

Открытие Вселенной силой мысли: как математика предсказывает неизвестные части мира

Алексей Семихатов

Отделение теоретической физики
Физический институт имени Лебедева РАН



PGCONF.RUSSIA 2024

Москва, апрель 2024

Великие **уравнения** знают больше, чем их великие создатели

План на сегодня

Успешные предсказания неизвестного или выяснение природы известного:

- 1 Планета
- 2 Свет
- 3 "Застывшая звезда"
- 4 Антимир
- 5 (Кварки)

Поучительное несбывшееся предсказание:

Планета

Драма сбывшегося неверного предсказания:

Антимир

План на сегодня

Успешные предсказания неизвестного или выяснение природы известного:

- 1 Планета
- 2 Свет
- 3 "Застывшая звезда"
- 4 Антимир
- 5 (Кварки)

Поучительное несбывшееся предсказание:

Планета

Драма сбывшегося неверного предсказания:

Кварки

План на сегодня

Успешные предсказания неизвестного или выяснение природы известного:

- 1 Планета
- 2 Свет
- 3 "Застывшая звезда"
- 4 Антимир
- 5 (Кварки)

Поучительное несбывшееся предсказание:

Планета

Драма сбывшегося неверного предсказания:

Кварки

План на сегодня

Успешные предсказания неизвестного или выяснение природы известного:

- 1 Планета
- 2 Свет
- 3 "Застывшая звезда"
- 4 Антимир
- 5 (Кварки)

Поучительное несбывшееся предсказание:

Планета

Драма сбывшегося неверного предсказания:

Космос

План на сегодня

Успешные предсказания неизвестного или выяснение природы известного:

- 1 Планета
- 2 Свет
- 3 “Застывшая звезда”
- 4 **Антимир**
- 5 (Кварки)

Поучительное несбывшееся предсказание:

Планета

Драма сбывшегося неверного предсказания:

Антимир

План на сегодня

Успешные предсказания неизвестного или выяснение природы известного:

- 1 Планета
- 2 Свет
- 3 “Застывшая звезда”
- 4 Антимир
- 5 (Кварки)

Поучительное несбывшееся предсказание:

Планета

Драма сбывшегося неверного предсказания:

Кварки

План на сегодня

Успешные предсказания неизвестного или выяснение природы известного:

- 1 Планета
- 2 Свет
- 3 “Застывшая звезда”
- 4 Антимир
- 5 (Кварки)

Поучительное несбывшееся предсказание:

- 1 Планета

Драма сбывшегося неверного предсказания:

- 1 Планета

План на сегодня

Успешные предсказания неизвестного или выяснение природы известного:

- 1 Планета
- 2 Свет
- 3 “Застывшая звезда”
- 4 Антимир
- 5 (Кварки)

Поучительное несбывшееся предсказание:

- 1 Планета

Драма сбывшегося неверного предсказания:

План на сегодня

Успешные предсказания неизвестного или выяснение природы известного:

- 1 Планета
- 2 Свет
- 3 “Застывшая звезда”
- 4 Антимир
- 5 (Кварки)

Поучительное несбывшееся предсказание:

- 1 Планета

Драма сбывшегося неверного предсказания:

- 1 Вселенная

План на сегодня

Успешные предсказания неизвестного или выяснение природы известного:

- 1 Планета
- 2 Свет
- 3 “Застывшая звезда”
- 4 Антимир
- 5 (Кварки)

Поучительное несбывшееся предсказание:

- 1 Планета

Драма сбывшегося неверного предсказания:

- 1 Вселенная

Открытые предсказания: сбудутся **или** нет?

С чего все началось

Начало: от Кеплера к Ньютону

От наблюдений к уравнениям

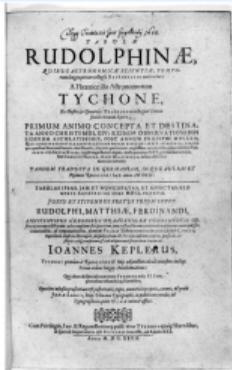
И. Кеплер: 1571–1630



Начало: от Кеплера к Ньютону

От наблюдений к уравнениям

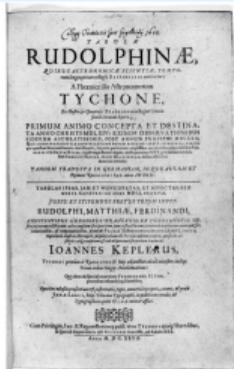
И. Кеплер: 1571–1630



Начало: от Кеплера к Ньютону

От наблюдений к уравнениям

И. Кеплер: 1571–1630



Tab. I. de Motu Martis

Die	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
Longitudo Solis	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	
Longitudo Martis	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	
Longitudo Jovis	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	
Longitudo Saturni	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	
Longitudo Mercurii	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	
Longitudo Venus	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	
Longitudo Telluris	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	

Начало: от Кеплера к Ньютону

От наблюдений к уравнениям

И. Кеплер: 1571-1630

nis Lune.

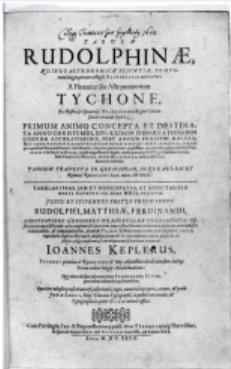
Add. 3 4 5 Signa

Signa	Equatio Argu- meti.	Equatio Cen- tri.	Comma vni minuto.	Equatio Argu- meti.	Equatio Cen- tri.	Comma vni minuto.	Equatio Argu- meti.	Equatio Cen- tri.	Comma vni minuto.	Equatio Argu- meti.	Equatio Cen- tri.	Comma vni minuto.	Equatio Argu- meti.	Equatio Cen- tri.	Comma vni minuto.	Equatio Argu- meti.	Equatio Cen- tri.	Comma vni minuto.
0 0	12 0 26	2 16	4 54 54	0 24	13 4 43	2 31	4 27 0	2 18	9 22 55	1 35	2 19 35	4 42	10 0					
0 10	12 1 26	2 16	4 54 58	0 24	13 4 43	2 31	4 26 17	2 18	9 20 55	1 35	2 18 48	4 42	10 0					
0 20	12 2 26	2 16	4 55 2	0 24	13 4 43	2 31	4 26 14	2 24	9 18 55	1 34	2 18 1	4 42	10 0					
0 30	12 3 26	2 16	4 55 6	0 24	13 4 43	2 31	4 25 50	2 24	9 15 55	1 34	2 17 14	4 42	10 0					
0 40	12 4 26	2 16	4 55 10	0 24	13 4 43	2 30	4 25 26	2 30	9 13 56	1 33	2 16 27	4 42	10 0					
0 50	12 5 27	2 17	4 55 14	0 18	13 3 43	2 30	4 25 2	2 30	9 11 56	1 33	2 15 40	4 48	10 0					
1 0	12 6 27	2 17	4 55 18	0 18	13 3 43	2 30	4 24 38	2 30	9 8 56	1 32	2 14 52	4 48	10 0					
1 10	12 7 27	2 17	4 55 22	0 18	13 3 43	2 30	4 24 14	2 30	9 6 56	1 32	2 14 5	4 48	10 0					
1 20	12 8 27	2 17	4 55 25	0 18	13 3 43	2 30	4 23 50	2 30	9 4 56	1 31	2 13 17	4 48	10 0					
1 30	12 9 27	2 17	4 55 28	0 18	13 3 43	2 30	4 23 26	2 30	9 2 56	1 31	2 12 30	4 48	10 0					
1 40	12 10 27	2 18	4 55 31	0 12	13 2 44	2 29	4 23 1	2 29	8 58 56	1 30	2 11 42	4 48	10 0					
1 50	12 11 27	2 18	4 55 34	0 12	13 2 44	2 29	4 22 36	2 29	8 56 56	1 30	2 10 54	4 48	10 0					
2 0	12 12 27	2 18	4 55 37	0 12	13 1 44	2 29	4 22 11	2 29	8 54 56	1 29	2 10 6	4 48	10 0					
2 10	12 13 27	2 18	4 55 39	0 12	13 1 44	2 29	4 21 46	2 29	8 51 56	1 29	2 9 18	4 48	10 0					
2 20	12 14 27	2 19	4 55 41	0 12	13 0 44	2 28	4 21 21	2 28	8 48 56	1 28	2 8 30	4 48	10 0					
2 30	12 15 27	2 19	4 55 43	0 12	13 0 44	2 28	4 20 56	2 28	8 46 56	1 28	2 7 42	4 48	10 0					
2 40	12 16 28	2 19	4 55 45	0 12	13 0 44	2 28	4 20 30	2 28	8 43 56	1 27	2 6 54	4 48	10 0					
2 50	12 17 28	2 19	4 55 47	0 12	13 0 44	2 28	4 20 4	2 28	8 41 56	1 27	2 5 66	4 48	10 0					
3 0	12 18 28	2 19	4 55 49	0 12	12 59 44	2 27	4 19 38	2 27	8 38 56	1 26	2 4 78	4 48	10 0					
3 10	12 19 28	2 19	4 55 50	0 12	12 58 44	2 27	4 19 12	2 27	8 36 56	1 26	2 4 30	4 48	10 0					
3 20	12 20 28	2 19	4 55 51	0 12	12 58 44	2 27	4 18 46	2 42	8 33 56	1 25	2 3 42	4 48	10 0					
3 30	12 21 28	2 19	4 55 52	0 12	12 58 44	2 27	4 18 19	2 42	8 30 56	1 25	2 2 54	4 48	10 0					
3 40	12 22 28	2 19	4 55 53	0 12	12 57 45	2 26	4 17 52	2 42	8 28 56	1 25	2 2 6	4 48	10 0					
3 50	12 23 28	2 19	4 55 54	0 12	12 57 45	2 26	4 17 25	2 42	8 25 56	1 24	2 1 18	4 48	10 0					
4 0	12 24 28	2 19	4 55 55	0 12	12 56 45	2 26	4 16 58	2 42	8 23 56	1 24	2 1 30	4 48	10 0					
4 10	12 25 28	2 19	4 55 56	0 12	12 56 45	2 26	4 16 31	2 42	8 20 56	1 24	2 0 42	4 48	10 0					
4 20	12 26 28	2 19	4 55 57	0 12	12 55 45	2 26	4 16 4	2 42	8 17 56	1 23	2 0 54	4 48	10 0					
4 30	12 27 28	2 19	4 55 58	0 12	12 55 45	2 26	4 15 37	2 48	8 14 56	1 23	2 0 6	4 48	10 0					
4 40	12 28 29	2 19	4 55 59	0 12	12 54 45	2 25	4 15 9	2 48	8 11 57	1 22	2 0 18	4 48	10 0					
4 50	12 29 29	2 19	4 56 0	0 12	12 54 45	2 25	4 14 41	2 48	8 8 57	1 22	2 0 30	4 48	10 0					
5 0	12 30 29	2 19	4 56 0	0 12	12 53 45	2 25	4 14 13	2 48	8 5 57	1 21	2 0 42	4 48	10 0					
5 10	12 31 29	2 19	4 56 0	0 12	12 53 45	2 25	4 13 45	2 48	8 3 57	1 21	2 0 54	4 48	10 0					
5 20	12 32 29	2 19	4 56 0	0 12	12 52 45	2 24	4 13 17	2 48	8 0 57	1 20	2 0 66	4 48	10 0					
5 30	12 33 29	2 19	4 56 0	0 12	12 52 45	2 24	4 12 49	2 48	7 57 57	1 20	2 0 78	4 48	10 0					
5 40	12 34 29	2 19	4 56 0	0 12	12 51 45	2 23	4 12 21	2 54	7 54 57	1 19	2 0 90	4 48	10 0					
5 50	12 35 29	2 19	4 56 0	0 12	12 51 45	2 23	4 11 52	2 54	7 51 57	1 19	2 0 102	4 48	10 0					

Начало: от Кеплера к Ньютону

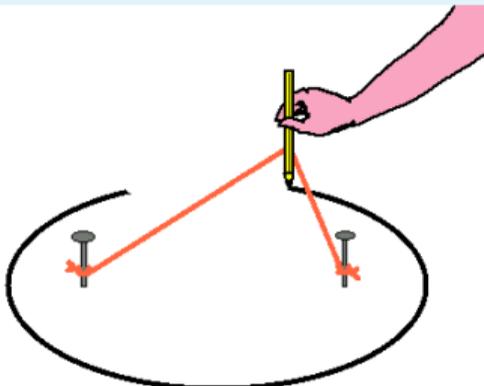
От наблюдений к уравнениям

И. Кеплер: 1571–1630



Tab. I. de Motu Martis

Die	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
Longitudo Solis	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	
Longitudo Martis	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	
Longitudo Telluris	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	
Longitudo Jovis	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	
Longitudo Saturni	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	



Начало: от Кеплера к Ньютону

От наблюдений к уравнениям

И. Кеплер: 1571–1630

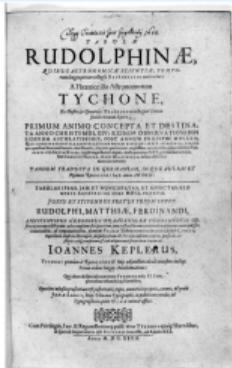
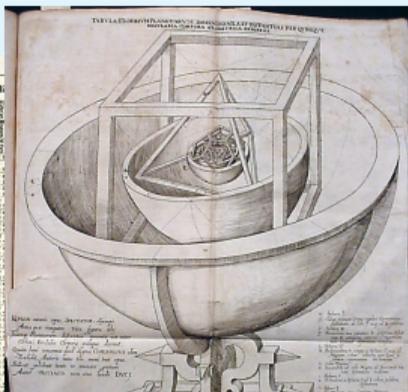


Table with columns for astronomical data, including 'Signi' and 'Lunæ'.

Signi	Lunæ	...
♈	♌	♍
♎	♏	♐
♑	♒	♓



Начало: от Кеплера к Ньютону

От наблюдений к уравнениям

И. Кеплер: 1571–1630

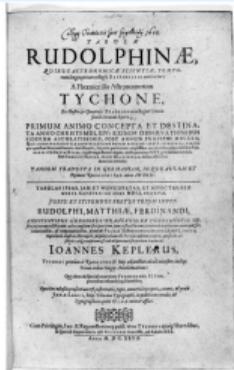
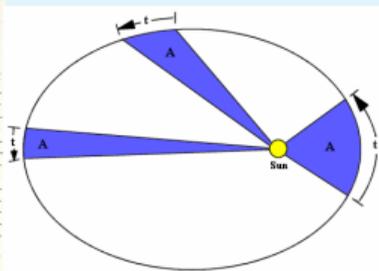
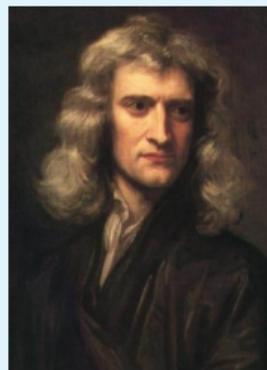


Table with columns for astronomical data, including dates and numerical values. The title 'nio Tunc.' is visible at the top.



И. Ньютон: 1642–1727



Начало: от Кеплера к Ньютону

От наблюдений к уравнениям

И. Кеплер: 1571–1630

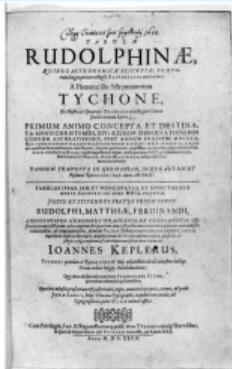
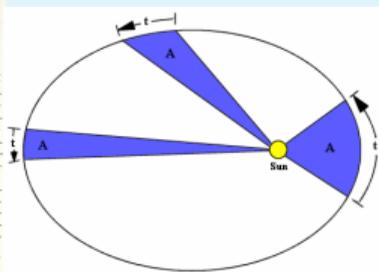
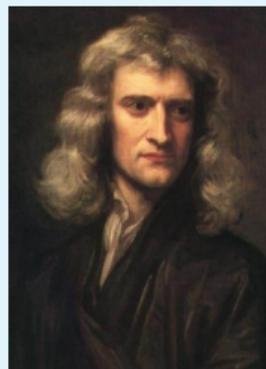


Table with columns for astronomical data, including 'Signa' and numerical values.



И. Ньютон: 1642–1727



Из **уравнений Ньютона** следуют все законы Кеплера

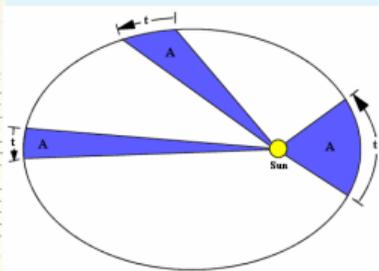
Начало: от Кеплера к Ньютону

От наблюдений к уравнениям

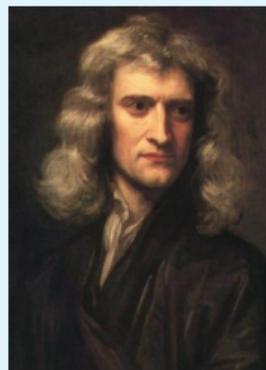
И. Кеплер: 1571–1630



Table with columns for astronomical data, including 'Data', 'Sigma', and various numerical values.



И. Ньютон: 1642–1727



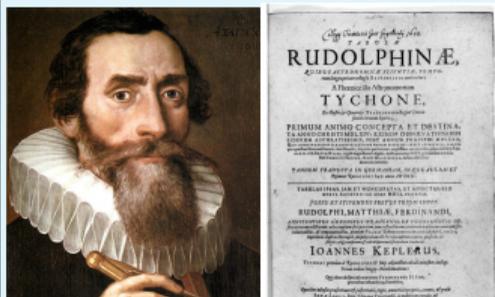
Из **уравнений Ньютона** следуют все законы Кеплера

а затем “последовали” и неизвестные Кеплеру тела

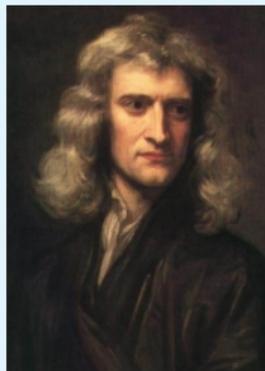
Начало: от Кеплера к Ньютону

От наблюдений к уравнениям

И. Кеплер: 1571–1630



И. Ньютон: 1642–1727



Из **уравнений Ньютона** следуют все законы Кеплера

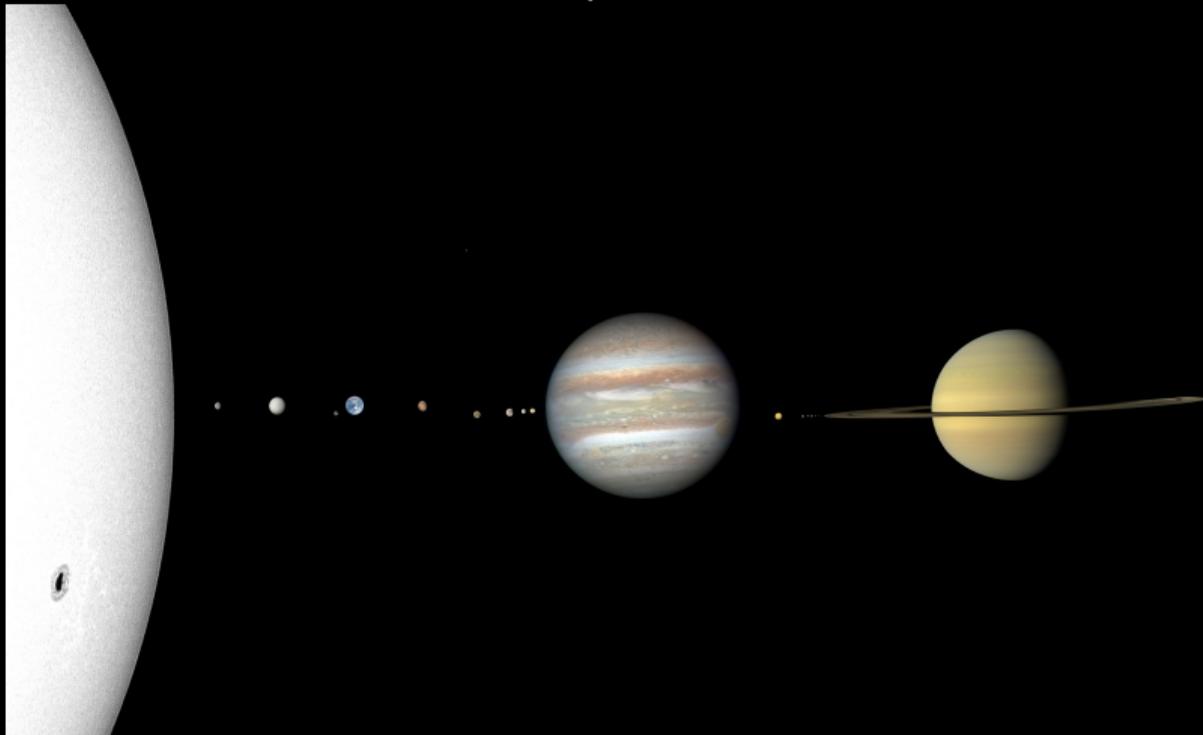
а затем “последовали” и неизвестные Кеплеру тела

и гиперболические траектории



Уравнения Ньютона в действии:
Триумфальное открытие на кончике пера

Солнечная система для Кеплера и Ньютона:



Планета — из конфликта наблюдений и уравнений

1781: У. Гершель случайно открыл планету Уран

- 1821: Бувар вычислил будущую орбиту Урана
- Следующие 20 лет: Уран не следует предсказаниям
- Бувар († 1843) говорил о возможной неизвестной планете



Планета — из конфликта наблюдений и уравнений

1781: У. Гершель случайно открыл планету Уран

- 1821: Бувар вычислил будущую орбиту Урана
 - кеплеров эллипс *нарушается* — влияние Юпитера и Сатурна
- Следующие 20 лет: Уран не следует предсказаниям
- Бувар († 1843) говорил о возможной неизвестной планете



Планета — из конфликта наблюдений и уравнений

1781: У. Гершель случайно открыл планету Уран

- 1821: Бувар вычислил будущую орбиту Урана
 - **кеплеров эллипс нарушается — влияние Юпитера и Сатурна**
- Следующие 20 лет: Уран не следует предсказаниям
- Бувар († 1843) говорил о возможной неизвестной планете



Планета — из конфликта наблюдений и уравнений

1781: У. Гершель случайно открыл планету Уран

- 1821: Бувар вычислил будущую орбиту Урана
 - кеплеров эллипс *нарушается* — влияние Юпитера и Сатурна
- Следующие 20 лет: Уран не следует предсказаниям
- Бувар († 1843) говорил о возможной неизвестной планете



Планета — из конфликта наблюдений и уравнений

1781: У. Гершель случайно открыл планету Уран

- 1821: Бувар вычислил будущую орбиту Урана
 - кеплеров эллипс *нарушается* — влияние Юпитера и Сатурна
- Следующие 20 лет: Уран не следует предсказаниям
- Бувар († 1843) говорил о **возможной неизвестной планете**
 - решение обратной задачи: *X* — источник гравитации



