - Гравітаційне червоне зміщення



# СПОСТЕРЕЖЕННЯ ЕФЕКТІВ ЗТВ



# СПОСТЕРЕЖЕННЯ ЕФЕКТІВ ЗТВ

- Деякі класичні ефекти ЗТВ (прямі спостереження):
  - Гравітаційне червоне зміщення
  - Прецесія перигелію Меркурія ( $\Delta\varphi = 43''$  — аномальний зсув перигелію за 100 років, або  $\sim 0,1''$  за оберт)

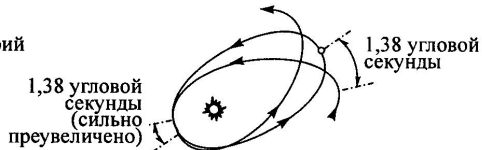


# СПОСТЕРЕЖЕННЯ ЕФЕКТІВ ЗТВ

ОРБИТА МЕРКУРИЯ ПО КЕПЛЕРУ



РЕАЛЬНАЯ ОРБИТА МЕРКУРИЯ



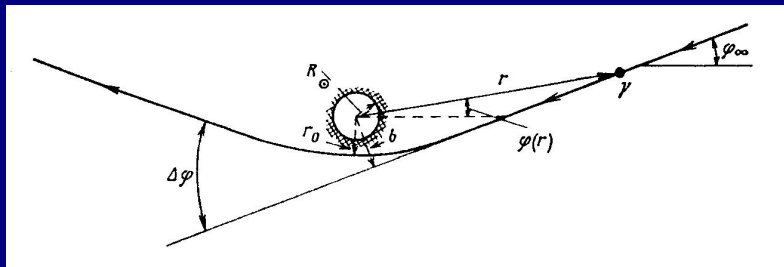


# СПОСТЕРЕЖЕННЯ ЕФЕКТІВ ЗТВ

- Деякі класичні ефекти ЗТВ (прямі спостереження):
  - Гравітаційне червоне зміщення
  - Прецесія перигелію Меркурія ( $\Delta\varphi = 43''$  — аномальний зсув перигелію за 100 років, або  $\sim 0,1''$  за оберт)
  - Відхилення променів світла у полі Сонця (передбачення Айнштейна  $\Delta\varphi = \frac{2r_g}{\rho}$ ,  $r_g = \frac{2GM}{c^2}$ , для Сонця  $\Delta\varphi = 1.75''$ )



# СПОСТЕРЕЖЕННЯ ЕФЕКТІВ ЗТВ



# СПОСТЕРЕЖЕННЯ ЕФЕКТІВ ЗТВ

- Деякі класичні ефекти ЗТВ (прямі спостереження):
  - Гравітаційне червоне зміщення
  - Прецесія перигелію Меркурія ( $\Delta\varphi = 43''$  — аномальний зсув перигелію за 100 років, або  $\sim 0,1''$  за оберт)
  - Відхилення променів світла у полі Сонця (передбачення Айнштейна  $\Delta\varphi = \frac{2r_g}{\rho}$ ,  $r_g = \frac{2GM}{c^2}$ , для Сонця  $\Delta\varphi = 1.75''$ )
- Непрямі спостереження



# СПОСТЕРЕЖЕННЯ ЕФЕКТІВ ЗТВ

- Деякі класичні ефекти ЗТВ (прямі спостереження):
  - Гравітаційне червоне зміщення
  - Прецесія перигелію Меркурія ( $\Delta\varphi = 43''$  — аномальний зсув перигелію за 100 років, або  $\sim 0,1''$  за оберт)
  - Відхилення променів світла у полі Сонця (передбачення Айнштейна  $\Delta\varphi = \frac{2r_g}{\rho}$ ,  $r_g = \frac{2GM}{c^2}$ , для Сонця  $\Delta\varphi = 1.75''$ )
- Непрямі спостереження
  - Чорні дірки



# СПОСТЕРЕЖЕННЯ ЕФЕКТІВ ЗТВ

- Деякі класичні ефекти ЗТВ (прямі спостереження):
  - Гравітаційне червоне зміщення
  - Прецесія перигелію Меркурія ( $\Delta\varphi = 43''$  — аномальний зсув перигелію за 100 років, або  $\sim 0,1''$  за оберт)
  - Відхилення променів світла у полі Сонця (передбачення Айнштейна  $\Delta\varphi = \frac{2r_g}{\rho}$ ,  $r_g = \frac{2GM}{c^2}$ , для Сонця  $\Delta\varphi = 1.75''$ )
- Непрямі спостереження
  - Чорні дірки
  - Гравітаційні лінзи



# СПОСТЕРЕЖЕННЯ ЕФЕКТІВ ЗТВ



# СПОСТЕРЕЖЕННЯ ЕФЕКТІВ ЗТВ

- Деякі класичні ефекти ЗТВ (прямі спостереження):
  - Гравітаційне червоне зміщення
  - Прецесія перигелію Меркурія ( $\Delta\varphi = 43''$  — аномальний зсув перигелію за 100 років, або  $\sim 0,1''$  за оберт)
  - Відхилення променів світла у полі Сонця (передбачення Айнштейна  $\Delta\varphi = \frac{2r_g}{\rho}$ ,  $r_g = \frac{2GM}{c^2}$ , для Сонця  $\Delta\varphi = 1.75''$ )
- Непрямі спостереження
  - Чорні дірки
  - Гравітаційні лінзи
  - Гравітаційні хвилі



# СПОСТЕРЕЖЕННЯ ЕФЕКТІВ ЗТВ

- Деякі класичні ефекти ЗТВ (прямі спостереження):
  - Гравітаційне червоне зміщення
  - Прецесія перигелію Меркурія ( $\Delta\varphi = 43''$  — аномальний зсув перигелію за 100 років, або  $\sim 0,1''$  за оберт)
  - Відхилення променів світла у полі Сонця (передбачення Айнштейна  $\Delta\varphi = \frac{2r_g}{\rho}$ ,  $r_g = \frac{2GM}{c^2}$ , для Сонця  $\Delta\varphi = 1.75''$ )
- Непрямі спостереження
  - Чорні дірки
  - Гравітаційні лінзи
  - Гравітаційні хвилі
  - Будова зірок, нейтронні зірки





# СПОСТЕРЕЖЕННЯ ЕФЕКТІВ ЗТВ

- Деякі класичні ефекти ЗТВ (прямі спостереження):
  - Гравітаційне червоне зміщення
  - Прецесія перигелію Меркурія ( $\Delta\varphi = 43''$  — аномальний зсув перигелію за 100 років, або  $\sim 0,1''$  за оберт)
  - Відхилення променів світла у полі Сонця (передбачення Айнштейна  $\Delta\varphi = \frac{2r_g}{\rho}$ ,  $r_g = \frac{2GM}{c^2}$ , для Сонця  $\Delta\varphi = 1.75''$ )
- Непрямі спостереження
  - Чорні дірки
  - Гравітаційні лінзи
  - Гравітаційні хвилі
  - Будова зірок, нейтронні зірки
  - Ефекти сильної гравітації в подвійних системах з пульсарів білих карликів тощо



# ПОДВІЙНА СИСТЕМА PSR 1913 + 16

- 1974: Халс, Тейлор (Нобелівська премія 1993)



# ПОДВІЙНА СИСТЕМА PSR 1513 + 16

- 1974: Халс, Тейлор (Нобелівська премія 1993)
- Один з компонентів пульсар (нейтронна зірка)



# ПОДВІЙНА СИСТЕМА PSR 1513 + 16

- 1974: Халс, Тейлор (Нобелівська премія 1993)
- Один з компонентів пульсар (нейтронна зірка)
- Зсув перигелію  $\Delta\varphi = 4.2^\circ$  в рік (в 36000 раз більший ніж для Меркурія!)



# ПОДВІЙНА СИСТЕМА PSR 1913 + 16

- 1974: Халс, Тейлор (Нобелівська премія 1993)
- Один з компонентів пульсар (нейтронна зірка)
- Зсув перигелію  $\Delta\varphi = 4.2^\circ$  в рік (в 36000 раз більший ніж для Меркурія!)
- Компоненти зближуються за рахунок втрати енергії на випромінювання гравітаційних хвиль. Цей ефект описується ЗТВ із точністю 0.2%
- На експерименті LIGO 14.09.2015 був зареєстрований сигнал від, як вважається, злиття двох чорних дірок



# Як спростити нелінійні рівняння ЗТВ для опису Всесвіту?

- Космологія — наука про будову та еволюцію Всесвіту як цілого



# Як спростити нелінійні рівняння ЗТВ для опису Всесвіту?

- Космологія — наука про будову та еволюцію Всесвіту як цілого
- Космологічний принцип: речовина однорідно розподілена у Всесвіті при усередненні на масштабах  $\sim 100 - 300$  Мпк



# Як спростити нелінійні рівняння ЗТВ для опису Всесвіту?

- Космологія — наука про будову та еволюцію Всесвіту як цілого
- Космологічний принцип: речовина однорідно розподілена у Всесвіті при усередненні на масштабах  $\sim 100 - 300$  Мпк
- Однорідний та ізотропний простір — простір сталої кривини. Він може бути замкнутим, відкритим або плоским





# Як спростити нелінійні рівняння ЗТВ для опису Всесвіту?

- Космологія — наука про будову та еволюцію Всесвіту як цілого
- Космологічний принцип: речовина однорідно розподілена у Всесвіті при усередненні на масштабах  $\sim 100 - 300$  Мпк
- Однорідний та ізотропний простір — простір сталої кривини. Він може бути замкнутим, відкритим або плоским
- Локально паралельні прямі (геодезичні)



# Як спростити нелінійні рівняння ЗТВ для опису Всесвіту?

- Космологія — наука про будову та еволюцію Всесвіту як цілого
- Космологічний принцип: речовина однорідно розподілена у Всесвіті при усередненні на масштабах  $\sim 100 - 300$  Мпк
- Однорідний та ізотропний простір — простір сталої кривини. Він може бути замкнутим, відкритим або плоским
- Локально паралельні прямі (геодезичні)
  - $k = 1$  (замкнутий простір): зближуються