Планета — из конфликта наблюдений и уравнений

1781: У. Гершель случайно открыл планету Уран

- 1821: Бувар вычислил будущую орбиту Урана
 - кеплеров эллипс *нарушается* — влияние Юпитера и Сатурна
- Следующие 20 лет: Уран не следует предсказаниям
- Бувар († 1843) говорил о возможной неизвестной планете
 - решение **обратной** задачи: *X* — источник гравитации



Планета — из конфликта наблюдений и уравнений

1781: У. Гершель случайно открыл планету Уран

- 1821: Бувар вычислил будущую орбиту Урана
 - кеплеров эллипс *нарушается* — влияние Юпитера и Сатурна
- Следующие 20 лет: Уран не следует предсказаниям
- Бувар († 1843) говорил о возможной неизвестной планете
 - решение **обратной** задачи: *X* — источник гравитации

Охота за неизвестной планетой

- С начала 1840-х за вычисления взялся Адамс
- 1846: Леверье проделал свои вычисления, предложил астрономам найти планету

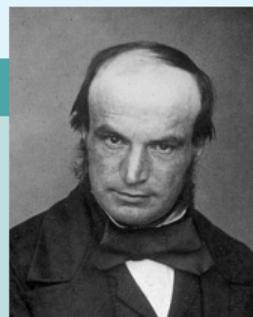
Планета — из конфликта наблюдений и уравнений

1781: У. Гершель случайно открыл планету Уран

- 1821: Бувар вычислил будущую орбиту Урана
 - кеплеров эллипс *нарушается* — влияние Юпитера и Сатурна
- Следующие 20 лет: Уран не следует предсказаниям
- Бувар († 1843) говорил о возможной неизвестной планете
 - решение **обратной** задачи: X — источник гравитации

Охота за неизвестной планетой

- С начала 1840-х за вычисления взялся Адамс
 - Требовались данные наблюдений; переписка с сэром Эйри
 - 1846: Адамс высказал предположение, где на небе могла бы находиться планета
- 1846: Леверье проделал свои вычисления, предложил астрономам найти планету



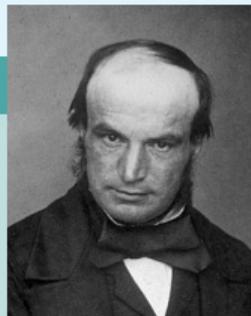
Планета — из конфликта наблюдений и уравнений

1781: У. Гершель случайно открыл планету Уран

- 1821: Бувар вычислил будущую орбиту Урана
 - кеплеров эллипс *нарушается* — влияние Юпитера и Сатурна
- Следующие 20 лет: Уран не следует предсказаниям
- Бувар († 1843) говорил о возможной неизвестной планете
 - решение **обратной** задачи: *X* — источник гравитации

Охота за неизвестной планетой

- С начала 1840-х за вычисления взялся Адамс
 - **Требовались данные наблюдений; переписка с сэром Эйри**
 - 1846: Адамс высказал предположение, где на небе могла бы находиться планета
- 1846: Леверье проделал свои вычисления, предложил астрономам найти планету



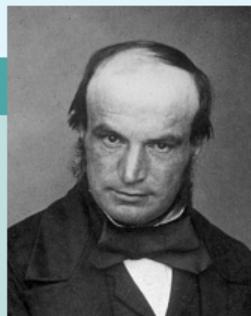
Планета — из конфликта наблюдений и уравнений

1781: У. Гершель случайно открыл планету Уран

- 1821: Бувар вычислил будущую орбиту Урана
 - кеплеров эллипс *нарушается* — влияние Юпитера и Сатурна
- Следующие 20 лет: Уран не следует предсказаниям
- Бувар († 1843) говорил о возможной неизвестной планете
 - решение **обратной** задачи: *X* — источник гравитации

Охота за неизвестной планетой

- С начала 1840-х за вычисления взялся Адамс
 - Требовались данные наблюдений; переписка с сэром Эйри
 - **1846: Адамс высказал предположение, где на небе могла бы находиться планета**
- 1846: Леверье проделал свои вычисления, предложил астрономам найти планету



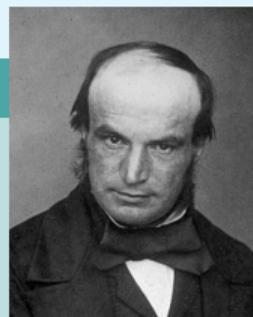
Планета — из конфликта наблюдений и уравнений

1781: У. Гершель случайно открыл планету Уран

- 1821: Бувар вычислил будущую орбиту Урана
 - кеплеров эллипс *нарушается* — влияние Юпитера и Сатурна
- Следующие 20 лет: Уран не следует предсказаниям
- Бувар († 1843) говорил о возможной неизвестной планете
 - решение **обратной** задачи: *X* — источник гравитации

Охота за неизвестной планетой

- С начала 1840-х за вычисления взялся Адамс
 - Требовались данные наблюдений; переписка с сэром Эйри
 - 1846: Адамс высказал предположение, где на небе могла бы находиться планета
- 1846: Леверье проделал свои вычисления, предложил астрономам **найти планету**
 - французы отнеслись прохладно
 - Леверье написал Чалису — дир. Кембриджской обсерватории
 - Август 1846: Чалис неохотно начал поиски



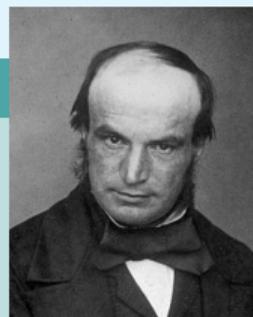
Планета — из конфликта наблюдений и уравнений

1781: У. Гершель случайно открыл планету Уран

- 1821: Бувар вычислил будущую орбиту Урана
 - кеплеров эллипс *нарушается* — влияние Юпитера и Сатурна
- Следующие 20 лет: Уран не следует предсказаниям
- Бувар († 1843) говорил о возможной неизвестной планете
 - решение **обратной** задачи: *X* — источник гравитации

Охота за неизвестной планетой

- С начала 1840-х за вычисления взялся Адамс
 - Требовались данные наблюдений; переписка с сэром Эйри
 - 1846: Адамс высказал предположение, где на небе могла бы находиться планета
- 1846: Леверье проделал свои вычисления, предложил астрономам найти планету
 - **французы отнеслись прохладно**
 - Леверье написал Чалису — дир. Кембриджской обсерватории
 - Август 1846: Чалис неохотно начал поиски



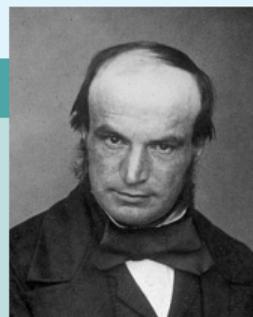
Планета — из конфликта наблюдений и уравнений

1781: У. Гершель случайно открыл планету Уран

- 1821: Бувар вычислил будущую орбиту Урана
 - кеплеров эллипс *нарушается* — влияние Юпитера и Сатурна
- Следующие 20 лет: Уран не следует предсказаниям
- Бувар († 1843) говорил о возможной неизвестной планете
 - решение **обратной** задачи: *X* — источник гравитации

Охота за неизвестной планетой

- С начала 1840-х за вычисления взялся Адамс
 - Требовались данные наблюдений; переписка с сэром Эйри
 - 1846: Адамс высказал предположение, где на небе могла бы находиться планета
- 1846: Леверье проделал свои вычисления, предложил астрономам найти планету
 - французы отнеслись прохладно
 - Леверье написал Чалису — дир. Кембриджской обсерватории
 - Август 1846: Чалис неохотно начал поиски



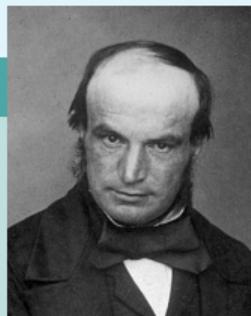
Планета — из конфликта наблюдений и уравнений

1781: У. Гершель случайно открыл планету Уран

- 1821: Бувар вычислил будущую орбиту Урана
 - кеплеров эллипс *нарушается* — влияние Юпитера и Сатурна
- Следующие 20 лет: Уран не следует предсказаниям
- Бувар († 1843) говорил о возможной неизвестной планете
 - решение **обратной** задачи: *X* — источник гравитации

Охота за неизвестной планетой

- С начала 1840-х за вычисления взялся Адамс
 - Требовались данные наблюдений; переписка с сэром Эйри
 - 1846: Адамс высказал предположение, где на небе могла бы находиться планета
- 1846: Лаверье проделал свои вычисления, предложил астрономам найти планету
 - французы отнеслись прохладно
 - Лаверье написал Чалису — дир. Кембриджской обсерватории
 - **Август 1846: Чалис неохотно начал поиски**



Планета — из конфликта наблюдений и уравнений

Охота за неизвестной планетой

- С начала 1840-х за вычисления взялся Адамс
 - Требовались данные наблюдений; переписка с сэром Эйри
 - 1846: Адамс высказал предположение, где на небе могла бы находиться планета
- 1846: Леверье проделал свои вычисления, предложил астрономам найти планету
 - французы отнеслись прохладно
 - Леверье написал Чалису — дир. Кембриджской обсерватории
 - Август 1846: Чалис неохотно начал поиски
- Леверье написал астроному Галле из Берлинской обсерватории
 - Рядом с Галле случился "аспирант" д'Арре.
 - Галле и д'Арре открыли планету ночью того же дня, когда получили письмо: 23 сентября 1846
 - Оказывается, Чалис тоже видел несколько раз, но не обратил внимания

Планета — из конфликта наблюдений и уравнений

Охота за неизвестной планетой

- С начала 1840-х за вычисления взялся Адамс
 - Требовались данные наблюдений; переписка с сэром Эйри
 - 1846: Адамс высказал предположение, где на небе могла бы находиться планета
- 1846: Леверье проделал свои вычисления, предложил астрономам найти планету
 - французы отнеслись прохладно
 - Леверье написал Чалису — дир. Кембриджской обсерватории
 - Август 1846: Чалис неохотно начал поиски
- Леверье написал астроному Галле из Берлинской обсерватории
 - **Рядом с Галле случился “аспирант” д’Арре.**
 - Галле и д’Арре открыли планету ночью того же дня, когда получили письмо: 23 сентября 1846
 - Оказывается, Чалис тоже видел несколько раз, но не обратил внимания

Планета — из конфликта наблюдений и уравнений

Охота за неизвестной планетой

- С начала 1840-х за вычисления взялся Адамс
 - Требовались данные наблюдений; переписка с сэром Эйри
 - 1846: Адамс высказал предположение, где на небе могла бы находиться планета
- 1846: Леверье проделал свои вычисления, предложил астрономам найти планету
 - французы отнеслись прохладно
 - Леверье написал Чалису — дир. Кембриджской обсерватории
 - Август 1846: Чалис неохотно начал поиски
- Леверье написал астроному Галле из Берлинской обсерватории
 - Рядом с Галле случился “аспирант” д’Арре.
 - Галле и д’Арре открыли планету ночью того же дня, когда получили письмо: 23 сентября 1846
 - Оказывается, Чалис тоже видел несколько раз, но не обратил внимания

Планета — из конфликта наблюдений и уравнений

Охота за неизвестной планетой

- С начала 1840-х за вычисления взялся Адамс
 - Требовались данные наблюдений; переписка с сэром Эйри
 - 1846: Адамс высказал предположение, где на небе могла бы находиться планета
- 1846: Леверье проделал свои вычисления, предложил астрономам найти планету
 - французы отнеслись прохладно
 - Леверье написал Чалису — дир. Кембриджской обсерватории
 - Август 1846: Чалис неохотно начал поиски
- Леверье написал астроному Галле из Берлинской обсерватории
 - Рядом с Галле случился “аспирант” д’Арре.
 - Галле и д’Арре открыли планету ночью того же дня, когда получили письмо: 23 сентября 1846
 - Оказывается, Чалис тоже видел несколько раз, но не обратил внимания

Планета — из конфликта наблюдений и уравнений

Охота за неизвестной планетой

- С начала 1840-х за вычисления взялся Адамс
 - Требовались данные наблюдений; переписка с сэром Эйри
 - 1846: Адамс высказал предположение, где на небе могла бы находиться планета
- 1846: Леверье проделал свои вычисления, предложил астрономам найти планету
 - французы отнеслись прохладно
 - Леверье написал Чалису — дир. Кембриджской обсерватории
 - Август 1846: Чалис неохотно начал поиски
- Леверье написал астроному Галле из Берлинской обсерватории
 - Рядом с Галле случился “аспирант” д’Арре
 - Галле и д’Арре открыли планету ночью телескопом
 - письмо: 23 сентября 1846
 - Оказывается, Чалис тоже видел несколько звезд

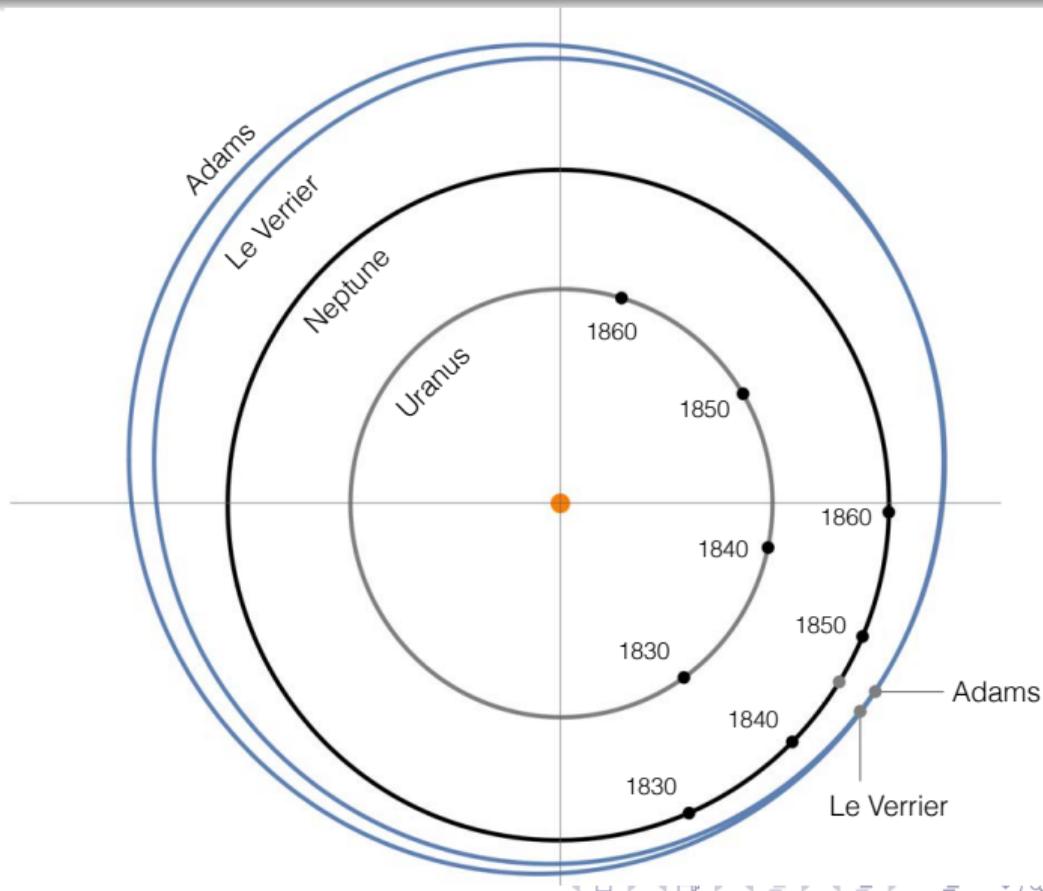


Нептун!

Уравнения указали на невидимое

Слагаемые успеха:

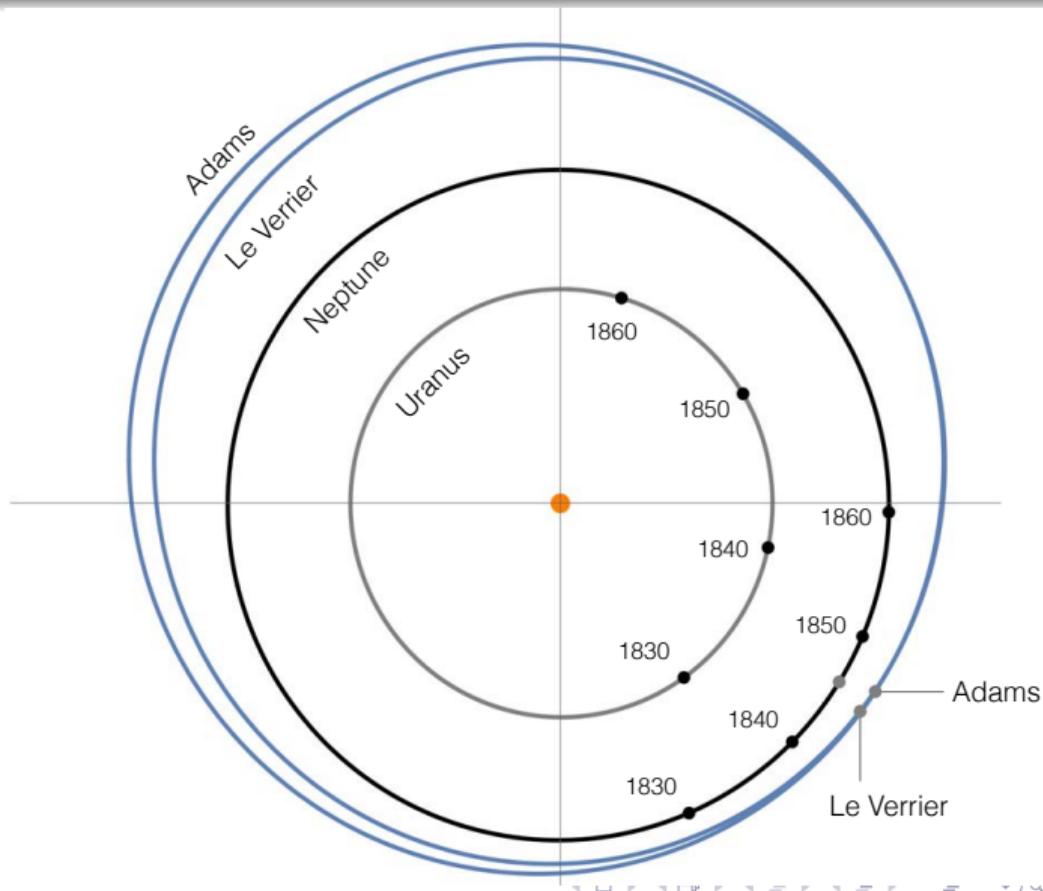
- “Правильные” уравнения
- Точность наблюдений(!)
- Аномалии: расхождение теории и наблюдений
- Рафинированный логический анализ (математика)
- Везение/удача



Уравнения указали на невидимое

Слагаемые успеха:

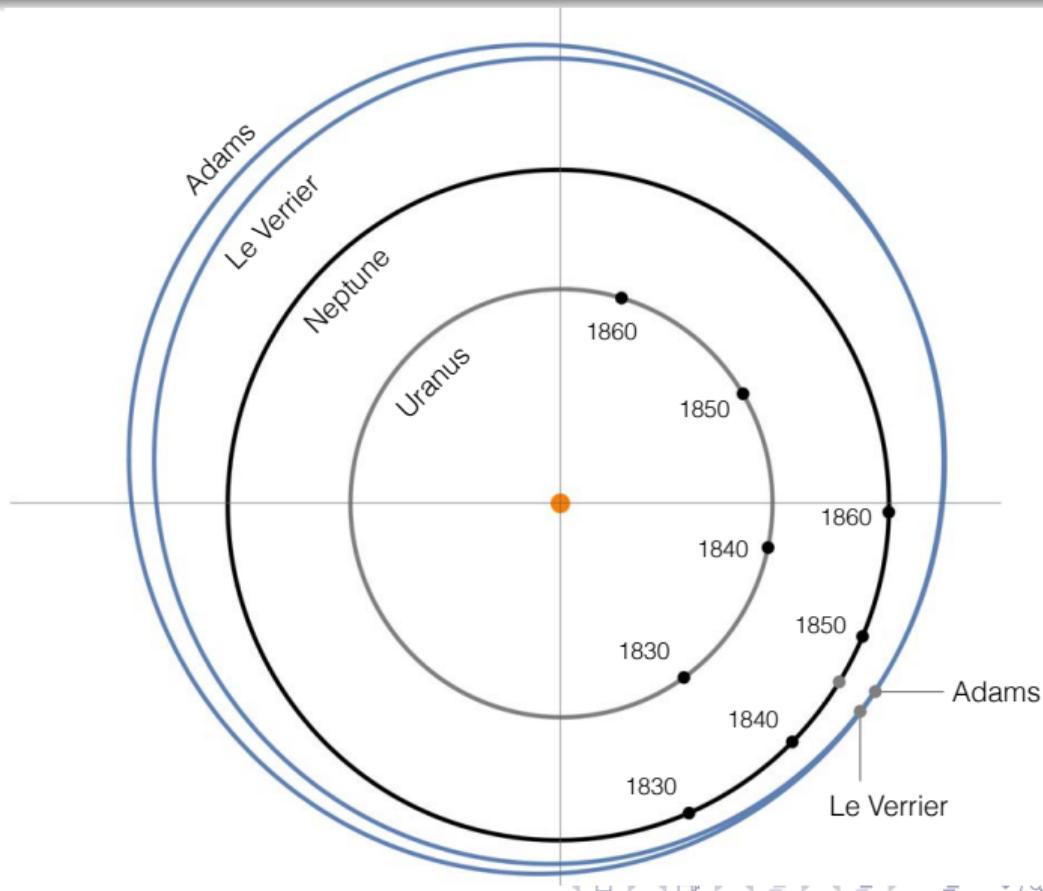
- “Правильные” уравнения
- Точность наблюдений(!)
- Аномалии: расхождение теории и наблюдений
- Рафинированный логический анализ (математика)
- Везение/удача



Уравнения указали на невидимое

Слагаемые успеха:

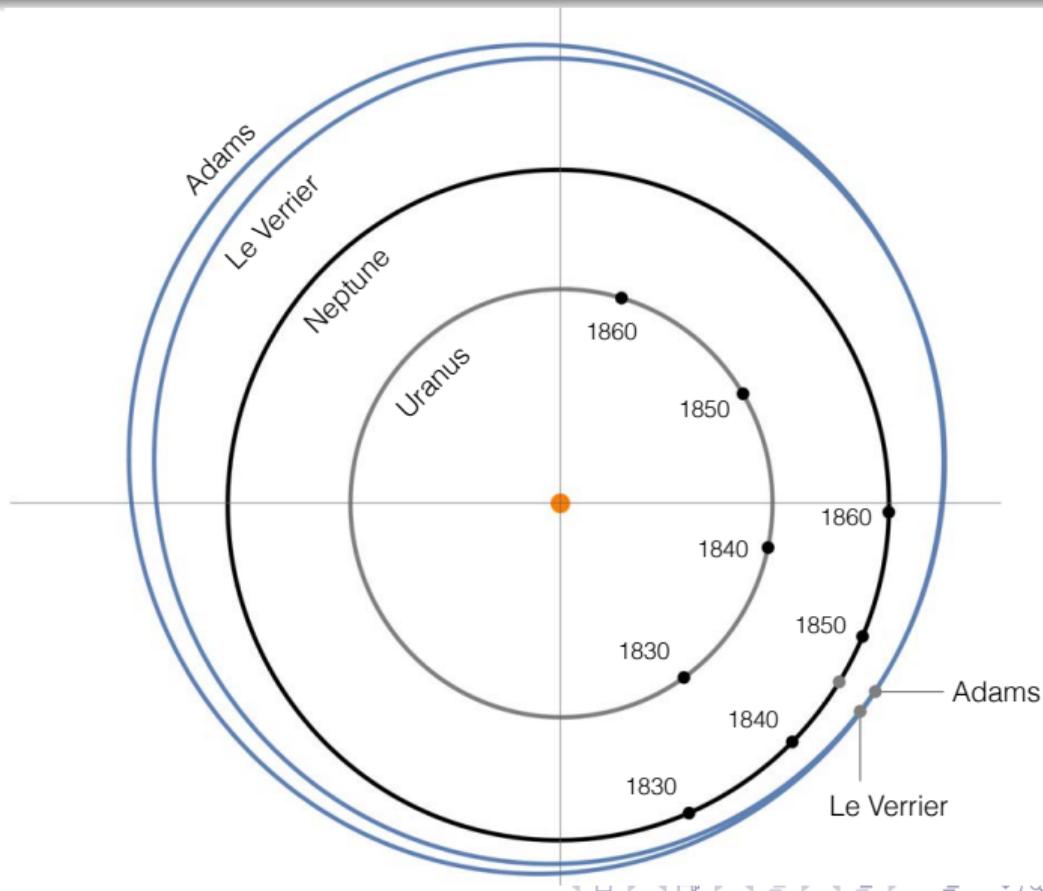
- “Правильные” уравнения
- Точность наблюдений(!)
- **Аномалии: расхождение теории и наблюдений**
- Рафинированный логический анализ (математика)
- Везение/удача



Уравнения указали на невидимое

Слагаемые успеха:

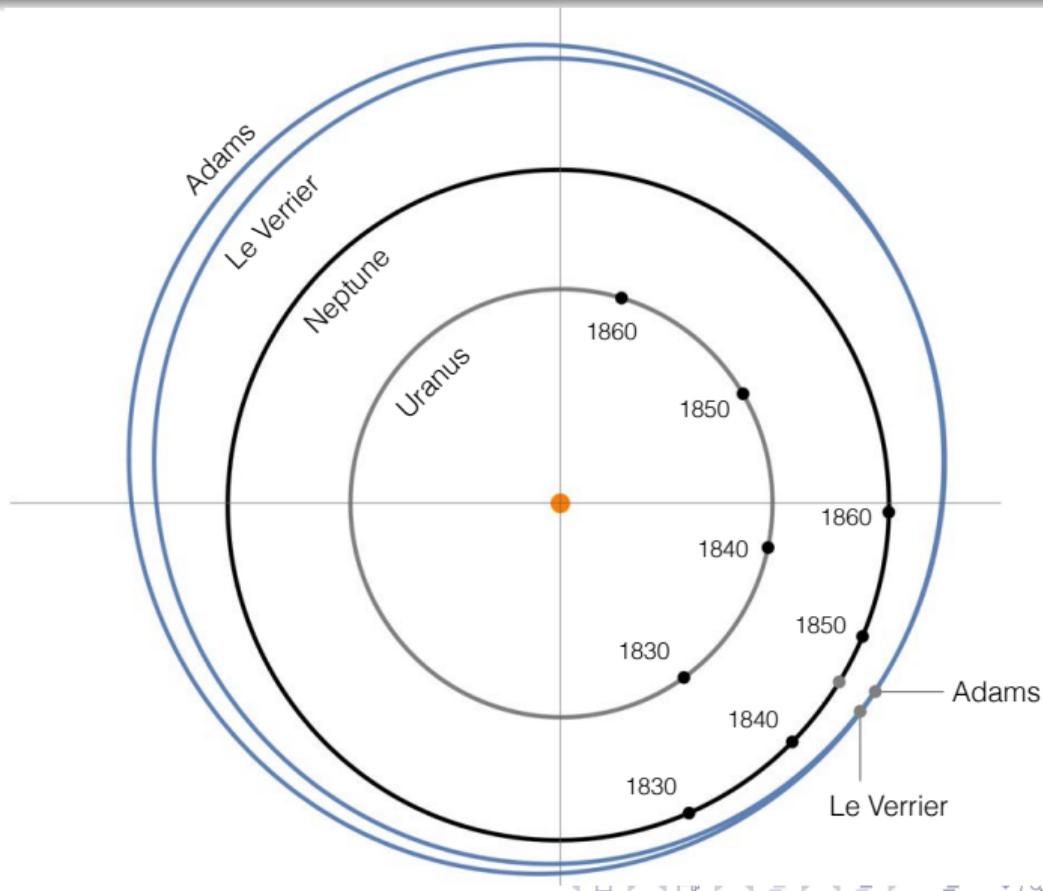
- “Правильные” уравнения
- Точность наблюдений(!)
- Аномалии: расхождение теории и наблюдений
- Рафинированный логический анализ (математика)
- Везение/удача



Уравнения указали на невидимое

Слагаемые успеха:

- “Правильные” уравнения
- Точность наблюдений(!)
- Аномалии: расхождение теории и наблюдений
- Рафинированный логический анализ (математика)
- Везение/удача



И тем не менее, уравнения Ньютона не точны!

Как передается информация о величине ускорения?

НЬЮТОН:
$$\left(\text{ускорение к Солнцу}\right) = G \frac{\left(\text{масса Солнца}\right)}{\left(\text{расстояние до Солнца}\right)^2}$$

- А если подвинуть Солнце в направлении какой-нибудь звезды — как скоро Земля “узнает” об этом?
- В законе всеобщего падения/тяготения вообще отсутствует время
- Кажется, что влияние передается мгновенно и через пустоту

Ньютон, 1692:

Положение дел, при котором гравитация была бы внутренним и неотъемлемым образом присуща материи так, чтобы одно тело воздействовало на другое на расстоянии через пустоту без посредничества чего бы то ни было еще, способного передавать воздействие или силу от одного тела к другому, представляется мне столь колоссальным абсурдом, что, как я полагаю, никто со сколько-нибудь развитым пониманием философских вопросов в него не впадет.

Ньютон опубликовал свой закон, осознавая, что он несовершенный

И тем не менее, уравнения Ньютона не точны!

Как передается информация о величине ускорения?

НЬЮТОН:
$$\left(\text{ускорение к Солнцу}\right) = G \frac{\left(\text{масса Солнца}\right)}{\left(\text{расстояние до Солнца}\right)^2}$$

- А если подвинуть Солнце в направлении какой-нибудь звезды — как скоро Земля “узнает” об этом?
- В законе всеобщего падения/тяготения вообще отсутствует время
- Кажется, что влияние передается мгновенно и через пустоту

Ньютон, 1692:

Положение дел, при котором гравитация была бы внутренним и неотъемлемым образом присуща материи так, чтобы одно тело воздействовало на другое на расстоянии через пустоту без посредничества чего бы то ни было еще, способного передавать воздействие или силу от одного тела к другому, представляется мне столь колоссальным абсурдом, что, как я полагаю, никто со сколько-нибудь развитым пониманием философских вопросов в него не впадет.

Ньютон опубликовал свой закон, осознавая, что он несовершенный

И тем не менее, уравнения Ньютона не точны!

Как передается информация о величине ускорения?

НЬЮТОН:
$$\text{(ускорение к Солнцу)} = G \frac{\text{(масса Солнца)}}{\text{(расстояние до Солнца)}^2}$$

- А если подвинуть Солнце в направлении какой-нибудь звезды — как скоро Земля “узнает” об этом?
- **В законе всеобщего падения/тяготения вообще отсутствует время**
- Кажется, что влияние передается мгновенно и через пустоту

Ньютон, 1692:

Положение дел, при котором гравитация была бы внутренним и неотъемлемым образом присуща материи так, чтобы одно тело воздействовало на другое на расстоянии через пустоту без посредничества чего бы то ни было еще, способного передавать воздействие или силу от одного тела к другому, представляется мне столь колоссальным абсурдом, что, как я полагаю, никто со сколько-нибудь развитым пониманием философских вопросов в него не впадет.

Ньютон опубликовал свой закон, осознавая, что он несовершенный

И тем не менее, уравнения Ньютона не точны!

Как передается информация о величине ускорения?

НЬЮТОН:
$$\text{(ускорение к Солнцу)} = G \frac{\text{(масса Солнца)}}{\text{(расстояние до Солнца)}^2}$$

- А если подвинуть Солнце в направлении какой-нибудь звезды — как скоро Земля “узнает” об этом?
- В законе всеобщего падения/тяготения вообще отсутствует время
- Кажется, что влияние передается мгновенно и через пустоту

Ньютон, 1692:

Положение дел, при котором гравитация была бы внутренним и неотъемлемым образом присуща материи так, чтобы одно тело воздействовало на другое на расстоянии через пустоту без посредничества чего бы то ни было еще, способного передавать воздействие или силу от одного тела к другому, представляется мне столь колоссальным абсурдом, что, как я полагаю, никто со сколько-нибудь развитым пониманием философских вопросов в него не впадет.

Ньютон опубликовал свой закон, осознавая, что он несовершенный

И тем не менее, уравнения Ньютона не точны!

Как передается информация о величине ускорения?

НЬЮТОН:
$$\left(\text{ускорение к Солнцу}\right) = G \frac{\left(\text{масса Солнца}\right)}{\left(\text{расстояние до Солнца}\right)^2}$$

- А если подвинуть Солнце в направлении какой-нибудь звезды — как скоро Земля “узнает” об этом?
- В законе всеобщего падения/тяготения вообще отсутствует время
- Кажется, что влияние передается мгновенно и через пустоту

Ньютон, 1692:

Положение дел, при котором гравитация была бы внутренним и неотъемлемым образом присуща материи так, чтобы одно тело воздействовало на другое на расстоянии через пустоту без посредничества чего бы то ни было еще, способного передавать воздействие или силу от одного тела к другому, представляется мне столь колоссальным абсурдом, что, как я полагаю, никто со сколько-нибудь развитым пониманием философских вопросов в него не впадет.

Ньютон опубликовал свой закон, осознавая, что он несовершенный

И тем не менее, уравнения Ньютона не точны!

Как передается информация о величине ускорения?

НЬЮТОН:
$$\left(\text{ускорение к Солнцу}\right) = G \frac{\left(\text{масса Солнца}\right)}{\left(\text{расстояние до Солнца}\right)^2}$$

- А если подвинуть Солнце в направлении какой-нибудь звезды — как скоро Земля “узнает” об этом?
- В законе всеобщего падения/тяготения вообще отсутствует время
- Кажется, что влияние передается мгновенно и через пустоту

Ньютон, 1692:

Положение дел, при котором гравитация была бы внутренним и неотъемлемым образом присуща материи так, чтобы одно тело воздействовало на другое на расстоянии через пустоту без посредничества чего бы то ни было еще, способного передавать воздействие или силу от одного тела к другому, представляется мне столь колоссальным абсурдом, что, как я полагаю, никто со сколько-нибудь развитым пониманием философских вопросов в него не впадет.

Ньютон опубликовал свой закон, осознавая, что он несовершенный

“Нептун наших дней” — ледяная супер-Земля

Занептунщина:



“Нептун наших дней” — ледяная супер-Земля

Занептунщина:



• Седна, 2012 VP₁₁₃, 2004 VN₁₁₂, 2010 GB₁₇₄, 2000 CR₁₀₅, 2010 VZ₉₈: аргументы перигелия

“Нептун наших дней” — ледяная супер-Земля

Занептунщина:



- Седна, 2012 VP₁₁₃, 2004 VN₁₁₂, 2010 GB₁₇₄, 2000 CR₁₀₅, 2010 VZ₉₈: аргументы перигелия
- Седна, 2012 VP₁₁₃, 2004 VN₁₁₂, 2010 GB₁₇₄, 2007 TG₄₂₂, 2013 RF₉₈: долготы перигелия

“Нептун наших дней” — ледяная супер-Земля

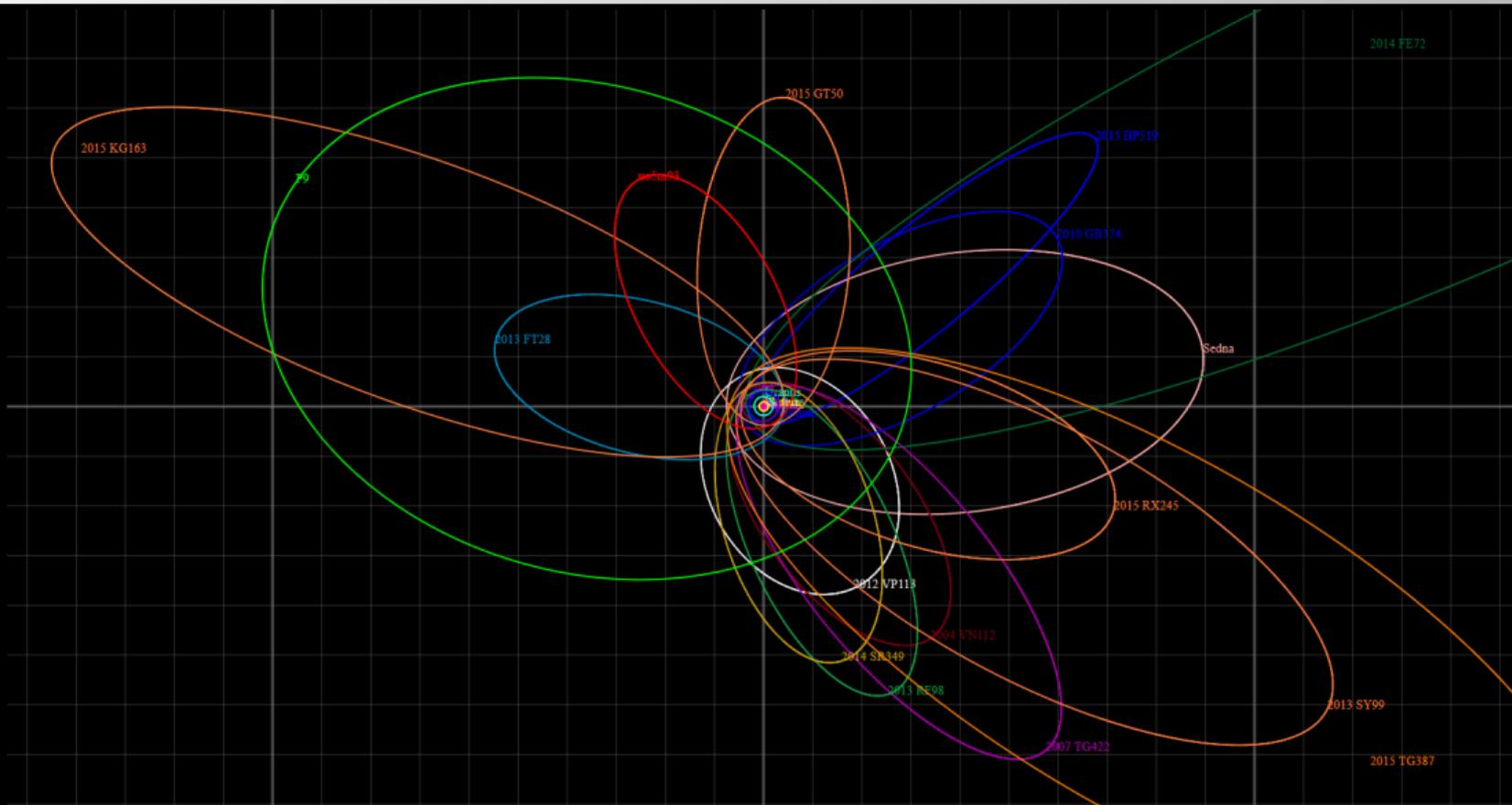
Занептунщина:



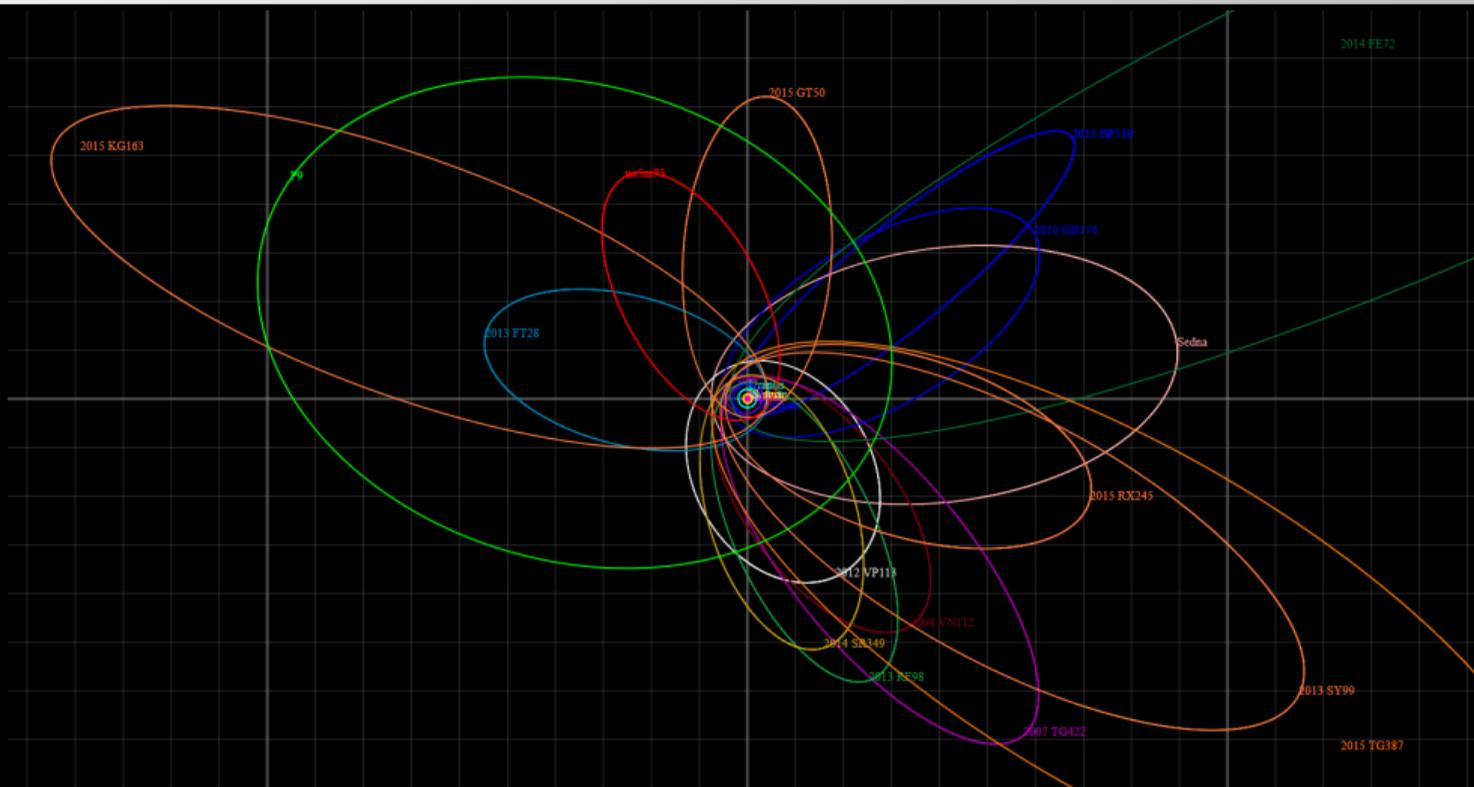
- Седна, 2012 VP₁₁₃, 2004 VN₁₁₂, 2010 GB₁₇₄, 2000 CR₁₀₅, 2010 VZ₉₈: аргументы перигелия
- Седна, 2012 VP₁₁₃, 2004 VN₁₁₂, 2010 GB₁₇₄, 2007 TG₄₂₂, 2013 RF₉₈: долготы перигелия

Причина?

“Нептун наших дней”: Планета 9

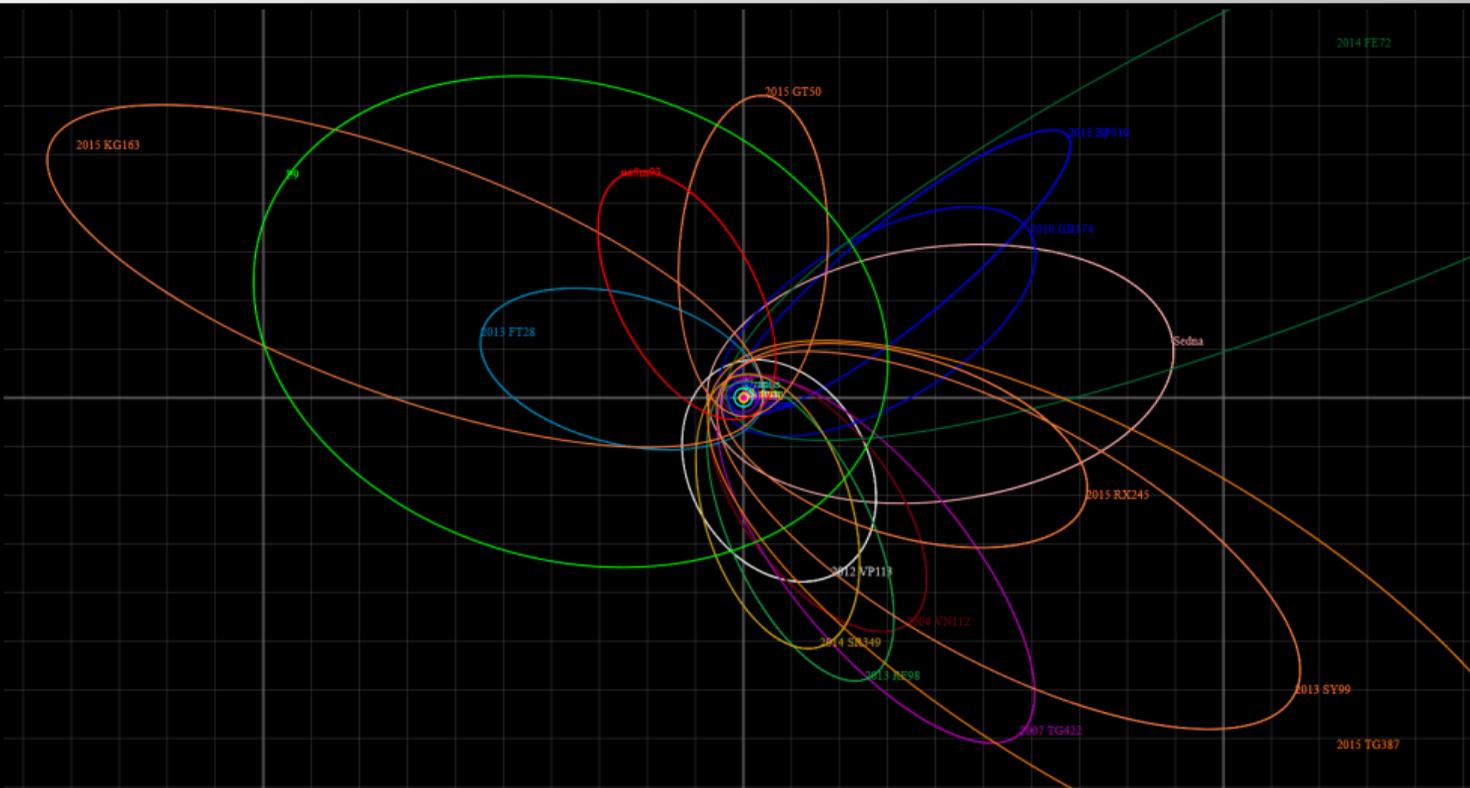


“Нептун наших дней”: Планета 9



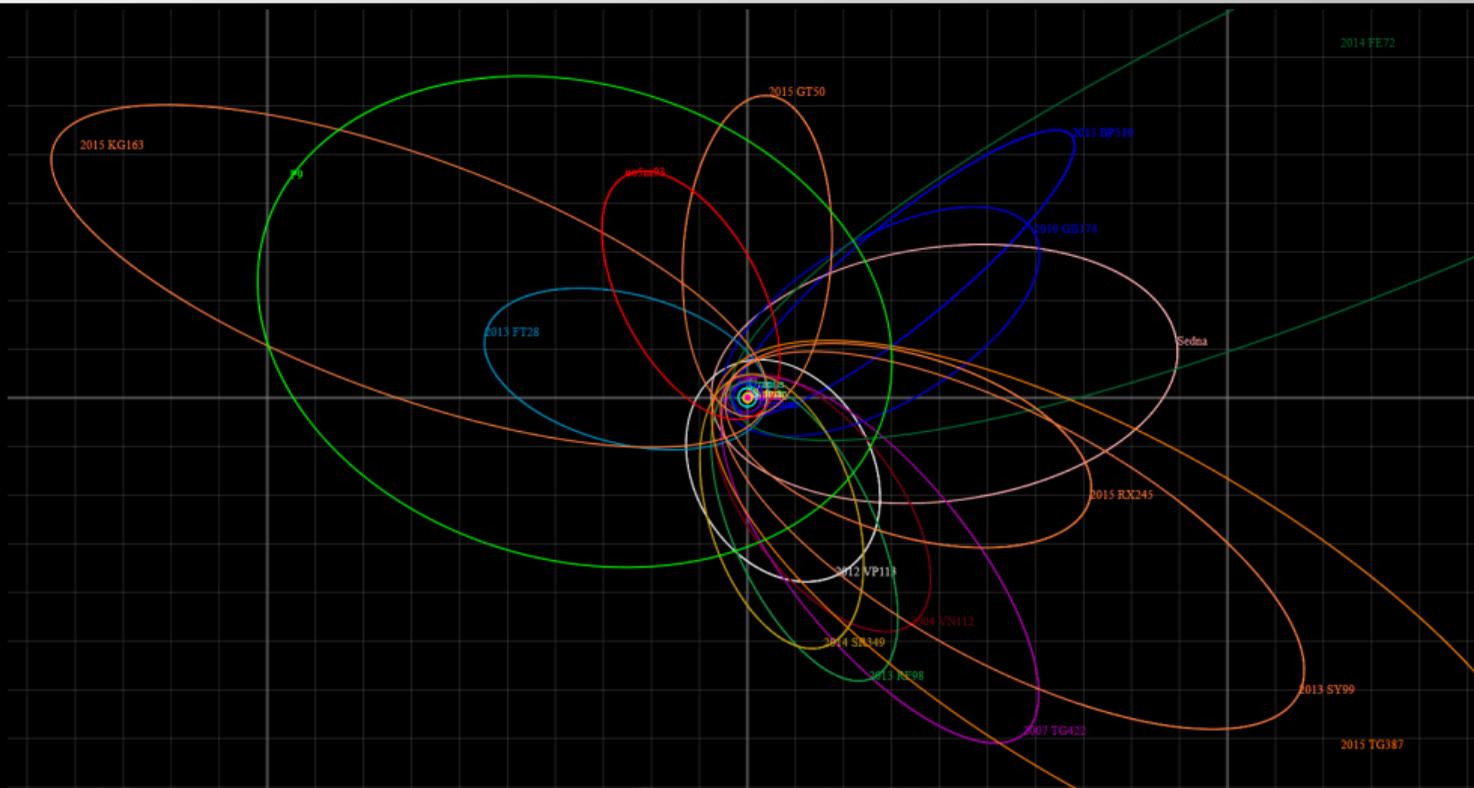
● Максимальное удаление от Солнца: 400–800 а.е.

“Нептун наших дней”: Планета 9



- Максимальное удаление от Солнца: 400–800 а.е.
- Масса: ок. 5 масс Земли

“Нептун наших дней”: Планета 9



- Максимальное удаление от Солнца: 400–800 а.е.
- Масса: ок. 5 масс Земли
(Откуда взялась? Как ее обнаружить?)

Кризис и триумф первого “великого объединения”

Новый вид материи из математического конфликта

Электричество и магнетизм: эмпирические законы

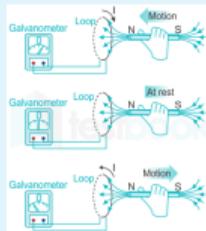
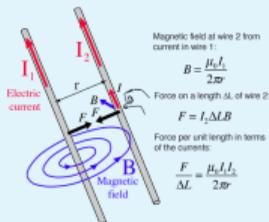
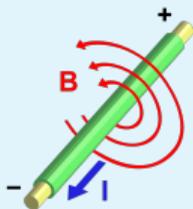
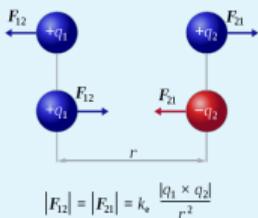
- Кулон (1760); Эрстед, Ампер (1820); Фарадей (1840)

Новая математика, чтобы собрать все вместе:

Новый вид материи из математического конфликта

Электричество и магнетизм: эмпирические законы

- Кулон (1760); Эрстед, Ампер (1820); Фарадей (1840)



Новая математика, чтобы собрать все вместе:

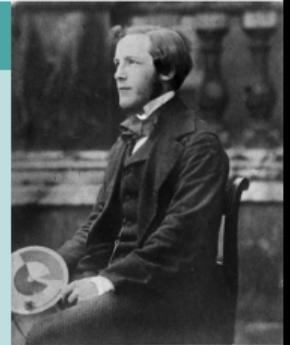
Новый вид материи из математического конфликта

Электричество и магнетизм: эмпирические законы

- Кулон (1760); Эрстед, Ампер (1820); Фарадей (1840)

Новая математика, чтобы собрать все вместе:

- **Максвелл, 1861: Векторное дифференциальное исчисление**
- Уравнения – *ЛУЧШАЯ формулировка опыта*



Новый вид материи из математического конфликта

Максвелл “волюнтаристски” изменил уравнения

$$\begin{array}{l} \partial_i D_i = 4\pi\rho, \\ \varepsilon_{ijk}\partial_j H_k = \frac{4\pi}{c} j_i, \\ \partial_i B_i = 0, \\ \varepsilon_{ijk}\partial_j E_k + \frac{1}{c}\frac{\partial B_i}{\partial t} = 0 \end{array} \quad \Rightarrow \quad \begin{array}{l} \partial_i D_i = 4\pi\rho, \\ \varepsilon_{ijk}\partial_j H_k - \frac{1}{c}\frac{\partial D_i}{\partial t} = \frac{4\pi}{c} j_i, \\ \partial_i B_i = 0, \\ \varepsilon_{ijk}\partial_j E_k + \frac{1}{c}\frac{\partial B_i}{\partial t} = 0 \end{array}$$

- Противоречие исчезло!

Но какой ценой:

• Максвелл ввел в уравнения магнитное поле, порожденное токами, движущимися с конечной скоростью

Герц обнаружил электромагнитные волны в 1888

• Герц обнаружил электромагнитные волны, порождая их, замыкая и размыкая цепь

Новый вид материи из математического конфликта

Максвелл “волюнтаристски” изменил уравнения

$$\begin{array}{lcl} \partial_i D_i = 4\pi\rho, & & \partial_i D_i = 4\pi\rho, \\ \varepsilon_{ijk}\partial_j H_k = \frac{4\pi}{c} j_i, & \Rightarrow & \varepsilon_{ijk}\partial_j H_k - \frac{1}{c} \frac{\partial D_i}{\partial t} = \frac{4\pi}{c} j_i, \\ \partial_i B_i = 0, & & \partial_i B_i = 0, \\ \varepsilon_{ijk}\partial_j E_k + \frac{1}{c} \frac{\partial B_i}{\partial t} = 0 & & \varepsilon_{ijk}\partial_j E_k + \frac{1}{c} \frac{\partial B_i}{\partial t} = 0 \end{array}$$

- Противоречие исчезло!

Но какой ценой:

Герц обнаружил электромагнитные волны в 1888

Новый вид материи из математического конфликта

Максвелл “волюнтаристски” изменил уравнения

$$\begin{array}{lcl} \partial_i D_i = 4\pi\rho, & & \partial_i D_i = 4\pi\rho, \\ \varepsilon_{ijk}\partial_j H_k = \frac{4\pi}{c} j_i, & \Rightarrow & \varepsilon_{ijk}\partial_j H_k - \frac{1}{c} \frac{\partial D_i}{\partial t} = \frac{4\pi}{c} j_i, \\ \partial_i B_i = 0, & & \partial_i B_i = 0, \\ \varepsilon_{ijk}\partial_j E_k + \frac{1}{c} \frac{\partial B_i}{\partial t} = 0 & & \varepsilon_{ijk}\partial_j E_k + \frac{1}{c} \frac{\partial B_i}{\partial t} = 0 \end{array}$$

- Противоречие исчезло!

Но какой ценой:

Герц обнаружил электромагнитные волны в 1888

Новый вид материи из математического конфликта

Максвелл “волюнтаристски” изменил уравнения

$$\begin{array}{lcl} \partial_i D_i = 4\pi\rho, & & \partial_i D_i = 4\pi\rho, \\ \varepsilon_{ijk}\partial_j H_k = \frac{4\pi}{c} j_i, & \Rightarrow & \varepsilon_{ijk}\partial_j H_k - \frac{1}{c} \frac{\partial D_i}{\partial t} = \frac{4\pi}{c} j_i, \\ \partial_i B_i = 0, & & \partial_i B_i = 0, \\ \varepsilon_{ijk}\partial_j E_k + \frac{1}{c} \frac{\partial B_i}{\partial t} = 0 & & \varepsilon_{ijk}\partial_j E_k + \frac{1}{c} \frac{\partial B_i}{\partial t} = 0 \end{array}$$

- Противоречие исчезло!

Но какой ценой:

- У новых уравнений появились решения ранее неизвестного вида

Герц обнаружил электромагнитные волны в 1888

Новый вид материи из математического конфликта

Максвелл “волюнтаристски” изменил уравнения

$$\begin{array}{l} \partial_i D_i = 4\pi\rho, \\ \varepsilon_{ijk}\partial_j H_k = \frac{4\pi}{c} j_i, \\ \partial_i B_i = 0, \\ \varepsilon_{ijk}\partial_j E_k + \frac{1}{c}\frac{\partial B_i}{\partial t} = 0 \end{array} \quad \Rightarrow \quad \begin{array}{l} \partial_i D_i = 4\pi\rho, \\ \varepsilon_{ijk}\partial_j H_k - \frac{1}{c}\frac{\partial D_i}{\partial t} = \frac{4\pi}{c} j_i, \\ \partial_i B_i = 0, \\ \varepsilon_{ijk}\partial_j E_k + \frac{1}{c}\frac{\partial B_i}{\partial t} = 0 \end{array}$$

- Противоречие исчезло!

Но какой ценой:

- У новых уравнений появились решения ранее неизвестного вида
 - Электрическое и магнитное поле поддерживают друг друга и распространяются с постоянной скоростью
 - Максвелл вычислил их скорость: это скорость света

Герц обнаружил электромагнитные волны в 1888

Новый вид материи из математического конфликта

Максвелл “волютаристски” изменил уравнения

$$\begin{array}{lcl} \partial_i D_i = 4\pi\rho, & & \partial_i D_i = 4\pi\rho, \\ \varepsilon_{ijk}\partial_j H_k = \frac{4\pi}{c} j_i, & \Rightarrow & \varepsilon_{ijk}\partial_j H_k - \frac{1}{c} \frac{\partial D_i}{\partial t} = \frac{4\pi}{c} j_i, \\ \partial_i B_i = 0, & & \partial_i B_i = 0, \\ \varepsilon_{ijk}\partial_j E_k + \frac{1}{c} \frac{\partial B_i}{\partial t} = 0 & & \varepsilon_{ijk}\partial_j E_k + \frac{1}{c} \frac{\partial B_i}{\partial t} = 0 \end{array}$$

- Противоречие исчезло!

Но какой ценой:

- У новых уравнений появились решения ранее неизвестного вида
 - Электрическое и магнитное поле поддерживают друг друга и распространяются с постоянной скоростью
 - Максвелл вычислил их скорость: это скорость света

Герц обнаружил электромагнитные волны в 1888

Новый вид материи из математического конфликта

Максвелл “волюнтаристски” изменил уравнения

$$\begin{array}{lcl} \partial_i D_i = 4\pi\rho, & & \partial_i D_i = 4\pi\rho, \\ \varepsilon_{ijk}\partial_j H_k = \frac{4\pi}{c} j_i, & \Rightarrow & \varepsilon_{ijk}\partial_j H_k - \frac{1}{c} \frac{\partial D_i}{\partial t} = \frac{4\pi}{c} j_i, \\ \partial_i B_i = 0, & & \partial_i B_i = 0, \\ \varepsilon_{ijk}\partial_j E_k + \frac{1}{c} \frac{\partial B_i}{\partial t} = 0 & & \varepsilon_{ijk}\partial_j E_k + \frac{1}{c} \frac{\partial B_i}{\partial t} = 0 \end{array}$$

- Противоречие исчезло!

Но какой ценой:

- У новых уравнений появились решения ранее неизвестного вида
 - Электрическое и магнитное поле поддерживают друг друга и распространяются с постоянной скоростью
 - Максвелл вычислил их скорость: это **скорость света**

Герц обнаружил электромагнитные волны в 1888

Новый вид материи из математического конфликта

Максвелл “волютаристски” изменил уравнения

$$\begin{array}{l} \partial_i D_i = 4\pi\rho, \\ \varepsilon_{ijk}\partial_j H_k = \frac{4\pi}{c} j_i, \\ \partial_i B_i = 0, \\ \varepsilon_{ijk}\partial_j E_k + \frac{1}{c} \frac{\partial B_i}{\partial t} = 0 \end{array} \quad \Rightarrow \quad \begin{array}{l} \partial_i D_i = 4\pi\rho, \\ \varepsilon_{ijk}\partial_j H_k - \frac{1}{c} \frac{\partial D_i}{\partial t} = \frac{4\pi}{c} j_i, \\ \partial_i B_i = 0, \\ \varepsilon_{ijk}\partial_j E_k + \frac{1}{c} \frac{\partial B_i}{\partial t} = 0 \end{array}$$

- Противоречие исчезло!



Но какой ценой:

- У новых уравнений появились решения ранее неизвестного вида
 - Электрическое и магнитное поле поддерживают друг друга и распространяются с постоянной скоростью
 - Максвелл вычислил их скорость: это **скорость света**

Герц обнаружил электромагнитные волны в 1888

- Так выяснилась электромагнитная природа света, радиоволн итд.

Новый вид материи из математического конфликта

Максвелл “волютаристски” изменил уравнения

$$\begin{aligned} \partial_i D_i &= 4\pi\rho, & \partial_i D_i &= 4\pi\rho, \\ \varepsilon_{ijk}\partial_j H_k &= \frac{4\pi}{c} j_i, & \varepsilon_{ijk}\partial_j H_k - \frac{1}{c} \frac{\partial D_i}{\partial t} &= \frac{4\pi}{c} j_i, \\ \partial_i B_i &= 0, & \partial_i B_i &= 0, \\ \varepsilon_{ijk}\partial_j E_k + \frac{1}{c} \frac{\partial B_i}{\partial t} &= 0, & \varepsilon_{ijk}\partial_j E_k + \frac{1}{c} \frac{\partial B_i}{\partial t} &= 0, \end{aligned} \quad \Rightarrow$$

- Противоречие исчезло!

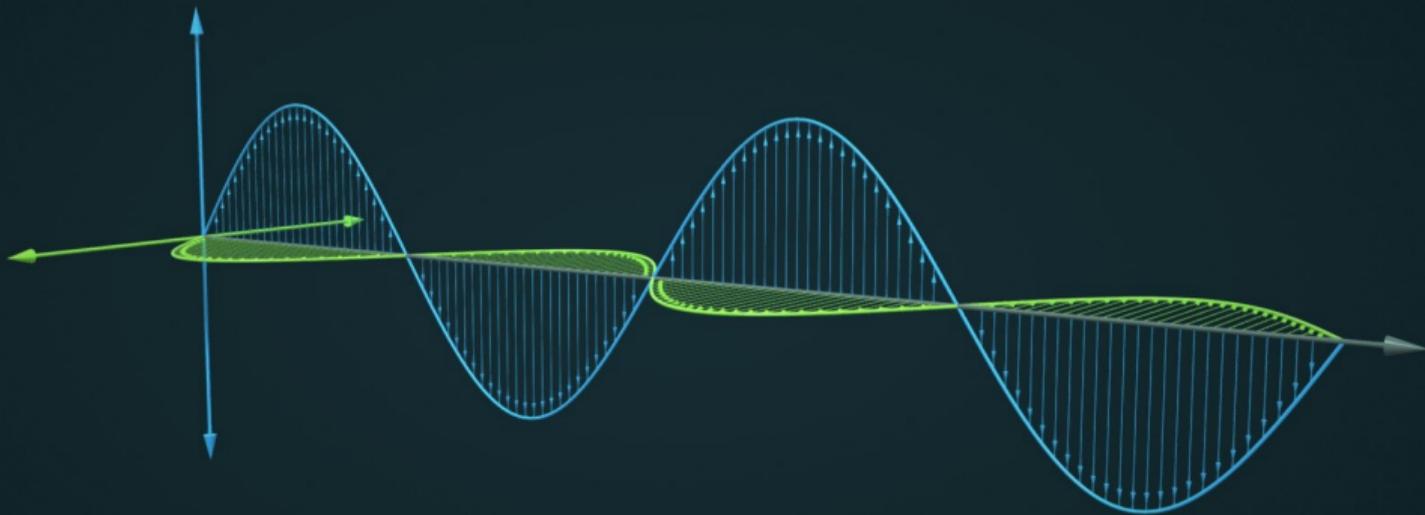


Но какой ценой:

- У новых уравнений появились решения ранее неизвестного вида
 - Электрическое и магнитное поле поддерживают друг друга и распространяются с постоянной скоростью
 - Максвелл вычислил их скорость: это **скорость света**

Герц обнаружил электромагнитные волны в 1888

- Так выяснилась электромагнитная природа света, радиоволн итд.



Куда может **завести** красота формул

Открытие “второй половины мира” (1928–1931)

Главные новые концепции 20 века:

- Специальная теория относительности (1905)
 -
- Квантовая механика (1925/26)
 -

Но: уравнение Шрёдингера не согласуется с теорией относительности

Дирак, 1928: задался целью совместить две идеи

Открытие “второй половины мира” (1928–1931)

Главные новые концепции 20 века:

- Специальная теория относительности (1905)
 - законы природы одинаковы для всех равномерно движущихся наблюдателей
- Квантовая механика (1925/26)
 - ...

Но: уравнение Шрёдингера не согласуется с теорией относительности

Дирак, 1928: задался целью совместить две идеи

Открытие “второй половины мира” (1928–1931)

Главные новые концепции 20 века:

- Специальная теория относительности (1905)
 - законы природы одинаковы для всех равномерно движущихся наблюдателей
- Квантовая механика (1925/26)

Но: уравнение Шрёдингера не согласуется с теорией относительности

Дирак, 1928: задался целью совместить две идеи

Открытие “второй половины мира” (1928–1931)

Главные новые концепции 20 века:

- Специальная теория относительности (1905)
 - законы природы одинаковы для всех равномерно движущихся наблюдателей
- Квантовая механика (1925/26)
 - мир описывается волновой функцией, подчиненной уравнению Шрёдингера

Но: уравнение Шрёдингера не согласуется с теорией относительности

Дирак, 1928: задался целью совместить две идеи

Открытие “второй половины мира” (1928–1931)

Главные новые концепции 20 века:

- Специальная теория относительности (1905)
 - законы природы одинаковы для всех равномерно движущихся наблюдателей
- Квантовая механика (1925/26)
 - мир описывается волновой функцией, подчиненной уравнению Шрёдингера

Но: уравнение Шрёдингера не согласуется с теорией относительности

Дирак, 1928: задался целью совместить две идеи

Открытие “второй половины мира” (1928–1931)

Главные новые концепции 20 века:

- Специальная теория относительности (1905)
 - законы природы одинаковы для всех равномерно движущихся наблюдателей
- Квантовая механика (1925/26)
 - мир описывается волновой функцией, подчиненной уравнению Шрёдингера

Но: уравнение Шрёдингера не согласуется с теорией относительности

Дирак, 1928: задался целью совместить две идеи

Открытие “второй половины мира” (1928–1931)

Главные новые концепции 20 века:

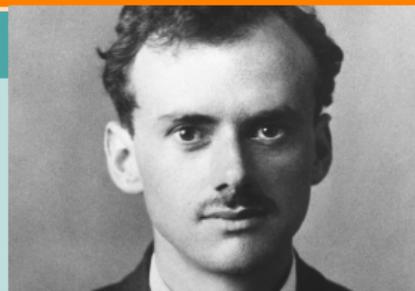
- Специальная теория относительности (1905)
 - законы природы одинаковы для всех равномерно движущихся наблюдателей
- Квантовая механика (1925/26)
 - мир описывается волновой функцией, подчиненной уравнению Шрёдингера

Но: уравнение Шрёдингера не согласуется с теорией относительности

Дирак, 1928: задался целью совместить две идеи

- Написать новое уравнение для электрона, согласованное с теорией относительности
- Пожелал, чтобы уравнение удовлетворяло определенным формальным требованиям
- Пришлось придумать новую математику

$\gamma_\mu \gamma_\nu + \gamma_\nu \gamma_\mu = \delta_{\mu,\nu}$ (следующий шаг за векторным и тензорным исчислением)



Открытие “второй половины мира” (1928–1931)

Главные новые концепции 20 века:

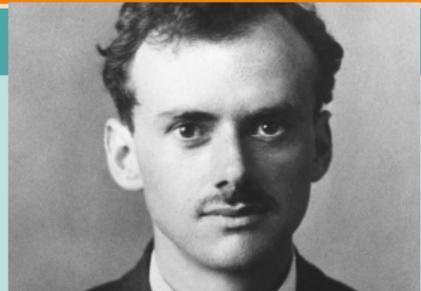
- Специальная теория относительности (1905)
 - законы природы одинаковы для всех равномерно движущихся наблюдателей
- Квантовая механика (1925/26)
 - мир описывается волновой функцией, подчиненной уравнению Шрёдингера