# Як спростити нелінійні рівняння ЗТВ для опису Всесвіту?

- Космологія — наука про будову та еволюцію Всесвіту як цілого
- Космологічний принцип: речовина однорідно розподілена у Всесвіті при усередненні на масштабах  $\sim 100 - 300$  Мпк
- Однорідний та ізотропний простір — простір сталої кривини. Він може бути замкнутим, відкритим або плоским
- Локально паралельні прямі (геодезичні)
  - $k = 1$  (замкнутий простір): зближуються
  - $k = 0$  (плоский простір): залишаються паралельними



# Як спростити нелінійні рівняння ЗТВ для опису Всесвіту?

- Космологія — наука про будову та еволюцію Всесвіту як цілого
- Космологічний принцип: речовина однорідно розподілена у Всесвіті при усередненні на масштабах  $\sim 100 - 300$  Мпк
- Однорідний та ізотропний простір — простір сталої кривини. Він може бути замкнутим, відкритим або плоским
- Локально паралельні прямі (геодезичні)
  - $k = 1$  (замкнутий простір): зближуються
  - $k = 0$  (плоский простір): залишаються паралельними
  - $k = -1$  (відкритий простір): віддаляються



# Як спростити нелінійні рівняння ЗТВ для опису Всесвіту?

- Космологія — наука про будову та еволюцію Всесвіту як цілого
- Космологічний принцип: речовина однорідно розподілена у Всесвіті при усередненні на масштабах  $\sim 100 - 300$  Мпк
- Однорідний та ізотропний простір — простір сталої кривини. Він може бути замкнутим, відкритим або плоским
- Локально паралельні прямі (геодезичні)
  - $k = 1$  (замкнутий простір): зближуються
  - $k = 0$  (плоский простір): залишаються паралельними
  - $k = -1$  (відкритий простір): віддаляються
- Речовина — ідеальна рідина



# МОДЕЛЬ ФРІДМАНА (1924)

- Метрика Фрідмана-Робертсона-Уолкера (FRW) ( $a(t)$  — масштабний фактор):  $ds^2 = c^2 dt^2 - a^2(t) dl^2$



# МОДЕЛЬ ФРІДМАНА (1924)

- Метрика Фрідмана-Робертсона-Уолкера (FRW) ( $a(t)$  — масштабний фактор):  $ds^2 = c^2 dt^2 - a^2(t) dl^2$
- Елемент відстані  $dl^2 = \frac{dr^2}{1-kr^2} + r^2 (d\theta^2 + \sin^2\theta d\phi^2)$



# МОДЕЛЬ ФРІДМАНА (1924)

- Метрика Фрідмана-Робертсона-Уолкера (FRW) ( $a(t)$  — масштабний фактор):  $ds^2 = c^2 dt^2 - a^2(t) dl^2$
- Елемент відстані  $dl^2 = \frac{dr^2}{1-kr^2} + r^2 (d\theta^2 + \sin^2\theta d\phi^2)$
- Рівняння Фрідмана 
$$\begin{cases} \dot{a}^2 + kc^2 = \frac{1}{3}\kappa c^2(\varepsilon + \lambda)a^2 \\ \ddot{a} = -\frac{1}{6}\kappa c^2(\varepsilon + 3p - 2\lambda)a, \quad \kappa = \frac{8\pi G}{c^4} \end{cases}$$





# МОДЕЛЬ ФРІДМАНА (1924)

- Метрика Фрідмана-Робертсона-Уолкера (FRW) ( $a(t)$  — масштабний фактор):  $ds^2 = c^2 dt^2 - a^2(t) dl^2$
- Елемент відстані  $dl^2 = \frac{dr^2}{1-kr^2} + r^2 (d\theta^2 + \sin^2\theta d\phi^2)$
- Рівняння Фрідмана 
$$\begin{cases} \dot{a}^2 + kc^2 = \frac{1}{3}\kappa c^2(\varepsilon + \lambda)a^2 \\ \ddot{a} = -\frac{1}{6}\kappa c^2(\varepsilon + 3p - 2\lambda)a, \quad \kappa = \frac{8\pi G}{c^4} \end{cases}$$
- Гамов, Альфер, Герман: теорія гарячого Всесвіту (1948)



# МОДЕЛЬ ФРІДМАНА (1924)

- Метрика Фрідмана-Робертсона-Уолкера (FRW) ( $a(t)$  — масштабний фактор):  $ds^2 = c^2 dt^2 - a^2(t) dl^2$
- Елемент відстані  $dl^2 = \frac{dr^2}{1-kr^2} + r^2 (d\theta^2 + \sin^2\theta d\phi^2)$
- Рівняння Фрідмана 
$$\begin{cases} \dot{a}^2 + kc^2 = \frac{1}{3}\kappa c^2(\varepsilon + \lambda)a^2 \\ \ddot{a} = -\frac{1}{6}\kappa c^2(\varepsilon + 3p - 2\lambda)a, \quad \kappa = \frac{8\pi G}{c^4} \end{cases}$$
- Гамов, Альфер, Герман: теорія гарячого Всесвіту (1948)
- Спостереження реліктового випромінювання  $T = 2.725 \text{ K}$ , ( $n_\gamma = 410 \text{ см}^{-3}$ ) (Пензіас, Вільсон, 1965; Нобелівська премія 1978)