Но: уравнение Шрёдингера не согласуется с теорией относительности

Дирак, 1928: задался целью совместить две идеи

- Написать новое уравнение для электрона, согласованное с теорией относительности
- Пожелал, чтобы уравнение удовлетворяло определенным формальным требованиям
- Пришлось придумать новую математику

$\gamma_\mu \gamma_\nu + \gamma_\nu \gamma_\mu = \delta_{\mu,\nu}$ (следующий шаг за векторным и тензорным исчислением)



Открытие “второй половины мира” (1928–1931)

Главные новые концепции 20 века:

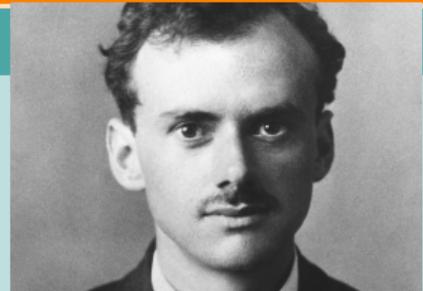
- Специальная теория относительности (1905)
 - законы природы одинаковы для всех равномерно движущихся наблюдателей
- Квантовая механика (1925/26)
 - мир описывается волновой функцией, подчиненной уравнению Шрёдингера

Но: уравнение Шрёдингера не согласуется с теорией относительности

Дирак, 1928: задался целью совместить две идеи

- Написать новое уравнение для электрона, согласованное с теорией относительности
- Пожелал, чтобы уравнение удовлетворяло определенным формальным требованиям
- Пришлось придумать новую математику

$\gamma_\mu \gamma_\nu + \gamma_\nu \gamma_\mu = \delta_{\mu,\nu}$ (следующий шаг за векторным и тензорным исчислением)



Открытие “второй половины мира” (1928–1931)

Главные новые концепции 20 века:

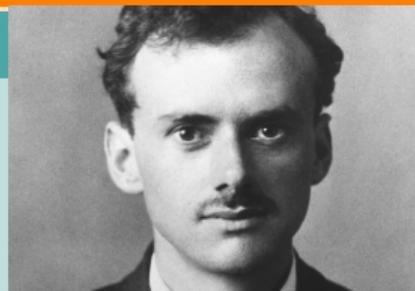
- Специальная теория относительности (1905)
 - законы природы одинаковы для всех равномерно движущихся наблюдателей
- Квантовая механика (1925/26)
 - мир описывается волновой функцией, подчиненной уравнению Шрёдингера

Но: уравнение Шрёдингера не согласуется с теорией относительности

Дирак, 1928: задался целью совместить две идеи

- Написать новое уравнение для электрона, согласованное с теорией относительности
- Пожелал, чтобы уравнение удовлетворяло определенным формальным требованиям
- Пришлось придумать новую математику

$\gamma_\mu \gamma_\nu + \gamma_\nu \gamma_\mu = \delta_{\mu,\nu}$ (следующий шаг за векторным и тензорным исчислением)



Уравнение Дирака $i\hbar \gamma^\mu \partial_\mu \psi - m c \psi = 0$

Идея: решения уравнения должны описывать электрон

Половина решений — “хорошие”

Электрон с энергией $E > mc^2$ и импульсом $p < mc$ — это электрон, движущийся со скоростью $v < c$

Но половина решений — “плохие”

Электрон с энергией $E > mc^2$ и импульсом $p > mc$ — это электрон, движущийся со скоростью $v > c$
Электрон с энергией $E < mc^2$ и импульсом $p < mc$ — это электрон, движущийся со скоростью $v < c$
Электрон с энергией $E < mc^2$ и импульсом $p > mc$ — это электрон, движущийся со скоростью $v > c$

Даже для хороших решений — парадокс:

От энергетического барьера отражается больше электронов, чем прилетает

Уравнение Дирака $i\hbar \gamma^\mu \partial_\mu \psi - m c \psi = 0$

Идея: решения уравнения должны описывать электрон

Половина решений — “хорошие”

- даже более точное совпадение с экспериментом, чем для уравнения Шрёдингера

Но половина решений — “плохие”

- отрицательная энергия (отраженный нейтрон / антадрон)
- “дырки” (отрицательная масса / отрицательная зарядовая пара)
- Но если для электрона, то это должен быть позитрон (антиэлектрон)

Даже для хороших решений — парадокс:

- от энергетического барьера отражается больше электронов, чем прилетает

Уравнение Дирака $i\hbar \gamma^\mu \partial_\mu \psi - mc\psi = 0$

Идея: решения уравнения должны описывать электрон

Половина решений — “хорошие”

- даже более точное совпадение с экспериментом, чем для уравнения Шрёдингера

Но половина решений — “плохие”

К сожалению, эти “плохие” решения имеют отрицательную энергию и отрицательный заряд. Это означает, что они описывают позитроны, а не электроны.

Даже для хороших решений — парадокс:

от энергетического барьера отражается больше электронов, чем прилетает!

Уравнение Дирака $i\hbar \gamma^\mu \partial_\mu \psi - m c \psi = 0$

Идея: решения уравнения должны описывать электрон

Половина решений — “хорошие”

- даже более точное совпадение с экспериментом, чем для уравнения Шрёдингера

Но половина решений — “плохие”

- описывают электрон с отрицательной массой/энергией
- От “плохих” решений математически невозможно избавиться
- Но если они существуют, то мир должен исчезнуть в яркой вспышке

Даже для хороших решений — парадокс:

от энергетического барьера отражается больше электронов, чем прилетает

Уравнение Дирака $i\hbar \gamma^\mu \partial_\mu \psi - m c \psi = 0$

Идея: решения уравнения должны описывать электрон

Половина решений — “хорошие”

- даже более точное совпадение с экспериментом, чем для уравнения Шрёдингера

Но половина решений — “плохие”

- описывают электрон с отрицательной массой/энергией
- От “плохих” решений математически невозможно избавиться
- Но если они существуют, то мир должен исчезнуть в яркой вспышке

Даже для хороших решений — парадокс:

от энергетического барьера отражается больше электронов, чем прилетает

Уравнение Дирака $i\hbar \gamma^\mu \partial_\mu \psi - m c \psi = 0$

Идея: решения уравнения должны описывать электрон

Половина решений — “хорошие”

- даже более точное совпадение с экспериментом, чем для уравнения Шрёдингера

Но половина решений — “плохие”

- описывают электрон с отрицательной массой/энергией
- От “плохих” решений математически невозможно избавиться
- Но если они существуют, то мир должен исчезнуть в яркой вспышке

Даже для хороших решений — парадокс:

от энергетического барьера отражается больше электронов, чем приходит

Уравнение Дирака $i\hbar \gamma^\mu \partial_\mu \psi - m c \psi = 0$

Идея: решения уравнения должны описывать электрон

Половина решений — “хорошие”

- даже более точное совпадение с экспериментом, чем для уравнения Шрёдингера

Но половина решений — “плохие”

- описывают электрон с отрицательной массой/энергией
- От “плохих” решений математически невозможно избавиться
- Но если они существуют, то мир должен исчезнуть в яркой вспышке

“Хорошие” электроны отдадут энергию в виде света
и “упадут” в состояния с отрицательной энергией



Даже для хороших решений – парадокс:

Электрон не может барьер прорваться больше электронов, чем там есть

Уравнение Дирака $i\hbar \gamma^\mu \partial_\mu \psi - m c \psi = 0$

Идея: решения уравнения должны описывать электрон

Половина решений — “хорошие”

- даже более точное совпадение с экспериментом, чем для уравнения Шрёдингера

Но половина решений — “плохие”

- описывают электрон с отрицательной массой/энергией
- От “плохих” решений математически невозможно избавиться
- Но если они существуют, то мир должен исчезнуть в яркой вспышке
“Хорошие” электроны отдадут энергию в виде света
и “упадут” в состояния с отрицательной энергией



Даже для хороших решений – парадокс:

Если бы существовали состояния с отрицательной энергией, то они бы испускали свет.

Уравнение Дирака $i\hbar \gamma^\mu \partial_\mu \psi - m c \psi = 0$

Идея: решения уравнения должны описывать электрон

Половина решений — “хорошие”

- даже более точное совпадение с экспериментом, чем для уравнения Шрёдингера

Но половина решений — “плохие”

- описывают электрон с отрицательной массой/энергией
- От “плохих” решений математически невозможно избавиться
- Но если они существуют, то мир должен исчезнуть в яркой вспышке
“Хорошие” электроны отдадут энергию в виде света
и “упадут” в состояния с отрицательной энергией



Даже для хороших решений — парадокс:

- от энергетического барьера отражается больше электронов, чем прилетает

Уравнение Дирака $i\hbar \gamma^\mu \partial_\mu \psi - m c \psi = 0$

Идея: решения уравнения должны описывать электрон

Половина решений — “хорошие”

- даже более точное совпадение с экспериментом, чем для уравнения Шрёдингера

Но половина решений — “плохие”

- описывают электрон с отрицательной массой/энергией
- От “плохих” решений математически невозможно избавиться
- Но если они существуют, то мир должен исчезнуть в яркой вспышке
“Хорошие” электроны отдадут энергию в виде света
и “упадут” в состояния с отрицательной энергией



Даже для хороших решений — парадокс:

- от энергетического барьера отражается больше электронов, чем прилетает

Уравнение Дирака $i\hbar \gamma^\mu \partial_\mu \psi - m c \psi = 0$

Идея: решения уравнения должны описывать электрон

Половина решений — “хорошие”

- даже более точное совпадение с экспериментом, чем для уравнения Шрёдингера

Но половина решений — “плохие”

- описывают электрон с отрицательной массой/энергией
- От “плохих” решений математически невозможно избавиться
- Но если они существуют, то мир должен исчезнуть в яркой вспышке
“Хорошие” электроны отдадут энергию в виде света
и “упадут” в состояния с отрицательной энергией



Даже для хороших решений — парадокс:

- от энергетического барьера отражается больше электронов, чем прилетает

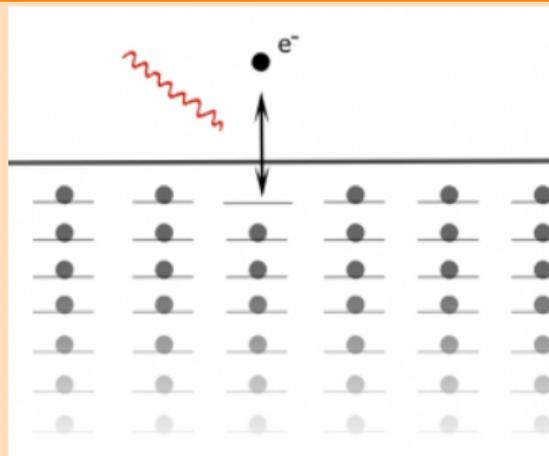
Уравнение **не** годится?

Придуманная математика не адекватна миру?

Открытие “второй половины мира” (1928–1931)

Упрямство Дирака: “море” электронов с отрицательной энергией

- Бесконечно много электронов с отрицательной энергией заполняют все возможные состояния
- Обычным электронам с положительной энергией “некуда упасть”
- Это море нельзя наблюдать (!)
- Получив большую энергию, электрон может вырваться из моря и стать обычным электроном с положительной энергией
- “Дырка” в море воспринимается как ЧАСТИЦА с положительной массой и положительным зарядом



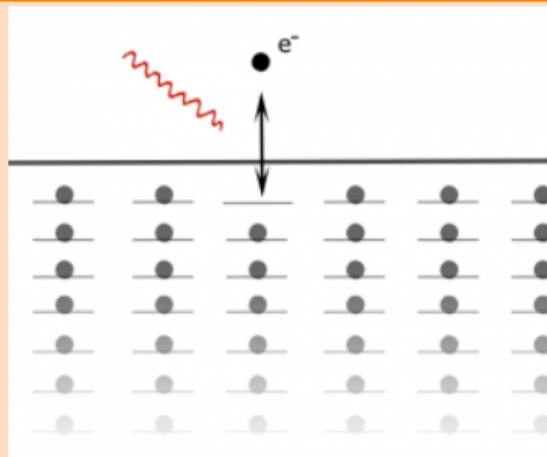
Единственная известная частица с положительным зарядом — протон

Протон в 1837 раз массивнее электрона

Открытие “второй половины мира” (1928–1931)

Упрямство Дирака: “море” электронов с отрицательной энергией

- Бесконечно много электронов с отрицательной энергией заполняют все возможные состояния
- Обычным электронам с положительной энергией “некуда упасть”
- Это море нельзя наблюдать (!)
- Получив большую энергию, электрон может вырваться из моря и стать обычным электроном с положительной энергией
- “Дырка” в море воспринимается как ЧАСТИЦА с положительной массой и положительным зарядом



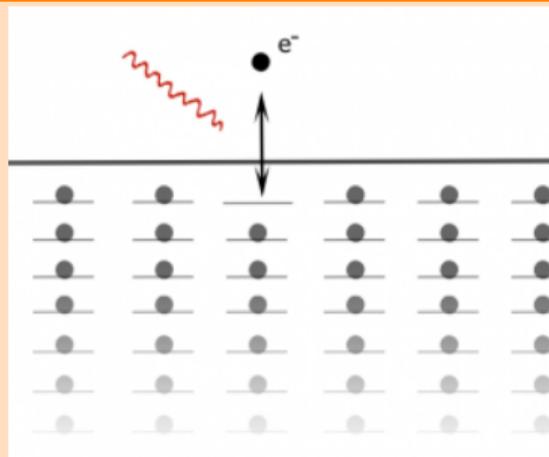
Единственная известная частица с положительным зарядом — протон

Протон в 1837 раз массивнее электрона

Открытие “второй половины мира” (1928–1931)

Упрямство Дирака: “море” электронов с отрицательной энергией

- Бесконечно много электронов с отрицательной энергией заполняют все возможные состояния
- Обычным электронам с положительной энергией “некуда упасть”
- Это море нельзя наблюдать (!)
- Получив большую энергию, электрон может вырваться из моря и стать обычным электроном с положительной энергией
- “Дырка” в море воспринимается как ЧАСТИЦА с положительной массой и положительным зарядом



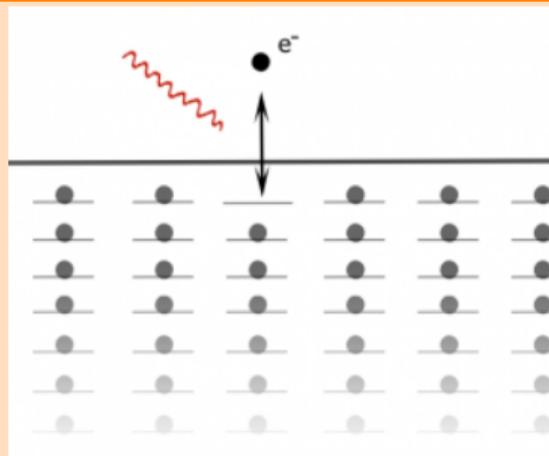
Единственная известная частица с положительным зарядом — протон

Протон в 1837 раз массивнее электрона

Открытие “второй половины мира” (1928–1931)

Упрямство Дирака: “море” электронов с отрицательной энергией

- Бесконечно много электронов с отрицательной энергией заполняют все возможные состояния
- Обычным электронам с положительной энергией “некуда упасть”
- Это море нельзя наблюдать (!)
- Получив большую энергию, электрон может вырваться из моря и стать обычным электроном с положительной энергией
- “Дырка” в море воспринимается как ЧАСТИЦА с положительной массой и положительным зарядом



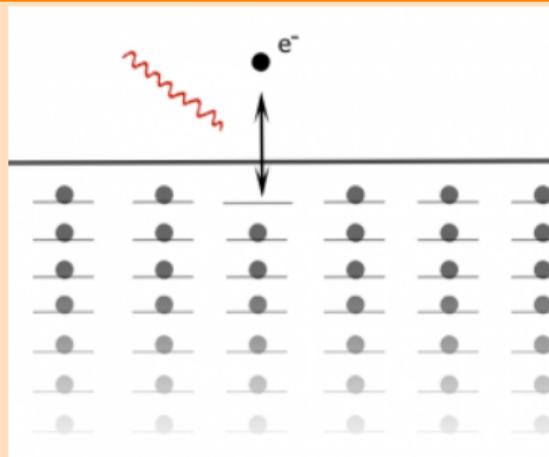
Единственная известная частица с положительным зарядом — протон

Протон в 1837 раз массивнее электрона

Открытие “второй половины мира” (1928–1931)

Упрямство Дирака: “море” электронов с отрицательной энергией

- Бесконечно много электронов с отрицательной энергией заполняют все возможные состояния
- Обычным электронам с положительной энергией “некуда упасть”
- Это море нельзя наблюдать (!)
- Получив большую энергию, электрон может вырваться из моря и стать обычным электроном с положительной энергией
- “Дырка” в море воспринимается как ЧАСТИЦА с положительной массой и положительным зарядом



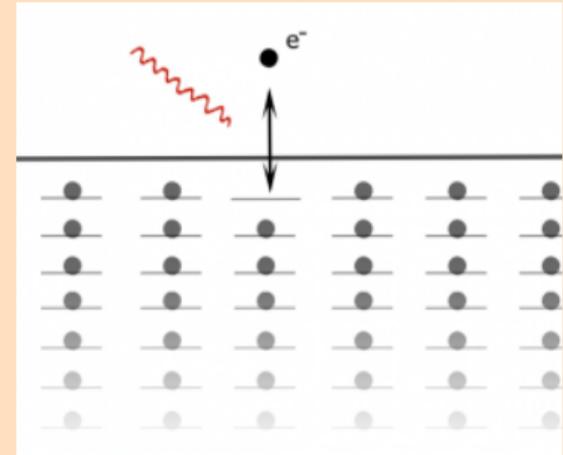
Единственная известная частица с положительным зарядом — протон

Протон в 1837 раз тяжелее электрона

Открытие “второй половины мира” (1928–1931)

Упрямство Дирака: “море” электронов с отрицательной энергией

- Бесконечно много электронов с отрицательной энергией заполняют все возможные состояния
- Обычным электронам с положительной энергией “некуда упасть”
- Это море нельзя наблюдать (!)
- Получив большую энергию, электрон может вырваться из моря и стать обычным электроном с положительной энергией
- “Дырка” в море воспринимается как ЧАСТИЦА с положительной массой и положительным зарядом



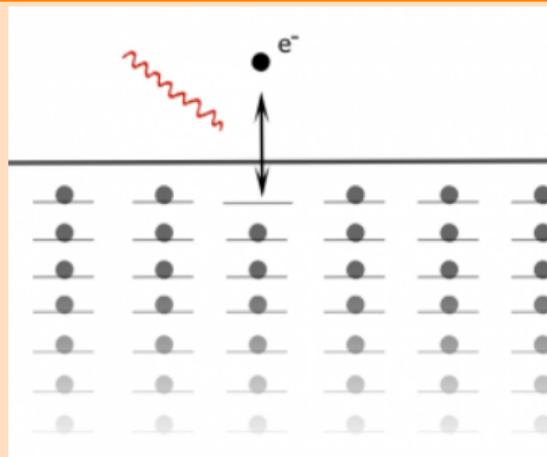
Единственная известная частица с положительным зарядом — протон

Протон в 1837 раз тяжелее электрона

Открытие “второй половины мира” (1928–1931)

Упрямство Дирака: “море” электронов с отрицательной энергией

- Бесконечно много электронов с отрицательной энергией заполняют все возможные состояния
- Обычным электронам с положительной энергией “некуда упасть”
- Это море нельзя наблюдать (!)
- Получив большую энергию, электрон может вырваться из моря и стать обычным электроном с положительной энергией
- “Дырка” в море воспринимается как ЧАСТИЦА с положительной массой и положительным зарядом



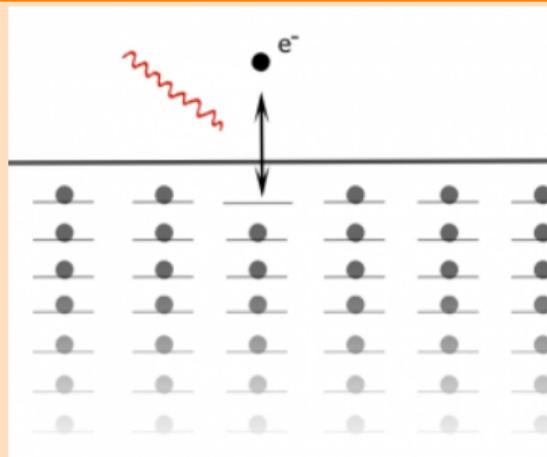
Единственная известная частица с положительным зарядом — протон

?!?! Протон в 1837 раз массивнее электрона

Открытие “второй половины мира” (1928–1931)

Упрямство Дирака: “море” электронов с отрицательной энергией

- Бесконечно много электронов с отрицательной энергией заполняют все возможные состояния
- Обычным электронам с положительной энергией “некуда упасть”
- Это море нельзя наблюдать (!)
- Получив большую энергию, электрон может вырваться из моря и стать обычным электроном с положительной энергией
- “Дырка” в море воспринимается как ЧАСТИЦА с положительной массой и положительным зарядом



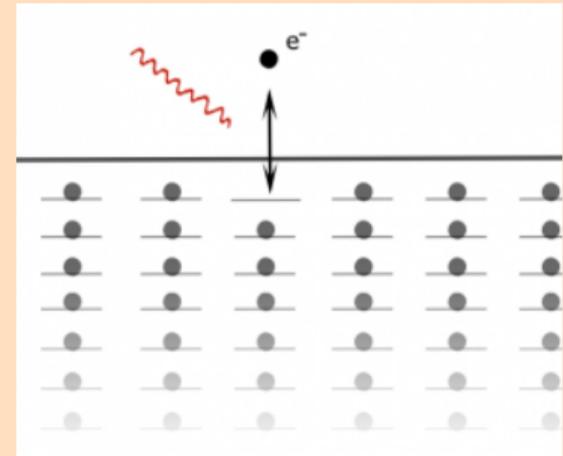
Единственная известная частица с положительным зарядом — протон

?!?! Протон в 1837 раз массивнее электрона

Открытие “второй половины мира” (1928–1931)

Упрямство Дирака: “море” электронов с отрицательной энергией

- Бесконечно много электронов с отрицательной энергией заполняют все возможные состояния
- Обычным электронам с положительной энергией “некуда упасть”
- Это море нельзя наблюдать (!)
- Получив большую энергию, электрон может вырваться из моря и стать обычным электроном с положительной энергией
- “Дырка” в море воспринимается как ЧАСТИЦА с положительной массой и положительным зарядом



Единственная известная частица с положительным зарядом — протон

?!?! Протон в 1837 раз массивнее электрона

Схема все равно **не работает?!**

Даже со спасительными предположениями теория предсказывает то,
что **никогда не наблюдалось**

Даже со спасительными предположениями теория предсказывает то,
что никогда не наблюдалось

Крах проекта?