# ПРОБЛЕМА ТЕМНОЇ МАТЕРІЇ ТА КРИВІ ОБЕРТАНЬ ГАЛАКТИК

- Криві обертань галактик



# ПРОБЛЕМА ТЕМНОЇ МАТЕРІЇ ТА КРИВІ ОБЕРТАНЬ ГАЛАКТИК

- Криві обертань галактик
- Ньютонівська теорія



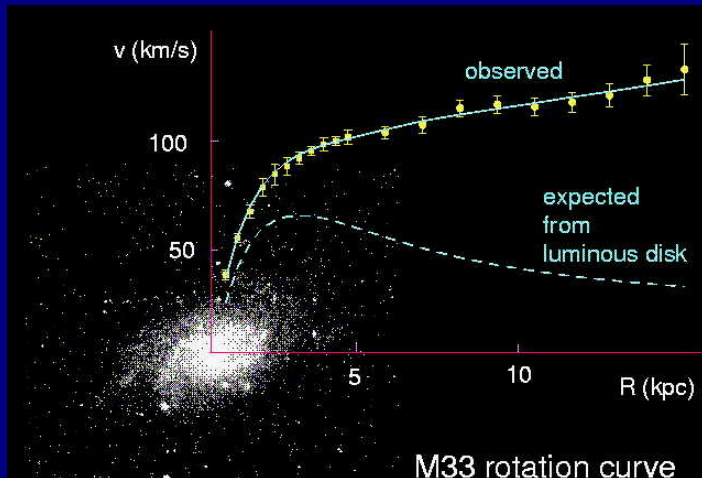
# ПРОБЛЕМА ТЕМНОЇ МАТЕРІЇ ТА КРИВІ ОБЕРТАНЬ ГАЛАКТИК

- Криві обертань галактик
- Ньютонівська теорія

$$v(r) \sim \sqrt{\frac{M}{r}}$$



# ПРОБЛЕМА ТЕМНОЇ МАТЕРІЇ ТА КРИВІ ОБЕРТАНЬ ГАЛАКТИК



# ПРОБЛЕМА ТЕМНОЇ МАТЕРІЇ ТА КРИВІ ОБЕРТАНЬ ГАЛАКТИК

- Криві обертань галактик
- Ньютонівська теорія

$$v(r) \sim \sqrt{\frac{M}{r}}$$

- Спостереження не бачать спадання швидкості з  $r$  до 10-20 радіусів галактики!



# ПРОБЛЕМА ТЕМНОЇ МАТЕРІЇ ТА КРИВІ ОБЕРТАНЬ ГАЛАКТИК

- Криві обертань галактик
- Ньютонівська теорія

$$v(r) \sim \sqrt{\frac{M}{r}}$$

- Спостереження не бачать спадання швидкості з  $r$  до 10-20 радіусів галактики!
- 1937: Цвіккі; 1974: Ейнасто, Каасік, Саар; Піблс, Острайкер, Яхіл





# ПРОБЛЕМА ТЕМНОЇ МАТЕРІЇ ТА КРИВІ ОБЕРТАНЬ ГАЛАКТИК

- Криві обертань галактик
- Ньютонівська теорія

$$v(r) \sim \sqrt{\frac{M}{r}}$$

- Спостереження не бачать спадання швидкості з  $r$  до 10-20 радіусів галактики!
- 1937: Цвіккі; 1974: Ейнасто, Каасік, Саар; Піблс, Острайкер, Яхіл
- Емпіричне співвідношення Таллі-Фішера:  $v_* \sim \sqrt[4]{M}$



# ПРОБЛЕМА ТЕМНОЇ МАТЕРІЇ ТА КРИВІ ОБЕРТАНЬ ГАЛАКТИК

- Криві обертань галактик
- Ньютонівська теорія

$$v(r) \sim \sqrt{\frac{M}{r}}$$

- Спостереження не бачать спадання швидкості з  $r$  до 10-20 радіусів галактики!
- 1937: Цвіккі; 1974: Ейнасто, Каасік, Саар; Піблс, Острайкер, Яхіл
- Емпіричне співвідношення Таллі-Фішера:  $v_* \sim \sqrt[4]{M}$
- Гіпотеза про темну матерію



# ПРОБЛЕМА ТЕМНОЇ МАТЕРІЇ ТА КРИВІ ОБЕРТАНЬ ГАЛАКТИК

- Криві обертань галактик
- Ньютонівська теорія

$$v(r) \sim \sqrt{\frac{M}{r}}$$

- Спостереження не бачать спадання швидкості з  $r$  до 10-20 радіусів галактики!
- 1937: Цвіккі; 1974: Ейнасто, Каасік, Саар; Піблс, Острайкер, Яхіл
- Емпіричне співвідношення Таллі-Фішера:  $v_* \sim \sqrt[4]{M}$
- Гіпотеза про темну матерію



# ПРОБЛЕМА ТЕМНОЇ МАТЕРІЇ ТА КРИВІ ОБЕРТАНЬ ГАЛАКТИК

- Криві обертань галактик
- Ньютонівська теорія

$$v(r) \sim \sqrt{\frac{M}{r}} = \text{Const}$$

- Спостереження не бачать спадання швидкості з  $r$  до 10-20 радіусів галактики!
- 1937: Цвіккі; 1974: Ейнасто, Каасік, Саар; Піблс, Острайкер, Яхіл
- Емпіричне співвідношення Таллі-Фішера:  $v_* \sim \sqrt[4]{M}$
- Гіпотеза про темну матерію



# ПРОБЛЕМА ТЕМНОЇ МАТЕРІЇ ТА КРИВІ ОБЕРТАНЬ ГАЛАКТИК

- Криві обертань галактик
- Ньютонівська теорія

$$v(r) \sim \sqrt{\frac{M}{r}} = \text{Const} \Rightarrow M(r) \sim r$$

- Спостереження не бачать спадання швидкості з  $r$  до 10-20 радіусів галактики!
- 1937: Цвіккі; 1974: Ейнасто, Каасік, Саар; Піблс, Острайкер, Яхіл
- Емпіричне співвідношення Таллі-Фішера:  $v_* \sim \sqrt[4]{M}$
- Гіпотеза про темну матерію



# ПРОБЛЕМА ТЕМНОЇ МАТЕРІЇ ТА КРИВІ ОБЕРТАНЬ ГАЛАКТИК

- Криві обертань галактик
- Ньютонівська теорія

$$v(r) \sim \sqrt{\frac{M}{r}} = \text{Const} \Rightarrow M(r) \sim r, \quad \rho(r) \sim \frac{1}{r^2}$$

- Спостереження не бачать спадання швидкості з  $r$  до 10-20 радіусів галактики!
- 1937: Цвіккі; 1974: Ейнасто, Каасік, Саар; Піблс, Острайкер, Яхіл
- Емпіричне співвідношення Таллі-Фішера:  $v_* \sim \sqrt[4]{M}$
- Гіпотеза про темну матерію



# ПРОБЛЕМА ТЕМНОЇ МАТЕРІЇ ТА КРИВІ ОБЕРТАНЬ ГАЛАКТИК

- Криві обертань галактик
- Ньютонівська теорія

$$v(r) \sim \sqrt{\frac{M}{r}} = \text{Const} \Rightarrow M(r) \sim r, \quad \rho(r) \sim \frac{1}{r^2}$$

- Спостереження не бачать спадання швидкості з  $r$  до 10-20 радіусів галактики!
- 1937: Цвіккі; 1974: Ейнасто, Каасік, Саар; Піблс, Острайкер, Яхіл
- Емпіричне співвідношення Таллі-Фішера:  $v_* \sim \sqrt[4]{M}$
- Гіпотеза про темну матерію
- Пошуки WIMP



# РОЗШИРЕННЯ ВСЕСВІТУ

- Закон Хаббла  $v = H(t)r$ ,  $H(t) = \frac{\dot{a}(t)}{a(t)}$  — параметр Хаббла





# РОЗШИРЕННЯ ВСЕСВІТУ

- Закон Хаббла  $v = H(t)r$ ,  $H(t) = \frac{\dot{a}(t)}{a(t)}$  — параметр Хаббла
- Вимірювання відстані. Метод фотометричного параллаксу



# РОЗШИРЕННЯ ВСЕСВІТУ

- Закон Хаббла  $v = H(t)r$ ,  $H(t) = \frac{\dot{a}(t)}{a(t)}$  — параметр Хаббла
- Вимірювання відстані. Метод фотометричного параллаксу
- Світловий потік  $F = \frac{L}{4\pi d_L^2}$ ,  $L$  — абсолютна світність,  $d_L$  — фотометрична відстань (luminosity distance)



# РОЗШИРЕННЯ ВСЕСВІТУ

- Закон Хаббла  $v = H(t)r$ ,  $H(t) = \frac{\dot{a}(t)}{a(t)}$  — параметр Хаббла
- Вимірювання відстані. Метод фотометричного параллаксу
- Світловий потік  $F = \frac{L}{4\pi d_L^2}$ ,  $L$  — абсолютна світність,  $d_L$  — фотометрична відстань (luminosity distance)
- $L$ : Стандартні свічки. Наднові Ia



# РОЗШИРЕННЯ ВСЕСВІТУ

- Закон Хаббла  $v = H(t)r$ ,  $H(t) = \frac{\dot{a}(t)}{a(t)}$  — параметр Хаббла
- Вимірювання відстані. Метод фотометричного параллаксу
- Світловий потік  $F = \frac{L}{4\pi d_L^2}$ ,  $L$  — абсолютна світність,  $d_L$  — фотометрична відстань (luminosity distance)
- $L$ : Стандартні свічки. Наднові Ia
- $d_L$ : Космологія



# РОЗШИРЕННЯ ВСЕСВІТУ

- Закон Хаббла  $v = H(t)r$ ,  $H(t) = \frac{\dot{a}(t)}{a(t)}$  — параметр Хаббла
- Вимірювання відстані. Метод фотометричного параллаксу
- Світловий потік  $F = \frac{L}{4\pi d_L^2}$ ,  $L$  — абсолютна світність,  $d_L$  — фотометрична відстань (luminosity distance)
- $L$ : Стандартні свічки. Наднові Ia
- $d_L$ : Космологія
  - Евклідова геометрія:  $d_L = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$