Открытие “второй половины мира” (1928–1931)

Дирак, 1931:

- Если новая частица не похожа ни на что известное, то, значит, известно не все
- Существует частица той же массы, что электрон, но с положительным зарядом — позитрон (антиэлектрон)
- При встрече позитрона и электрона дырка заполняется: обе частицы исчезают, превратившись в свет

— аннигиляция —

Быстрое развитие событий:

- 1928 — Дирак предсказывает существование позитрона
- 1932 — Андерсон обнаруживает позитрон
- 1933 — Дирак предсказывает существование антипротона
- 1935 — Дирак предсказывает существование антинейтрона

Антиматерия/антивещество

античастицы, аннигиляция и рождение пар — общие понятия

Открытие “второй половины мира” (1928–1931)

Дирак, 1931:

- Если новая частица не похожа ни на что известное, то, значит, известно не все
- Существует частица той же массы, что электрон, но с положительным зарядом (позитрон)
- При встрече позитрона и электрона дырка заполняется: обе частицы исчезают, превратившись в свет

Быстрое развитие событий:

1928 – Дирак предсказывает существование позитрона
1932 – Андерсон обнаруживает позитрон
1933 – Дирак предсказывает существование антипротонов
1935 – Дирак предсказывает существование антиэлектронов

Антиматерия/антивещество

античастицы, аннигиляция и рождение пар — общие понятия

Открытие “второй половины мира” (1928–1931)

Дирак, 1931:

- Если новая частица не похожа ни на что известное, то, значит, известно не все
- Существует частица той же массы, что электрон, но с положительным зарядом
 - антиэлектрон (позитрон)
- При встрече позитрона и электрона дырка заполняется: обе частицы исчезают, превратившись в свет

Быстрое развитие событий:

Антиматерия/антивещество

античастицы, аннигиляция и рождение пар — общие понятия

Открытие “второй половины мира” (1928–1931)

Дирак, 1931:

- Если новая частица не похожа ни на что известное, то, значит, известно не все
- Существует частица той же массы, что электрон, но с положительным зарядом
 - **антиэлектрон (позитрон)**
- При встрече позитрона и электрона дырка заполняется: обе частицы исчезают, превратившись в свет

Быстрое развитие событий:

Антиматерия/антивещество

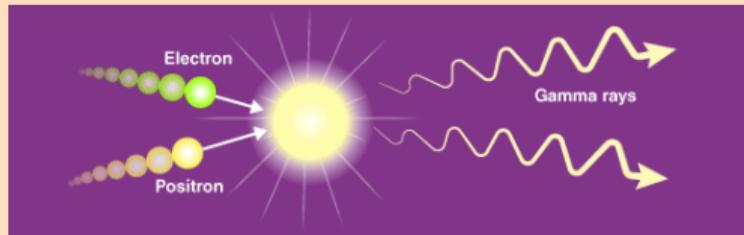
античастицы, аннигиляция и рождение пар — общие понятия

Открытие “второй половины мира” (1928–1931)

Дирак, 1931:

- Если новая частица не похожа ни на что известное, то, значит, известно не все
- Существует частица той же массы, что электрон, но с положительным зарядом
 - антиэлектрон (позитрон)
- При встрече позитрона и электрона дырка заполняется: обе частицы исчезают, превратившись в свет

—аннигиляция—



Быстрое развитие событий:

Антиматерия/антивещество

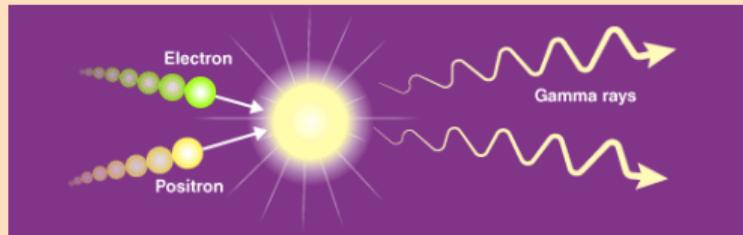
Существование, аннигиляция и рождение пар — общие понятия

Открытие “второй половины мира” (1928–1931)

Дирак, 1931:

- Если новая частица не похожа ни на что известное, то, значит, известно не все
- Существует частица той же массы, что электрон, но с положительным зарядом
 - антиэлектрон (позитрон)
- При встрече позитрона и электрона дырка заполняется: обе частицы исчезают, превратившись в свет

—аннигиляция—



Быстрое развитие событий:

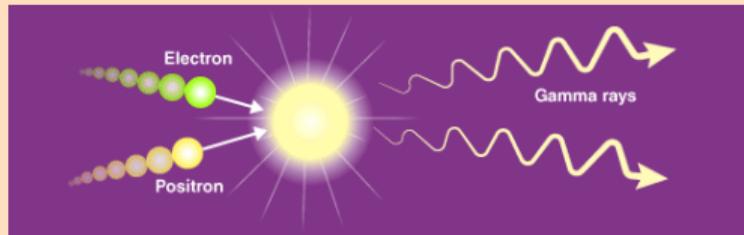
Антиматерия/антивещество

Создание, аннигиляция и рождение пар — общие понятия

Открытие “второй половины мира” (1928–1931)

Дирак, 1931:

- Если новая частица не похожа ни на что известное, то, значит, известно не все
- Существует частица той же массы, что электрон, но с положительным зарядом
 - антиэлектрон (позитрон)
- При встрече позитрона и электрона дырка заполняется: обе частицы исчезают, превратившись в свет
 - аннигиляция—



Быстрое развитие событий:

- август 1932: открытие позитрона
- октябрь 1933: Нобелевская премия по физике

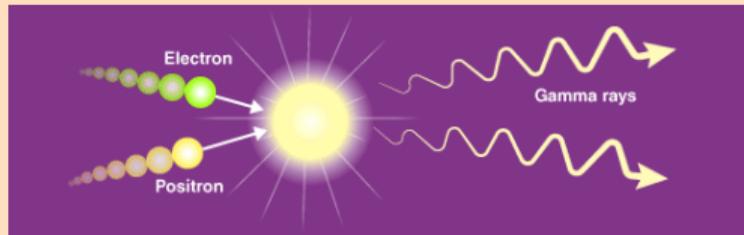
Антиматерия/антивещество

Антиматерия, аннигиляция и рождение пар — общие понятия

Открытие “второй половины мира” (1928–1931)

Дирак, 1931:

- Если новая частица не похожа ни на что известное, то, значит, известно не все
- Существует частица той же массы, что электрон, но с положительным зарядом
 - антиэлектрон (позитрон)
- При встрече позитрона и электрона дырка заполняется: обе частицы исчезают, превратившись в свет
 - аннигиляция—



Быстрое развитие событий:

- август 1932: открытие позитрона
- октябрь 1933: Нобелевская премия по физике

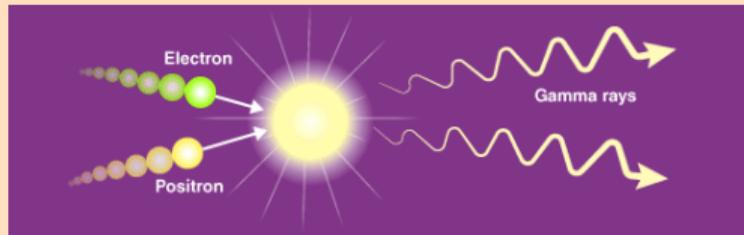
Антиматерия/антивещество

Антиматерия, аннигиляция и рождение пар — общие понятия

Открытие “второй половины мира” (1928–1931)

Дирак, 1931:

- Если новая частица не похожа ни на что известное, то, значит, известно не все
- Существует частица той же массы, что электрон, но с положительным зарядом
 - антиэлектрон (позитрон)
- При встрече позитрона и электрона дырка заполняется: обе частицы исчезают, превратившись в свет
 - аннигиляция—



Быстрое развитие событий:

- август 1932: открытие позитрона
- октябрь 1933: Нобелевская премия по физике

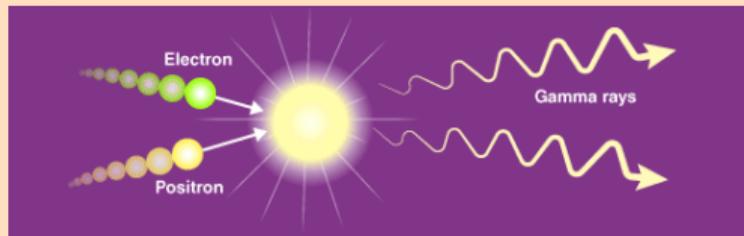
Антиматерия/антивещество

Антиматерия, аннигиляция и образование пар — общее понятие

Открытие “второй половины мира” (1928–1931)

Дирак, 1931:

- Если новая частица не похожа ни на что известное, то, значит, известно не все
- Существует частица той же массы, что электрон, но с положительным зарядом
 - антиэлектрон (позитрон)
- При встрече позитрона и электрона дырка заполняется: обе частицы исчезают, превратившись в свет
 - аннигиляция—



Быстрое развитие событий:

- август 1932: открытие позитрона
- октябрь 1933: Нобелевская премия по физике

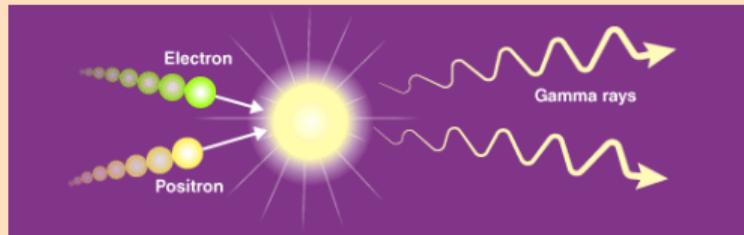
Антиматерия/антивещество

- античастицы, аннигиляция и рождение пар — общие понятия

Открытие “второй половины мира” (1928–1931)

Дирак, 1931:

- Если новая частица не похожа ни на что известное, то, значит, известно не все
- Существует частица той же массы, что электрон, но с положительным зарядом
 - антиэлектрон (позитрон)
- При встрече позитрона и электрона дырка заполняется: обе частицы исчезают, превратившись в свет
 - аннигиляция—



Быстрое развитие событий:

- август 1932: открытие позитрона
- октябрь 1933: Нобелевская премия по физике

Антиматерия/антивещество

- античастицы, аннигиляция и рождение пар — общие понятия

Открытие “второй половины мира” (1928–1931)

Хорошие уравнения “знают больше, чем их создатель”

- Полезно соединение различных принципов
- Вместе они способны предсказать то, что не осдержится в них по отдельности

“Новая математика” оказалась широко востребована

Тем не менее, дираковский проект висел на волоске

- Дирак и Швингер разработали квантовую электродинамику
- Швингер разработал квантовую теорию поля
- Дирак разработал квантовую теорию фермионов

Эпохальное предсказание на основе “частично правильных” идей

Открытие “второй половины мира” (1928–1931)

Хорошие уравнения “знают больше, чем их создатель”

- Полезно соединение различных принципов
- Вместе они способны предсказать то, что не осдержится в них по отдельности

“Новая математика” оказалась широко востребована

Тем не менее, дираковский проект висел на волоске

“Самое интересное, что произошло”

“Самое интересное, что произошло”

“Самое интересное, что произошло”

Эпохальное предсказание на основе “частично правильных” идей

Открытие “второй половины мира” (1928–1931)

Хорошие уравнения “знают больше, чем их создатель”

- Полезно соединение различных принципов
- Вместе они способны предсказать то, что не осдержится в них по отдельности

“Новая математика” оказалась широко востребована

Тем не менее, дираковский проект висел на волоске

Самостоятельно дираковский проект

Самостоятельно дираковский проект не выдержал бы конкуренции с другими

Самостоятельно дираковский проект не выдержал бы конкуренции с другими

Эпохальное предсказание на основе “частично правильных” идей

Открытие “второй половины мира” (1928–1931)

Хорошие уравнения “знают больше, чем их создатель”

- Полезно соединение различных принципов
- Вместе они способны предсказать то, что не осдержится в них по отдельности

“Новая математика” оказалась широко востребована

Тем не менее, дираковский проект висел на волоске

Эпохальное предсказание на основе “частично правильных” идей

Открытие “второй половины мира” (1928–1931)

Хорошие уравнения “знают больше, чем их создатель”

- Полезно соединение различных принципов
- Вместе они способны предсказать то, что не осдержится в них по отдельности

“Новая математика” оказалась широко востребована

Тем не менее, дираковский проект висел на волоске

- Буквально дираковского моря нет
- Запрет на занятие состояний с отрицательной энергией не необходим
- В уравнении Дирака для электронов и позитронов остаются странности

Эпохальное предсказание на основе “частично правильных” идей

Открытие “второй половины мира” (1928–1931)

Хорошие уравнения “знают больше, чем их создатель”

- Полезно соединение различных принципов
- Вместе они способны предсказать то, что не осдержится в них по отдельности

“Новая математика” оказалась широко востребована

Тем не менее, дираковский проект висел на волоске

- Буквально дираковского моря нет
- Запрет на занятие состояний с отрицательной энергией не необходим
- В уравнении Дирака для электронов и позитронов остаются странности

Эпохальное предсказание на основе “частично правильных” идей

Открытие “второй половины мира” (1928–1931)

Хорошие уравнения “знают больше, чем их создатель”

- Полезно соединение различных принципов
- Вместе они способны предсказать то, что не осдержится в них по отдельности

“Новая математика” оказалась широко востребована

Тем не менее, дираковский проект висел на волоске

- Буквально дираковского моря нет
- **Запрет на занятие состояний с отрицательной энергией не необходим**
- В уравнении Дирака для электронов и позитронов остаются странности

Эпохальное предсказание на основе “частично правильных” идей

Открытие “второй половины мира” (1928–1931)

Хорошие уравнения “знают больше, чем их создатель”

- Полезно соединение различных принципов
- Вместе они способны предсказать то, что не осдержится в них по отдельности

“Новая математика” оказалась широко востребована

Тем не менее, дираковский проект висел на волоске

- Буквально дираковского моря нет
- Запрет на занятие состояний с отрицательной энергией не необходим
- В уравнении Дирака для электронов и позитронов остаются странности

Эпохальное предсказание на основе “частично правильных” идей

Открытие “второй половины мира” (1928–1931)

Хорошие уравнения “знают больше, чем их создатель”

- Полезно соединение различных принципов
- Вместе они способны предсказать то, что не осдержится в них по отдельности

“Новая математика” оказалась широко востребована

Тем не менее, дираковский проект висел на волоске

- Буквально дираковского моря нет
- Запрет на занятие состояний с отрицательной энергией не необходим
- В уравнении Дирака для электронов и позитронов остаются странности

Эпохальное предсказание на основе “частично правильных” идей

- Теория Дирака — лучшая замена идей квантовой теории поля до создания квантовой теории поля
- Квантовая теория поля — теория не одной частицы (электрона или позитрона), а переменного числа частиц

Открытие “второй половины мира” (1928–1931)

Хорошие уравнения “знают больше, чем их создатель”

- Полезно соединение различных принципов
- Вместе они способны предсказать то, что не осдержится в них по отдельности

“Новая математика” оказалась широко востребована

Тем не менее, дираковский проект висел на волоске

- Буквально дираковского моря нет
- Запрет на занятие состояний с отрицательной энергией не необходим
- В уравнении Дирака для электронов и позитронов остаются странности

Эпохальное предсказание на основе “частично правильных” идей

- Теория Дирака — лучшая замена идей квантовой теории поля до создания квантовой теории поля
- Квантовая теория поля — теория не одной частицы (электрона или позитрона), а переменного числа частиц

Открытие “второй половины мира” (1928–1931)

Хорошие уравнения “знают больше, чем их создатель”

- Полезно соединение различных принципов
- Вместе они способны предсказать то, что не осдержится в них по отдельности

“Новая математика” оказалась широко востребована

Тем не менее, дираковский проект висел на волоске

- Буквально дираковского моря нет
- Запрет на занятие состояний с отрицательной энергией не необходим
- В уравнении Дирака для электронов и позитронов остаются странности

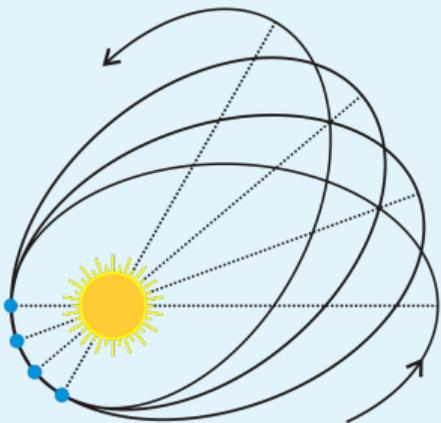
Эпохальное предсказание на основе “частично правильных” идей

- Теория Дирака — лучшая замена идей квантовой теории поля до создания квантовой теории поля
- Квантовая теория поля — теория не одной частицы (электрона или позитрона), а переменного числа частиц

Удачные предсказания **не** гарантированы

1859: Провал предсказания

Меркурий: прецессия орбиты



- Орбита Меркурия — *поворачивающийся* эллипс.
- Основную часть поворота объясняет влияние других планет (по Ньютону!)
- Остается необъяснимый поворот на $43''$ в столетие
- Леверье, 1859: влияние планеты вблизи Солнца

Но планета не найдена!

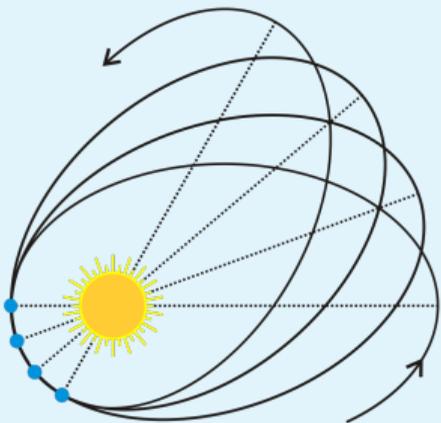
Леверье предсказал массу планеты, чтобы подогнать по Ньютону $\Delta\omega = 43''$

Леверье предсказал расстояние от Солнца до планеты, чтобы подогнать по Ньютону $\Delta\omega = 43''$

Леверье предсказал период обращения планеты, чтобы подогнать по Ньютону $\Delta\omega = 43''$

1859: Провал предсказания

Меркурий: прецессия орбиты



- Орбита Меркурия — поворачивающийся эллипс.
- Основную часть поворота объясняет влияние других планет (по Ньютону!)
- Остается необъяснимый поворот на $43''$ в столетие
- Леверье, 1859: влияние планеты вблизи Солнца

Но планета не найдена!

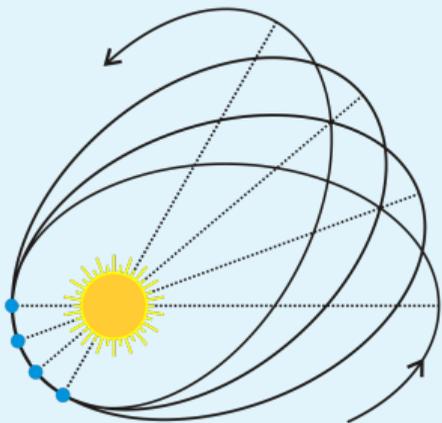
Леверье предсказал массу планеты, исходя из предположения, что она вращается по Ньютону: $M = 2300 M_{\oplus}$

Леверье предсказал период обращения планеты: $T = 88$ земных суток

Леверье предсказал расстояние от планеты до Солнца: $a = 0,38$ а.е.

1859: Провал предсказания

Меркурий: прецессия орбиты

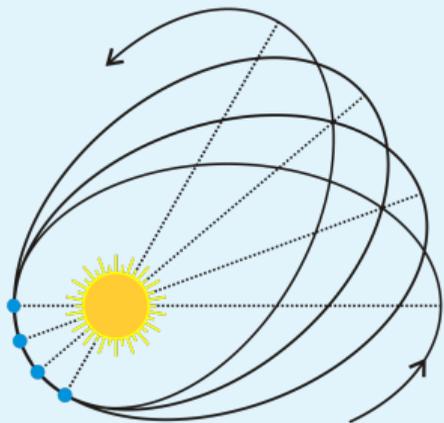


- Орбита Меркурия — поворачивающийся эллипс.
- Основную часть поворота объясняет влияние других планет (по Ньютону!)
- Остается необъяснимый поворот на $43''$ в столетие
- Лаверье, 1859: влияние планеты вблизи Солнца

Но планета не найдена!

1859: Провал предсказания

Меркурий: прецессия орбиты

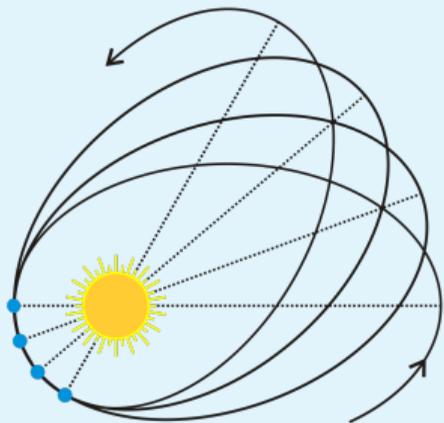


- Орбита Меркурия — *поворачивающийся* эллипс.
- Основную часть поворота объясняет влияние других планет (по Ньютону!)
- **Остается необъяснимый поворот на $43''$ в столетие**
- Леверье, 1859: влияние планеты вблизи Солнца

Но планета не найдена!

1859: Провал предсказания

Меркурий: прецессия орбиты



- Орбита Меркурия — *поворачивающийся* эллипс.
- Основную часть поворота объясняет влияние других планет (по Ньютону!)
- Остается необъяснимый поворот на $43''$ в столетие
- **Леверье, 1859: влияние планеты вблизи Солнца**

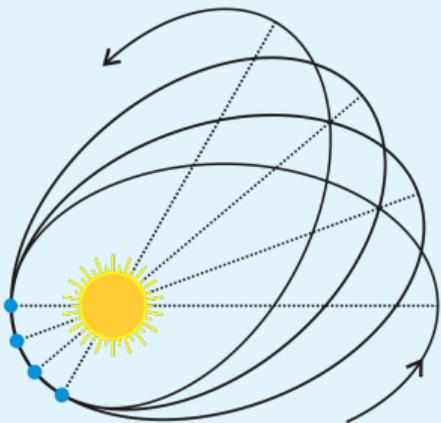
• Заранее придумано даже название: Вулкан

$$\left(\frac{d\varphi}{dt}\right)_{\text{Ньютона}} = \frac{2\pi}{T} \left[\frac{3GM}{a(1-e^2)} - \frac{3GM}{a(1-e^2)} \right] = \frac{2\pi}{T} \left[\frac{3GM}{a(1-e^2)} - \frac{3GM}{a(1-e^2)} \right]$$

Но планета не найдена!

1859: Провал предсказания

Меркурий: прецессия орбиты



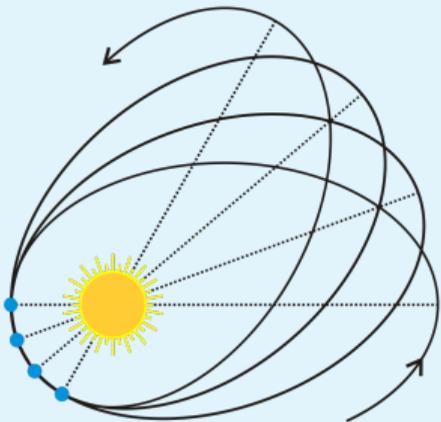
- Орбита Меркурия — *поворачивающийся* эллипс.
- Основную часть поворота объясняет влияние других планет (по Ньютону!)
- Остается необъяснимый поворот на $43''$ в столетие
- Леверье, 1859: влияние планеты вблизи Солнца
 - Заранее придумано даже название: Вулкан

$$\left(\frac{d\varpi}{dt}\right)_v \approx \frac{3}{4} \sqrt{\frac{GM_\odot}{a_1^3}} \frac{1}{(1-e_1^2)^2} \frac{m_v a_v^2}{M_\odot a_1^2} \Rightarrow m_v \sim 3M_\oplus, T \approx 3 \text{ d}$$

Но планета не найдена!