# РОЗШИРЕННЯ ВСЕСВІТУ

- Закон Хаббла  $v = H(t)r$ ,  $H(t) = \frac{\dot{a}(t)}{a(t)}$  — параметр Хаббла
- Вимірювання відстані. Метод фотометричного параллаксу
- Світловий потік  $F = \frac{L}{4\pi d_L^2}$ ,  $L$  — абсолютна світність,  $d_L$  — фотометрична відстань (luminosity distance)
- $L$ : Стандартні свічки. Наднові Ia
- $d_L$ : Космологія
  - Евклідова геометрія:  $d_L = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$
  - Модель Фрідмана:  $d_L(z) = (1+z) \int_0^z \frac{dz'}{H(z')}$



# ВІДКРИТТЯ ПРИСКОРЕНОГО РОЗШИРЕННЯ ВСЕСВІТУ

- 1998 Adam G. Riess et al.: Observational Evidence from Supernovae for an Accelerating Universe and a Cosmological Constant (arXiv: astro-ph/9805201, The Astronomical Journal **116** 1009)



# ВІДКРИТТЯ ПРИСКОРЕНОГО РОЗШИРЕННЯ ВСЕСВІТУ

- 1998 Adam G. Riess et al.: Observational Evidence from Supernovae for an Accelerating Universe and a Cosmological Constant (arXiv: astro-ph/9805201, The Astronomical Journal **116** 1009)
- Наднові Ia в галактиках, що "віддаляються" за законом Хаббла, мають яскравість нижче за очікувану!





# ВІДКРИТТЯ ПРИСКОРЕНОГО РОЗШИРЕННЯ ВСЕСВІТУ

- 1998 Adam G. Riess et al.: Observational Evidence from Supernovae for an Accelerating Universe and a Cosmological Constant (arXiv: astro-ph/9805201, The Astronomical Journal **116** 1009)
- Наднові Ia в галактиках, що "віддаляються" за законом Хаббла, мають яскравість нижче за очікувану!
- Відстань за стандартними свічками більше відстані за законом Хаббла



# ВІДКРИТТЯ ПРИСКОРЕНОГО РОЗШИРЕННЯ ВСЕСВІТУ

- 1998 Adam G. Riess et al.: Observational Evidence from Supernovae for an Accelerating Universe and a Cosmological Constant (arXiv: astro-ph/9805201, The Astronomical Journal **116** 1009)
- Наднові Ia в галактиках, що "віддаляються" за законом Хаббла, мають яскравість нижче за очікувану!
- Відстань за стандартними свічками більше відстані за законом Хаббла
- Всесвіт розширюється з прискоренням!



# ВІДКРИТТЯ ПРИСКОРЕНОГО РОЗШИРЕННЯ ВСЕСВІТУ

- 1998 Adam G. Riess et al.: Observational Evidence from Supernovae for an Accelerating Universe and a Cosmological Constant (arXiv: astro-ph/9805201, The Astronomical Journal **116** 1009)
- Наднові Ia в галактиках, що "віддаляються" за законом Хаббла, мають яскравість нижче за очікувану!
- Відстань за стандартними свічками більше відстані за законом Хаббла
- Всесвіт розширюється з прискоренням!
- Нобелівська премія 2011: The Nobel Prize in Physics 2011 — Saul Perlmutter, Brian P. Schmidt, Adam G. Riess



# ВІДКРИТТЯ ПРИСКОРОНОГО РОЗШИРЕННЯ ВСЕСВІТУ



# ВІДКРИТТЯ ПРИСКОРЕНОГО РОЗШИРЕННЯ ВСЕСВІТУ

- 1998 Adam G. Riess et al.: Observational Evidence from Supernovae for an Accelerating Universe and a Cosmological Constant (arXiv: astro-ph/9805201, The Astronomical Journal **116** 1009)
- Наднові Ia в галактиках, що "віддаляються" за законом Хаббла, мають яскравість нижче за очікувану!
- Відстань за стандартними свічками більше відстані за законом Хаббла
- Всесвіт розширюється з прискоренням!
- Нобелівська премія 2011: The Nobel Prize in Physics 2011 — Saul Perlmutter, Brian P. Schmidt, Adam G. Riess
- Проблема темної енергії



# ВІДКРИТТЯ ПРИСКОРЕНОГО РОЗШИРЕННЯ ВСЕСВІТУ



# СТАНДАРТНА МОДЕЛЬ ЕЛЕМЕНТАРНИХ ЧАСТИНОК

Три покоління матерії (Ферміони)				
	I	II	III	
маса →	2,4 МэВ	1,27 ГэВ	171,2 ГэВ	0
заряд →	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
спин →	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
назва →	верхній	очарувальний	істинний	фотон
Кварки	4,8 МэВ	104 МэВ	4,2 ГэВ	0
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	нижній	странний	прелестний	глюон
Лептони	<2,2 эВ	<0,17 МэВ	<15,5 МэВ	91,2 ГэВ <sup>0</sup>
	0	0	0	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	електронне нейтрино	міюнове нейтрино	тау нейтрино	слабке взаємодія
	0,511 МэВ	105,7 МэВ	1,777 ГэВ	80,4 ГэВ <sup>±</sup>
	-1	-1	-1	±1
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	електрон	міюон	тау	слабке взаємодія

Бозони (переносчики взаємодії)



# СТАНДАРТНА МОДЕЛЬ ЕЛЕМЕНТАРНИХ ЧАСТИНОК

- Спонтанне порушення симетрії



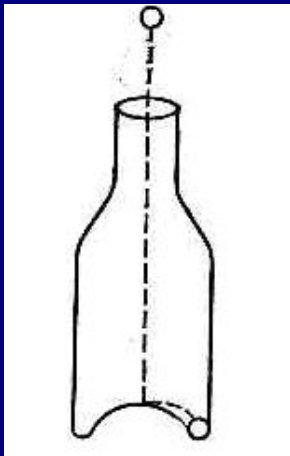


# СТАНДАРТНА МОДЕЛЬ ЕЛЕМЕНТАРНИХ ЧАСТИНОК

- Спонтанне порушення симетрії
- Чи завжди симетрична задача має симетричні розв'язки?



# СТАНДАРТНА МОДЕЛЬ ЕЛЕМЕНТАРНИХ ЧАСТИНОК



# СТАНДАРТНА МОДЕЛЬ ЕЛЕМЕНТАРНИХ ЧАСТИНОК

- Спонтанне порушення симетрії
- Чи завжди симетрична задача має симетричні розв'язки?
- Можливі випадки, коли симетричний розв'язок набуває нестійкості та основний стан стає виродженим



# СТАНДАРТНА МОДЕЛЬ ЕЛЕМЕНТАРНИХ ЧАСТИНОК

- Спонтанне порушення симетрії
- Чи завжди симетрична задача має симетричні розв'язки?
- Можливі випадки, коли симетричний розв'язок набуває нестійкості та основний стан стає виродженим
- Модель феромагнетика Гайзенберга поблизу точки Кюрі  $T_c$  (теорія Гінзбурга-Ландау):



# СТАНДАРТНА МОДЕЛЬ ЕЛЕМЕНТАРНИХ ЧАСТИНОК

- Спонтанне порушення симетрії
- Чи завжди симетрична задача має симетричні розв'язки?
- Можливі випадки, коли симетричний розв'язок набуває нестійкості та основний стан стає виродженим
- Модель феромагнетика Гайзенберга поблизу точки Кюрі  $T_c$  (теорія Гінзбурга-Ландау):

$T > T_c$  : спіни випадково зорієнтовані у просторі,  $\langle M \rangle = 0$



# СТАНДАРТНА МОДЕЛЬ ЕЛЕМЕНТАРНИХ ЧАСТИНОК

- Спонтанне порушення симетрії
- Чи завжди симетрична задача має симетричні розв'язки?
- Можливі випадки, коли симетричний розв'язок набуває нестійкості та основний стан стає виродженим
- Модель феромагнетика Гайзенберга поблизу точки Кюрі  $T_c$  (теорія Гінзбурга-Ландау):

$T > T_c$  : спіни випадково зорієнтовані у просторі,  $\langle M \rangle = 0$

$T < T_c$  : спіни орієнтуються вздовж довільного напрямку,  
 $\langle M \rangle \neq 0$

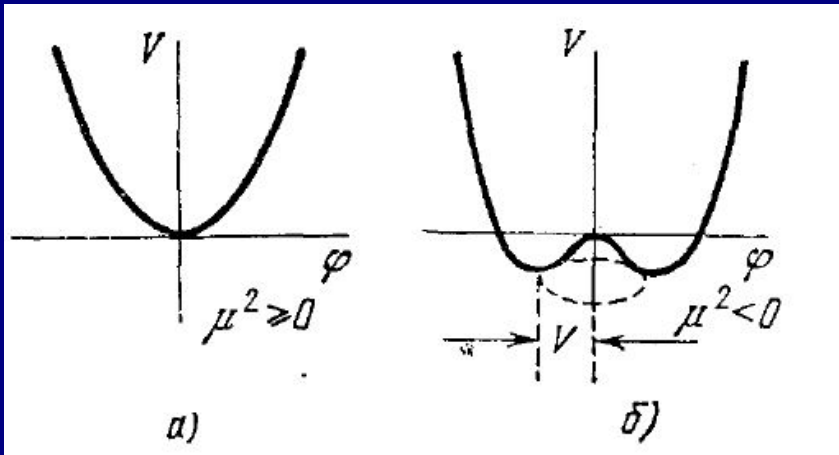


# СТАНДАРТНА МОДЕЛЬ ЕЛЕМЕНТАРНИХ ЧАСТИНОК

- Спонтанне порушення симетрії
- Чи завжди симетрична задача має симетричні розв'язки?
- Можливі випадки, коли симетричний розв'язок набуває нестійкості та основний стан стає виродженим
- Модель феромагнетика Гайзенберга поблизу точки Кюрі  $T_c$  (теорія Гінзбурга-Ландау):
  - $T > T_c$  : спіни випадково зорієнтовані у просторі,  $\langle M \rangle = 0$
  - $T < T_c$  : спіни орієнтуються вздовж довільного напрямку,  $\langle M \rangle \neq 0$
- $V(\varphi) = \mu^2 \varphi^2 + \lambda^2 \varphi^4$