1859: Провал предсказания

Меркурий: прецессия орбиты



- Орбита Меркурия — поворачивающийся эллипс.
- Основную часть поворота объясняет влияние других планет (по Ньютону!)
- Остается необъяснимый поворот на $43''$ в столетие
- Леверье, 1859: влияние планеты вблизи Солнца
 - Заранее придумано даже название: Вулкан

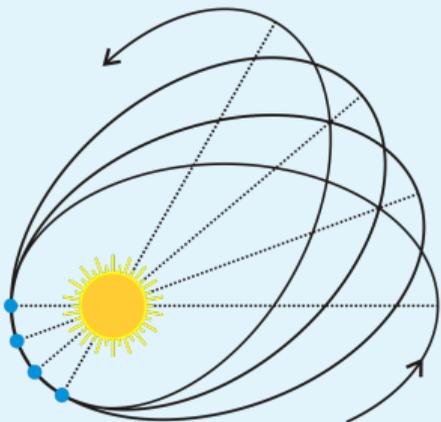
$$\left(\frac{d\varpi}{dt}\right)_v \approx \frac{3}{4} \sqrt{\frac{GM_\odot}{a_1^3}} \frac{1}{(1-e_1^2)^2} \frac{m_v a_v^2}{M_\odot a_1^2} \rightarrow m_v \sim 3M_\oplus, T \approx 3d$$

Но планета не найдена!

- Прецессия, которую нельзя получить по Ньютону: $\Delta\phi = 360^\circ \frac{v_m^2}{c^2} \frac{3}{(1+\epsilon)^2}$,
эксцентриситет $\epsilon = 0.2056$; максимальная скорость $v_m = 58.98$ км/с
- Потребовалась совершенно новая теория вместо теории тяготения и движения Ньютона

1859: Провал предсказания

Меркурий: прецессия орбиты



- Орбита Меркурия — *поворачивающийся* эллипс.
- Основную часть поворота объясняет влияние других планет (по Ньютону!)
- Остается необъяснимый поворот на $43''$ в столетие
- Леверье, 1859: влияние планеты вблизи Солнца
 - Заранее придумано даже название: Вулкан

$$\left(\frac{d\varpi}{dt}\right)_v \approx \frac{3}{4} \sqrt{\frac{GM_\odot}{a_1^3}} \frac{1}{(1-e_1^2)^2} \frac{m_v a_v^2}{M_\odot a_1^2} \rightarrow m_v \sim 3M_\oplus, T \approx 3d$$

Но планета не найдена!

- Прецессия, которую нельзя получить по Ньютону: $\Delta\phi = 360^\circ \frac{v_m^2}{c^2} \frac{3}{(1+\epsilon)^2}$,
эксцентриситет $\epsilon = 0.2056$; максимальная скорость $v_m = 58.98$ км/с
- Потребовалась совершенно новая теория вместо теории тяготения и движения Ньютона

Ньютон: моя гравитация не может быть точной

Ньютон (1692):

Положение дел, при котором гравитация была бы внутренним и неотъемлемым образом присуща материи так, чтобы одно тело воздействовало на другое на расстоянии через пустоту без посредничества чего бы то ни было еще, способного передавать воздействие или силу от одного тела к другому, представляется мне столь колоссальным абсурдом, что, как я полагаю, никто со сколько-нибудь развитым пониманием философских вопросов в него не впадет. Гравитация должна вызываться каким-либо агентом, действующим постоянно и в соответствии с определенными законами; но вопрос о том, быть этому Агенту материальным или нематериальным, я оставил на Усмотрение моих читателей.

Ньютон: моя гравитация не может быть точной

Ньютон (1692):

Положение дел, при котором гравитация была бы внутренним и неотъемлемым образом присуща материи так, чтобы одно тело воздействовало на другое на расстоянии через пустоту без посредничества чего бы то ни было еще, способного передавать воздействие или силу от одного тела к другому, представляется мне столь колоссальным абсурдом, что, как я полагаю, никто со сколько-нибудь развитым пониманием философских вопросов в него не впадет. **Гравитация должна вызываться каким-либо агентом, действующим постоянно и в соответствии с определенными законами;** но вопрос о том, быть этому Агенту материальным или нематериальным, я оставил на Усмотрение моих читателей.

Ньютон: моя гравитация не может быть точной

Ньютон (1692):

Положение дел, при котором гравитация была бы внутренним и неотъемлемым образом присуща материи так, чтобы одно тело воздействовало на другое на расстоянии через пустоту без посредничества чего бы то ни было еще, способного передавать воздействие или силу от одного тела к другому, представляется мне столь колоссальным абсурдом, что, как я полагаю, никто со сколько-нибудь развитым пониманием философских вопросов в него не впадет. Гравитация должна вызываться каким-либо агентом, действующим постоянно и в соответствии с определенными законами; **но вопрос о том, быть этому Агенту материальным или нематериальным, я оставил на Усмотрение моих читателей.**

Польза от “непрактичной” математики

1854: Математика приготовлена с большим опережением

Гёттинген:



1854: Математика приготовлена с большим опережением

Гёттингген:



10 июня 1854: Диссертация Римана “О гипотезах, лежащих в основании геометрии”

- одна из десяти лучших математических работ, представленных вообще когда бы то ни было (Д. Дербишир)
- ее прочтение было одним из озарений в истории математики (Х. Фрейденталь)

О “внутреннем” описании неевклидовых геометрий. Любых.

1854: Математика приготовлена с большим опережением

Гёттингген:



10 июня 1854: Диссертация Римана “О гипотезах, лежащих в основании геометрии”

- одна из десяти лучших математических работ, представленных вообще когда бы то ни было (Д. Дербишир)
- ее прочтение было одним из озарений в истории математики (Х. Фрейденталь)

О “внутреннем” описании неевклидовых геометрий. Любых.

1854: Математика приготовлена с большим опережением

Гёттинген:



10 июня 1854: Диссертация Римана “О гипотезах, лежащих в основании геометрии”

- одна из десяти лучших математических работ, представленных вообще когда бы то ни было (Д. Дербишир)
- ее прочтение было одним из озарений в истории математики (Х. Фрейденталь)

О “внутреннем” описании неевклидовых геометрий. Любых.

1854: Математика приготовлена с большим опережением

Гёттинген:

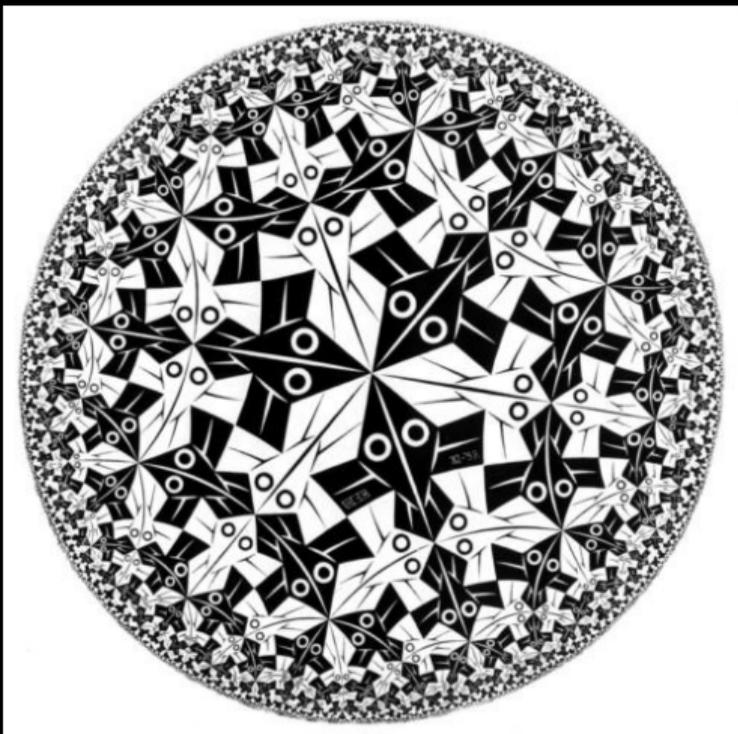


10 июня 1854: Диссертация Римана “О гипотезах, лежащих в основании геометрии”

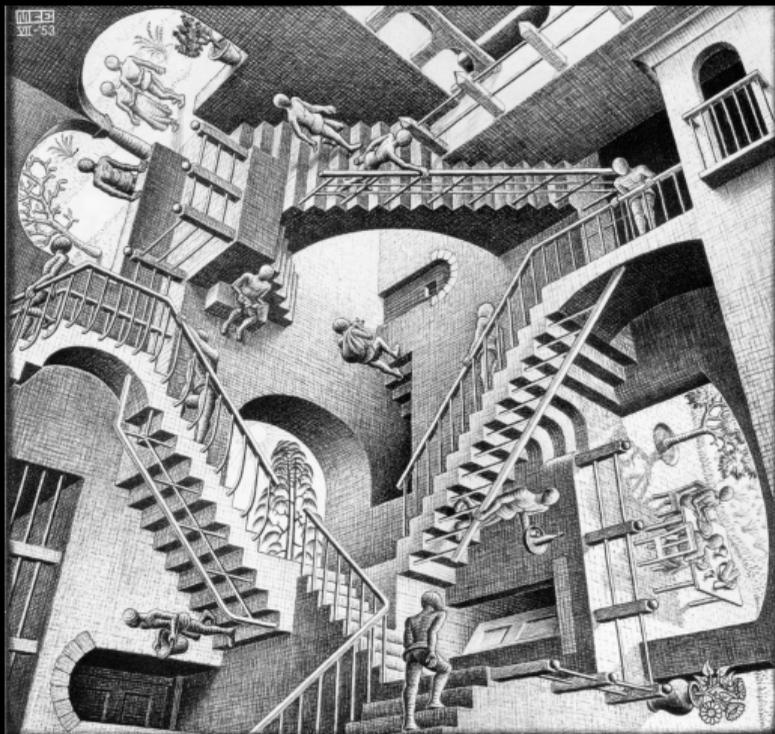
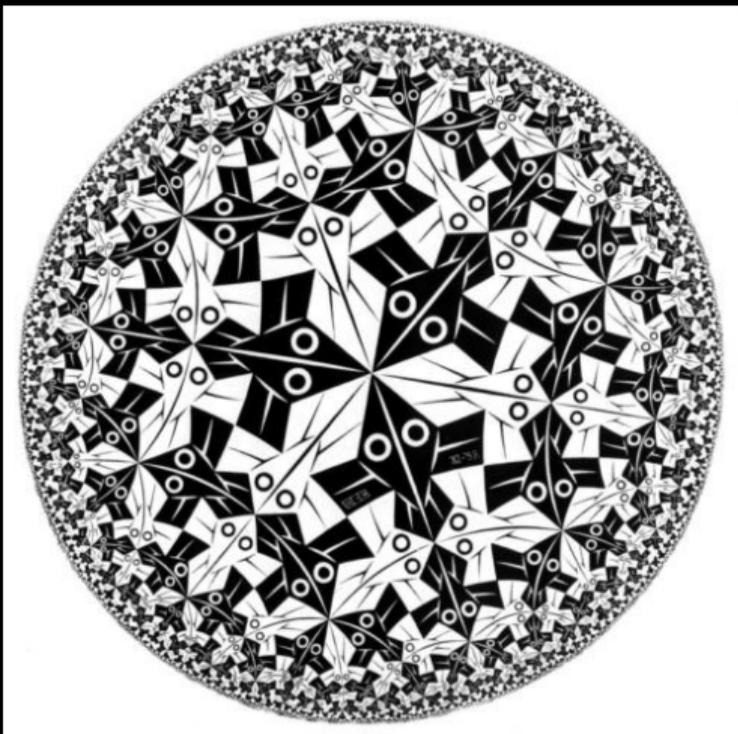
- одна из десяти лучших математических работ, представленных вообще когда бы то ни было (Д. Дербишир)
- ее прочтение было одним из озарений в истории математики (Х. Фрейденталь)

О “внутреннем” описании неевклидовых геометрий. Любых.

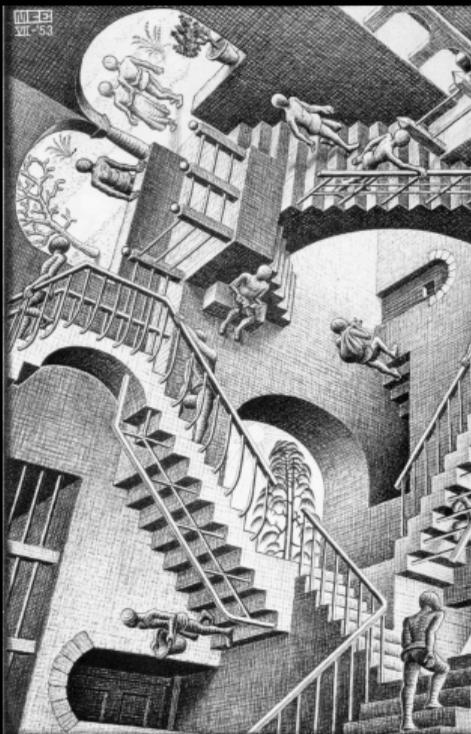
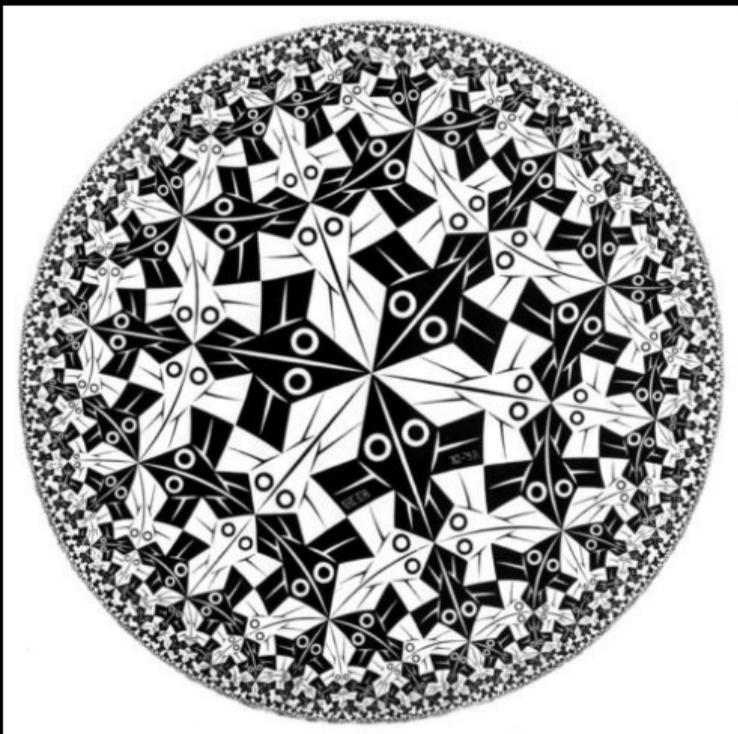
Исключенные геометрии глазами художника. Метафоры



Искавленные геометрии глазами художника. Метафоры



Искавленные геометрии глазами художника. Метафоры



Риман 1854 → Эйнштейн 1915/16

Эйнштейн–Гроссман (1913), Эйнштейн (1915): природа гравитации



Эйнштейн–Гроссман (1913), Эйнштейн (1915): природа гравитации



- Притяжение — отклик на искривление пространства–времени
- Пространство-время говорит материи как ей двигаться
- Материя говорит пространству-времени как ему искривляться
- $R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}$ (уравнения Эйнштейна)
- $R_{\mu\nu} = g^{\alpha\beta}R_{\mu\alpha\nu\beta}$
- $R_{\mu\alpha\nu\beta}$ – тензор Римана
- Теория гравитации Эйнштейна — это геометрия Римана в динамике
- Материя определяет, какой быть геометрии, и сама откликается на геометрию
- Агент — тензор для исчисления расстояний в пространстве-времени

Риман 1854 → Эйнштейн 1915/16

Эйнштейн–Гроссман (1913), Эйнштейн (1915): природа гравитации



- Притяжение — отклик на искривление пространства–времени
- **Пространство-время говорит материи как ей двигаться**
- Материя говорит пространству-времени как ему искривляться
- $R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}$ (уравнения Эйнштейна)
- $R_{\mu\nu} = g^{\alpha\beta}R_{\mu\alpha\nu\beta}$
- $R_{\mu\alpha\nu\beta}$ – тензор Римана
- Теория гравитации Эйнштейна — это геометрия Римана в динамике
- Материя определяет, какой быть геометрии, и сама откликается на геометрию
- Агент — тензор для исчисления расстояний в пространстве-времени

Риман 1854 → Эйнштейн 1915/16

Эйнштейн–Гроссман (1913), Эйнштейн (1915): природа гравитации



- Притяжение — отклик на искривление пространства–времени
- Пространство-время говорит материи как ей двигаться
- **Материя говорит пространству-времени как ему искривляться**
- $R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}$ (уравнения Эйнштейна)
- $R_{\mu\nu} = g^{\alpha\beta}R_{\mu\alpha\nu\beta}$
- $R_{\mu\alpha\nu\beta}$ – тензор Римана
- Теория гравитации Эйнштейна — это геометрия Римана в динамике
- Материя определяет, какой быть геометрии, и сама откликается на геометрию
- Агент — тензор для исчисления расстояний в пространстве-времени

Риман 1854 → Эйнштейн 1915/16

Эйнштейн–Гроссман (1913), Эйнштейн (1915): природа гравитации



- Притяжение — отклик на искривление пространства–времени
- Пространство-время говорит материи как ей двигаться
- Материя говорит пространству-времени как ему искривляться
- $R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}$ (уравнения Эйнштейна)
- $R_{\mu\nu} = g^{\alpha\beta}R_{\mu\alpha\nu\beta}$
- $R_{\mu\alpha\nu\beta}$ – тензор Римана
- Теория гравитации Эйнштейна — это геометрия Римана в динамике
- Материя определяет, какой быть геометрии, и сама откликается на геометрию
- Агент — тензор для исчисления расстояний в пространстве-времени

Риман 1854 → Эйнштейн 1915/16

Эйнштейн–Гроссман (1913), Эйнштейн (1915): природа гравитации



- Притяжение — отклик на искривление пространства–времени
- Пространство-время говорит материи как ей двигаться
- Материя говорит пространству-времени как ему искривляться
- $R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}$ (уравнения Эйнштейна)
- $R_{\mu\nu} = g^{\alpha\beta}R_{\mu\alpha\nu\beta}$
- $R_{\mu\alpha\nu\beta}$ – тензор Римана
- Теория гравитации Эйнштейна — это геометрия Римана в динамике
- Материя определяет, какой быть геометрии, и сама откликается на геометрию
- Агент — тензор для исчисления расстояний в пространстве-времени



Риман 1854 → Эйнштейн 1915/16

Эйнштейн–Гроссман (1913), Эйнштейн (1915): природа гравитации



- Притяжение — отклик на искривление пространства–времени
- Пространство-время говорит материи как ей двигаться
- Материя говорит пространству-времени как ему искривляться
- $R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}$ (уравнения Эйнштейна)
- $R_{\mu\nu} = g^{\alpha\beta}R_{\mu\alpha\nu\beta}$
- $R_{\mu\alpha\nu\beta}$ – тензор Римана
- Теория гравитации Эйнштейна — это геометрия Римана в динамике
- Материя определяет, какой быть геометрии, и сама откликается на геометрию
- Агент — тензор для исчисления расстояний в пространстве-времени



Риман 1854 → Эйнштейн 1915/16

Эйнштейн–Гроссман (1913), Эйнштейн (1915): природа гравитации



- Притяжение — отклик на искривление пространства–времени
- Пространство-время говорит материи как ей двигаться
- Материя говорит пространству-времени как ему искривляться
- $R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}$ (уравнения Эйнштейна)
- $R_{\mu\nu} = g^{\alpha\beta}R_{\mu\alpha\nu\beta}$
- $R_{\mu\alpha\nu\beta}$ – тензор Римана
- Теория гравитации Эйнштейна — это геометрия Римана в динамике
- Материя определяет, какой быть геометрии, и сама откликается на геометрию
- Агент — тензор для исчисления расстояний в пространстве-времени



Риман 1854 → Эйнштейн 1915/16

Эйнштейн–Гроссман (1913), Эйнштейн (1915): природа гравитации



- Притяжение — отклик на искривление пространства–времени
- Пространство-время говорит материи как ей двигаться
- Материя говорит пространству-времени как ему искривляться
- $R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}$ (уравнения Эйнштейна)
- $R_{\mu\nu} = g^{\alpha\beta}R_{\mu\alpha\nu\beta}$
- $R_{\mu\alpha\nu\beta}$ – тензор Римана
- Теория гравитации Эйнштейна — это геометрия Римана в динамике
- Материя определяет, какой быть геометрии, и сама откликается на геометрию
- Агент — тензор для исчисления расстояний в пространстве-времени



Риман 1854 → Эйнштейн 1915/16

Эйнштейн–Гроссман (1913), Эйнштейн (1915): природа гравитации



- Притяжение — отклик на искривление пространства–времени
- Пространство-время говорит материи как ей двигаться
- Материя говорит пространству-времени как ему искривляться
- $R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}$ (уравнения Эйнштейна)
- $R_{\mu\nu} = g^{\alpha\beta}R_{\mu\alpha\nu\beta}$
- $R_{\mu\alpha\nu\beta}$ – тензор Римана
- Теория гравитации Эйнштейна — это геометрия Римана в динамике
- Материя определяет, какой быть геометрии, и сама откликается на геометрию
- Агент — тензор для исчисления расстояний в пространстве-времени



Риман 1854 → Эйнштейн 1915/16

Эйнштейн–Гроссман (1913), Эйнштейн (1915): природа гравитации



- Притяжение — отклик на искривление пространства–времени
- Пространство-время говорит материи как ей двигаться
- Материя говорит пространству-времени как ему искривляться
- $R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}$ (уравнения Эйнштейна)
- $R_{\mu\nu} = g^{\alpha\beta}R_{\mu\alpha\nu\beta}$
- $R_{\mu\alpha\nu\beta}$ – тензор Римана
- Теория гравитации Эйнштейна — это геометрия Римана в динамике
- Материя определяет, какой быть геометрии, и сама откликается на геометрию
- Агент — тензор для исчисления расстояний в пространстве-времени



Отсюда получаются и 42.99'' поворота орбиты Меркурия

Геометрия Шварцшильда и родственные ей

Шварцшильд, 1916: точное решение уравнений Эйнштейна



- $ds^2 = \left(1 - \frac{2GM}{c^2 r}\right) c^2 dt^2 - \frac{dr^2}{1 - \frac{2GM}{c^2 r}} - r^2 (\sin^2 \theta d\varphi^2 + d\theta^2)$
- сферически симметричное вакуумное решение
- Около 50 лет не обращали на него большого внимания
- Потом ему дали более выразительное название