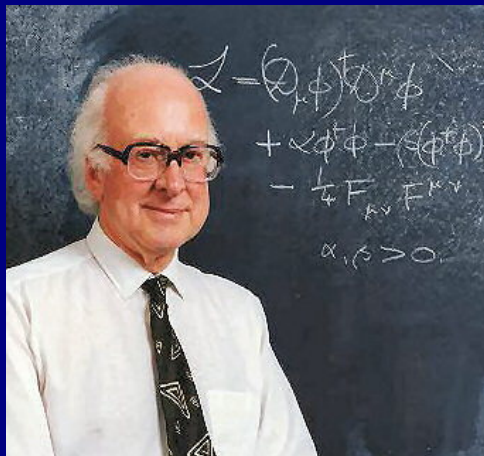


# СТАНДАРТНА МОДЕЛЬ ЕЛЕМЕНТАРНИХ ЧАСТИНОК





# СТАНДАРТНА МОДЕЛЬ ЕЛЕМЕНТАРНИХ ЧАСТИНОК



# СТАНДАРТНА МОДЕЛЬ ЕЛЕМЕНТАРНИХ ЧАСТИНОК

- Спонтанне порушення симетрії
- Чи завжди симетрична задача має симетричні розв'язки?
- Можливі випадки, коли симетричний розв'язок набуває нестійкості та основний стан стає виродженим
- Модель феромагнетика Гайзенберга поблизу точки Кюрі  $T_c$  (теорія Гінзбурга-Ландау):
  - $T > T_c$  : спіни випадково зорієнтовані у просторі,  $\langle M \rangle = 0$
  - $T < T_c$  : спіни орієнтуються вздовж довільного напрямку,  $\langle M \rangle \neq 0$
- $V(\varphi) = \mu^2 \varphi^2 + \lambda^2 \varphi^4$
- Механізм Хіггса: симетричний (об'єднаний) стан різних взаємодій перестає бути стійким при зниженні температури Всесвіту! (Нобелівська премія з фізики 2013 р.)



# СТАНДАРТНА МОДЕЛЬ ЕЛЕМЕНТАРНИХ ЧАСТИНОК

- Спонтанне порушення симетрії
- Чи завжди симетрична задача має симетричні розв'язки?
- Можливі випадки, коли симетричний розв'язок набуває нестійкості та основний стан стає виродженим
- Модель феромагнетика Гайзенберга поблизу точки Кюрі  $T_c$  (теорія Гінзбурга-Ландау):
  - $T > T_c$  : спіни випадково зорієнтовані у просторі,  $\langle M \rangle = 0$
  - $T < T_c$  : спіни орієнтуються вздовж довільного напрямку,  $\langle M \rangle \neq 0$
- $V(\varphi) = \mu^2 \varphi^2 + \lambda^2 \varphi^4$
- Механізм Хіггса: симетричний (об'єднаний) стан різних взаємодій перестає бути стійким при зниженні температури Всесвіту! (Нобелівська премія з фізики 2013 р.)
- Шляхи фізики мікросвіту та фізики Всесвіту перетинаються!



# СТАНДАРТНА МОДЕЛЬ ЕЛЕМЕНТАРНИХ ЧАСТИНОК

- Спонтанне порушення симетрії
- Чи завжди симетрична задача має симетричні розв'язки?
- Можливі випадки, коли симетричний розв'язок набуває нестійкості та основний стан стає виродженим
- Модель феромагнетика Гайзенберга поблизу точки Кюрі  $T_c$  (теорія Гінзбурга-Ландау):
  - $T > T_c$  : спіни випадково зорієнтовані у просторі,  $\langle M \rangle = 0$
  - $T < T_c$  : спіни орієнтуються вздовж довільного напрямку,  $\langle M \rangle \neq 0$
- $V(\varphi) = \mu^2 \varphi^2 + \lambda^2 \varphi^4$
- Механізм Хіггса: симетричний (об'єднаний) стан різних взаємодій перестає бути стійким при зниженні температури Всесвіту! (Нобелівська премія з фізики 2013 р.)
- Шляхи фізики мікросвіту та фізики Всесвіту перетинаються!
- Гравітаційна взаємодію неможливо описати в подібний спосіб!



# СТАНДАРТНА МОДЕЛЬ ЕЛЕМЕНТАРНИХ ЧАСТИНОК

- Спонтанне порушення симетрії
- Чи завжди симетрична задача має симетричні розв'язки?
- Можливі випадки, коли симетричний розв'язок набуває нестійкості та основний стан стає виродженим
- Модель феромагнетика Гайзенберга поблизу точки Кюрі  $T_c$  (теорія Гінзбурга-Ландау):
  - $T > T_c$  : спіни випадково зорієнтовані у просторі,  $\langle M \rangle = 0$
  - $T < T_c$  : спіни орієнтуються вздовж довільного напрямку,  $\langle M \rangle \neq 0$
- $V(\varphi) = \mu^2 \varphi^2 + \lambda^2 \varphi^4$
- Механізм Хіггса: симетричний (об'єднаний) стан різних взаємодій перестає бути стійким при зниженні температури Всесвіту! (Нобелівська премія з фізики 2013 р.)
- Шляхи фізики мікросвіту та фізики Всесвіту перетинаються!
- Гравітаційна взаємодію неможливо описати в подібний спосіб!
- Об'єднаної теорії взаємодій не існує!



# Епілог

Сенека: Время придет, когда наших потомков будет забавлять, что мы не знали понятий, которые они считают такими простыми. . . Многие открытия предназначены для будущих веков, когда уже сама память о нас сотрется. . . Природа не раскрывает свои тайны раз и навсегда