Сейчас такие решения — кусок мира, и их знают все:

Геометрия Шварцшильда и родственные ей

Шварцшильд, 1916: точное решение уравнений Эйнштейна



- $ds^2 = \left(1 - \frac{2GM}{c^2 r}\right) c^2 dt^2 - \frac{dr^2}{1 - \frac{2GM}{c^2 r}} - r^2 (\sin^2 \theta d\varphi^2 + d\theta^2)$
- сферически симметричное вакуумное решение
- Около 50 лет не обращали на него большого внимания
- Потом ему дали более выразительное название

Сейчас такие решения — кусок мира, и их знают все:

Геометрия Шварцшильда и родственные ей

Шварцшильд, 1916: точное решение уравнений Эйнштейна



- $ds^2 = \left(1 - \frac{2GM}{c^2 r}\right) c^2 dt^2 - \frac{dr^2}{1 - \frac{2GM}{c^2 r}} - r^2 (\sin^2 \theta d\varphi^2 + d\theta^2)$
- сферически симметричное вакуумное решение
 - Около 50 лет не обращали на него большого внимания
 - Потом ему дали более выразительное название

Сейчас такие решения — кусок мира, и их знают все:

Геометрия Шварцшильда и родственные ей

Шварцшильд, 1916: точное решение уравнений Эйнштейна



- $ds^2 = \left(1 - \frac{2GM}{c^2 r}\right) c^2 dt^2 - \frac{dr^2}{1 - \frac{2GM}{c^2 r}} - r^2 (\sin^2 \theta d\varphi^2 + d\theta^2)$
- сферически симметричное вакуумное решение
- **Около 50 лет не обращали на него большого внимания**
- Потом ему дали более выразительное название

Сейчас такие решения — кусок мира, и их знают все:

Геометрия Шварцшильда и родственные ей

Шварцшильд, 1916: точное решение уравнений Эйнштейна



- $ds^2 = \left(1 - \frac{2GM}{c^2 r}\right) c^2 dt^2 - \frac{dr^2}{1 - \frac{2GM}{c^2 r}} - r^2 (\sin^2 \theta d\varphi^2 + d\theta^2)$
- сферически симметричное вакуумное решение
- Около 50 лет не обращали на него большого внимания
- **Потом ему дали более выразительное название**

Сейчас такие решения — кусок мира, и их знают все:

Геометрия Шварцшильда и родственные ей

Шварцшильд, 1916: точное решение уравнений Эйнштейна



- $ds^2 = \left(1 - \frac{2GM}{c^2 r}\right) c^2 dt^2 - \frac{dr^2}{1 - \frac{2GM}{c^2 r}} - r^2 (\sin^2 \theta d\varphi^2 + d\theta^2)$
- сферически симметричное вакуумное решение
- Около 50 лет не обращали на него большого внимания
- Потом ему дали более выразительное название

Сейчас такие решения — *кусочек мира*, и их знают все:

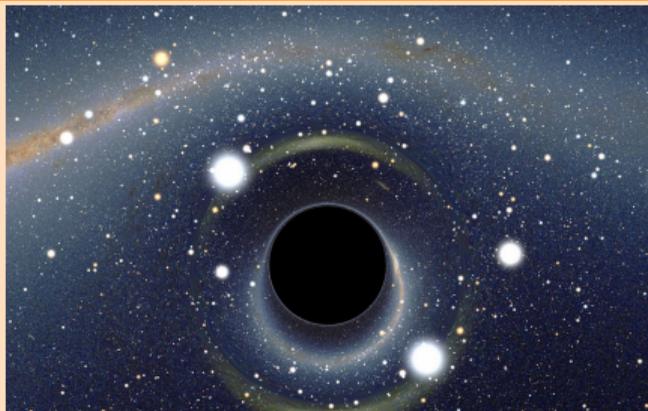
Геометрия Шварцшильда и родственные ей

Шварцшильд, 1916: точное решение уравнений Эйнштейна



- $ds^2 = \left(1 - \frac{2GM}{c^2 r}\right) c^2 dt^2 - \frac{dr^2}{1 - \frac{2GM}{c^2 r}} - r^2 (\sin^2 \theta d\varphi^2 + d\theta^2)$
- сферически симметричное вакуумное решение
- Около 50 лет не обращали на него большого внимания
- Потом ему дали более выразительное название

Сейчас такие решения — *кусочек мира*, и их знают все:



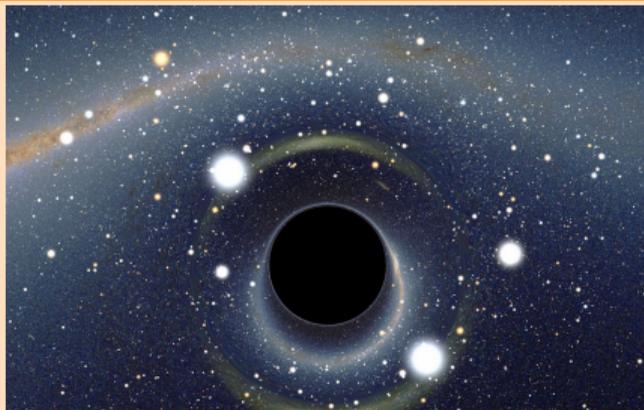
Геометрия Шварцшильда и родственные ей

Шварцшильд, 1916: точное решение уравнений Эйнштейна



- $ds^2 = \left(1 - \frac{2GM}{c^2 r}\right) c^2 dt^2 - \frac{dr^2}{1 - \frac{2GM}{c^2 r}} - r^2 (\sin^2 \theta d\varphi^2 + d\theta^2)$
- сферически симметричное вакуумное решение
- Около 50 лет не обращали на него большого внимания
- Потом ему дали более выразительное название

Сейчас такие решения — *кусочек мира*, и их знают все:



Геометрия Шварцшильда и родственные ей

Шварцшильд, 1916: точное решение уравнений Эйнштейна



- $ds^2 = \left(1 - \frac{2GM}{c^2 r}\right) c^2 dt^2 - \frac{dr^2}{1 - \frac{2GM}{c^2 r}} - r^2 (\sin^2 \theta d\varphi^2 + d\theta^2)$
- сферически симметричное вакуумное решение
- Около 50 лет не обращали на него большого внимания
- Потом ему дали более выразительное название

Сейчас такие решения — *кусочек мира*, и их знают все:



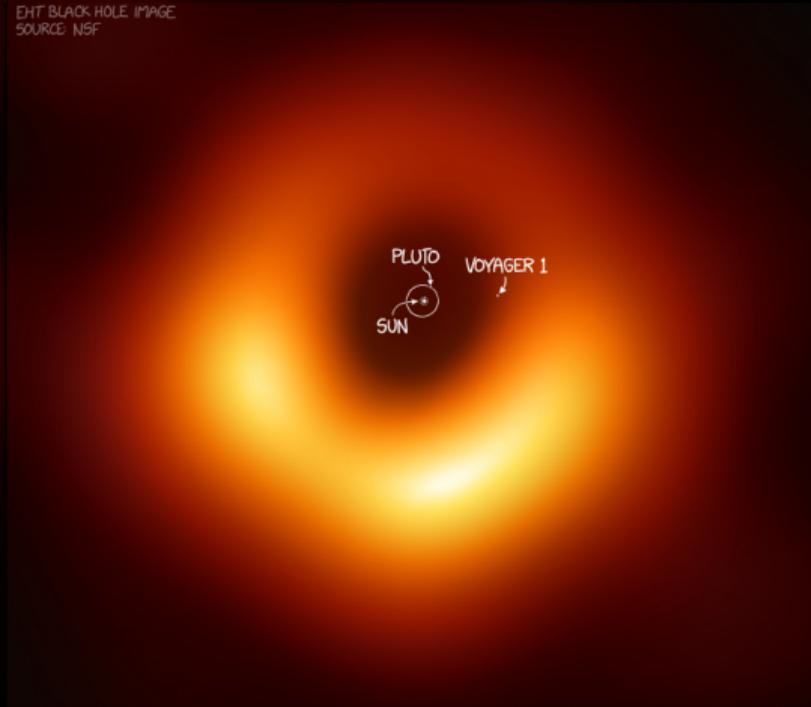
Решения уравнений стали частью физического мира:

В центре каждой галактики находится сверхмассивная черная дыра



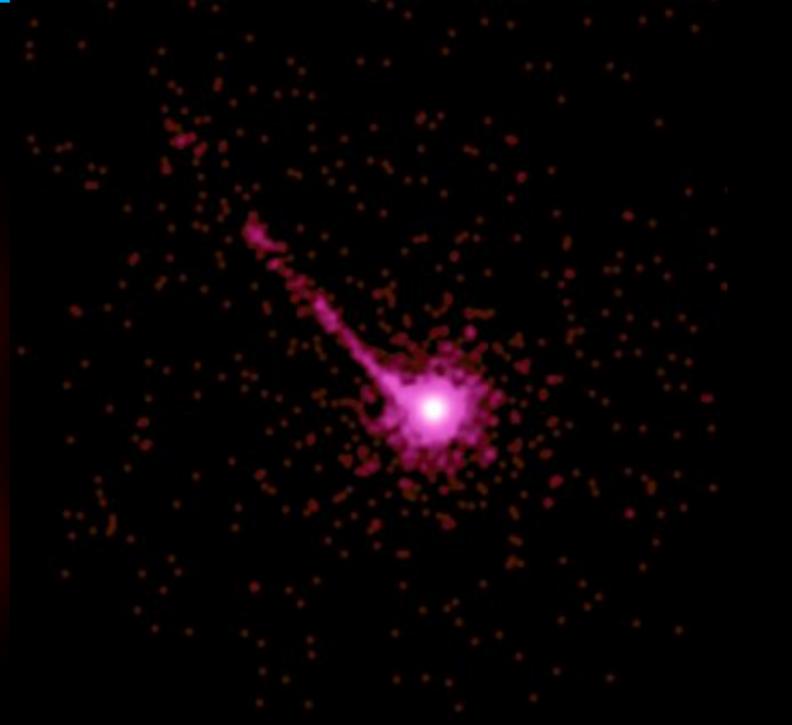
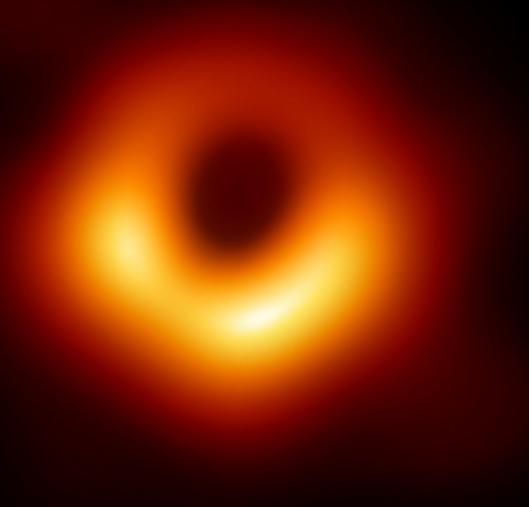
Решения уравнений стали частью физического мира:

В центре каждой галактики находится сверхмассивная черная дыра



Решения уравнений стали частью физического мира:

В центре каждой галактики находится сверхмассивная черная дыра



Многие сверхмассивные черные дыры — квазары, самые мощные постоянные источники энергии во Вселенной

Черные дыры существовали **математически**, “на бумаге” около полувека

Но стали частью физической **реальности**

Сбывшееся “неверное предсказание”

Самое глобальное следствие из уравнений Эйнштейна

Уравнения Эйнштейна — согласие между геометрией и материей

- (представитель геометрии пространства-времени) = (представитель материи)
- Выберем материю в виде “пыли” — равномерное распределение массы/энергии без давления. Такова в среднем наблюдаемая Вселенная
- В какой геометрии такая материя сможет существовать?

Эйнштейн, 1916: какова геометрия Вселенной в целом?

• Единственный вариант — равномерное распределение материи

• Уравнения Эйнштейна не имеют решений с такой материей

• Эйнштейн хотел избежать проблемы, которую поставил Эддингтон в 1916 году — равномерное распределение материи

• Уравнения Эйнштейна не имеют решений с такой материей

Позднее выяснилось, что решение “плохое” — неустойчивое

• Эйнштейн считал, что равномерное распределение материи — единственное решение уравнений Эйнштейна

Самое глобальное следствие из уравнений Эйнштейна

Уравнения Эйнштейна — согласие между геометрией и материей

- $\left(\begin{array}{l} \text{представитель геометрии} \\ \text{пространства-времени} \end{array} \right) = (\text{представитель материи})$
 - Выберем материю в виде “пыли” — равномерное распределение массы/энергии без давления. Такова в среднем наблюдаемая Вселенная
 - В какой геометрии такая материя сможет существовать?

Эйнштейн, 1916: какова геометрия Вселенной в целом?

Эйнштейн решил задачу, поставив задачу о равномерном распределении массы/энергии в пространстве-времени. Он нашел решение, которое было устойчивым. Это решение было устойчивым, потому что оно было устойчивым. Эйнштейн решил задачу, поставив задачу о равномерном распределении массы/энергии в пространстве-времени. Он нашел решение, которое было устойчивым. Это решение было устойчивым, потому что оно было устойчивым.

Позднее выяснилось, что решение “плохое” — неустойчивое

Эйнштейн решил задачу, поставив задачу о равномерном распределении массы/энергии в пространстве-времени. Он нашел решение, которое было устойчивым. Это решение было устойчивым, потому что оно было устойчивым.

Самое глобальное следствие из уравнений Эйнштейна

Уравнения Эйнштейна — согласие между геометрией и материей

- $\left(\begin{array}{l} \text{представитель геометрии} \\ \text{пространства–времени} \end{array} \right) = (\text{представитель материи})$
- Выберем материю в виде “пыли” — равномерное распределение массы/энергии без давления. Такова в среднем наблюдаемая Вселенная
- В какой геометрии такая материя сможет существовать?

Эйнштейн, 1916: какова геометрия Вселенной в целом?

Позднее выяснилось, что решение “плохое” — неустойчивое

Самое глобальное следствие из уравнений Эйнштейна

Уравнения Эйнштейна — согласие между геометрией и материей

- $\left(\begin{array}{l} \text{представитель геометрии} \\ \text{пространства-времени} \end{array} \right) = (\text{представитель материи})$
- Выберем материю в виде “пыли” — равномерное распределение массы/энергии без давления. Такова в среднем наблюдаемая Вселенная
- В какой геометрии такая материя сможет существовать?

Эйнштейн, 1916: какова геометрия Вселенной в целом?

- Найти не только однородную, но и стационарную вселенную
- Уравнения отказывались предоставить такое решение
- Эйнштейн: можно изменить уравнения, добавив простое слагаемое с новой “космологической постоянной” Λ
- У новых уравнений появилось стационарное решение

Позднее выяснилось, что решение “плохое” — неустойчивое

См. также: [https://www.youtube.com/watch?v=U1111111111](#)

Самое глобальное следствие из уравнений Эйнштейна

Уравнения Эйнштейна — согласие между геометрией и материей

- $\left(\begin{array}{l} \text{представитель геометрии} \\ \text{пространства-времени} \end{array} \right) = (\text{представитель материи})$
- Выберем материю в виде “пыли” — равномерное распределение массы/энергии без давления. Такова в среднем наблюдаемая Вселенная
- В какой геометрии такая материя сможет существовать?

Эйнштейн, 1916: какова геометрия Вселенной в целом?

- Найти не только однородную, но и стационарную вселенную
- Уравнения отказывались предоставить такое решение
- Эйнштейн: можно изменить уравнения, добавив простое слагаемое с новой “космологической постоянной” Λ
- У новых уравнений появилось стационарное решение

Позднее выяснилось, что решение “плохое” — неустойчивое

Самое глобальное следствие из уравнений Эйнштейна — согласие между геометрией и материей

Самое глобальное следствие из уравнений Эйнштейна

Уравнения Эйнштейна — согласие между геометрией и материей

- $\left(\begin{array}{l} \text{представитель геометрии} \\ \text{пространства-времени} \end{array} \right) = (\text{представитель материи})$
- Выберем материю в виде “пыли” — равномерное распределение массы/энергии без давления. Такова в среднем наблюдаемая Вселенная
- В какой геометрии такая материя сможет существовать?

Эйнштейн, 1916: какова геометрия Вселенной в целом?

- Найти не только однородную, но и стационарную вселенную
- Уравнения отказывались предоставить такое решение
- Эйнштейн: можно изменить уравнения, добавив простое слагаемое с новой “космологической постоянной” Λ
- У новых уравнений появилось стационарное решение

Позднее выяснилось, что решение “плохое” — неустойчивое

Самое глобальное следствие из уравнений Эйнштейна

Уравнения Эйнштейна — согласие между геометрией и материей

- $\left(\begin{array}{l} \text{представитель геометрии} \\ \text{пространства-времени} \end{array} \right) = (\text{представитель материи})$
- Выберем материю в виде “пыли” — равномерное распределение массы/энергии без давления. Такова в среднем наблюдаемая Вселенная
- В какой геометрии такая материя сможет существовать?

Эйнштейн, 1916: какова геометрия Вселенной в целом?

- Найти не только однородную, но и стационарную вселенную
- Уравнения отказывались предоставить такое решение
- Эйнштейн: можно изменить уравнения, добавив простое слагаемое с новой “космологической постоянной” Λ
- У новых уравнений появилось стационарное решение

Позднее выяснилось, что решение “плохое” — неустойчивое

Самое глобальное следствие из уравнений Эйнштейна

Уравнения Эйнштейна — согласие между геометрией и материей

- $\left(\begin{array}{l} \text{представитель геометрии} \\ \text{пространства–времени} \end{array} \right) = (\text{представитель материи})$
- Выберем материю в виде “пыли” — равномерное распределение массы/энергии без давления. Такова в среднем наблюдаемая Вселенная
- В какой геометрии такая материя сможет существовать?

Эйнштейн, 1916: какова геометрия Вселенной в целом?

- Найти не только однородную, но и стационарную вселенную
- Уравнения отказывались предоставить такое решение
- Эйнштейн: можно изменить уравнения, добавив простое слагаемое с новой “космологической постоянной” Λ
- У новых уравнений появилось стационарное решение

Позднее выяснилось, что решение “плохое” — неустойчивое

Самое глобальное следствие из уравнений Эйнштейна

Уравнения Эйнштейна — согласие между геометрией и материей

- $\left(\begin{array}{l} \text{представитель геометрии} \\ \text{пространства–времени} \end{array} \right) = (\text{представитель материи})$
- Выберем материю в виде “пыли” — равномерное распределение массы/энергии без давления. Такова в среднем наблюдаемая Вселенная
- В какой геометрии такая материя сможет существовать?

Эйнштейн, 1916: какова геометрия Вселенной в целом?

- Найти не только однородную, но и стационарную вселенную
- Уравнения отказывались предоставить такое решение
- Эйнштейн: можно изменить уравнения, добавив простое слагаемое с новой “космологической постоянной” Λ
- У новых уравнений появилось стационарное решение

Позднее выяснилось, что решение “плохое” — неустойчивое

- Эйнштейн считал добавление космологической постоянной своим самым большим промахом

Самое глобальное следствие из уравнений Эйнштейна

Уравнения Эйнштейна — согласие между геометрией и материей

- $\left(\begin{array}{l} \text{представитель геометрии} \\ \text{пространства–времени} \end{array} \right) = (\text{представитель материи})$
- Выберем материю в виде “пыли” — равномерное распределение массы/энергии без давления. Такова в среднем наблюдаемая Вселенная
- В какой геометрии такая материя сможет существовать?

Эйнштейн, 1916: какова геометрия Вселенной в целом?

- Найти не только однородную, но и стационарную вселенную
- Уравнения отказывались предоставить такое решение
- Эйнштейн: можно изменить уравнения, добавив простое слагаемое с новой “космологической постоянной” Λ
- У новых уравнений появилось стационарное решение

Позднее выяснилось, что решение “плохое” — неустойчивое

- Эйнштейн считал добавление космологической постоянной своим самым большим промахом

Мы живем во фридмановой вселенной

Фридман, 1922–1924:

(никакой Λ !)



- Решение уравнений Эйнштейна – нестационарная вселенная
- Расстояния в ней или увеличиваются, или уменьшаются
- В зависимости от средней плотности энергии расширение может или продолжаться вечно, или смениться сжатием
- Хаббл 1927: Вселенная расширяется!

Мы живем во фридмановой вселенной

Фридман, 1922–1924:

(никакой Λ !)



- Решение уравнений Эйнштейна – нестационарная вселенная
- Расстояния в ней или увеличиваются, или уменьшаются
 - она или расширяется, или сжимается
- В зависимости от средней плотности энергии расширение может или продолжаться вечно, или смениться сжатием
- Хаббл 1927: Вселенная расширяется!

Мы живем во фридмановой вселенной

Фридман, 1922–1924:

(никакой Λ !)



- Решение уравнений Эйнштейна – нестационарная вселенная
- Расстояния в ней или увеличиваются, или уменьшаются
 - она или расширяется, или сжимается
- В зависимости от средней плотности энергии расширение может или продолжаться вечно, или смениться сжатием
- Хаббл 1927: Вселенная расширяется!

Мы живем во фридмановой вселенной

Фридман, 1922–1924:

(никакой Λ !)



- Решение уравнений Эйнштейна – нестационарная вселенная
- Расстояния в ней или увеличиваются, или уменьшаются
 - она или расширяется, или сжимается
- В зависимости от средней плотности энергии расширение может или продолжаться вечно, или смениться сжатием
- Хаббл 1927: Вселенная расширяется!

Мы живем во фридмановой вселенной

Фридман, 1922–1924:

(никакой Λ !)



- Решение уравнений Эйнштейна – нестационарная вселенная
- Расстояния в ней или увеличиваются, или уменьшаются
— она или расширяется, или сжимается
- В зависимости от средней плотности энергии расширение может или продолжаться вечно, или смениться сжатием
- Хаббл 1927: Вселенная расширяется!



Мы живем во фридмановой вселенной

Фридман, 1922–1924:



- Решение уравнений Эйнштейна – нестационарная вселенная
 - Расстояния в ней или увеличиваются, или уменьшаются
— она или расширяется, или сжимается
 - В зависимости от средней плотности энергии расширение может или продолжаться вечно, или смениться сжатием
 - Хаббл 1927: Вселенная расширяется!
- Притяжение всех частей материи ко всем должно замедлять расширение Вселенной
- 1998: две группы астрономов взялись определить темп замедления
- Оказалось, что темп расширения увеличивается
- На больших расстояниях действует расталкивание — что-то типа антигравитации
- Как же это согласовать с уравнениями Эйнштейна?



Мы живем во фридмановой вселенной

Фридман, 1922–1924:



- Решение уравнений Эйнштейна – нестационарная вселенная
 - Расстояния в ней или увеличиваются, или уменьшаются — она или расширяется, или сжимается
 - В зависимости от средней плотности энергии расширение может или продолжаться вечно, или смениться сжатием
 - Хаббл 1927: Вселенная расширяется!
-
- Притяжение всех частей материи ко всем должно замедлять расширение Вселенной
 - **1998: две группы астрономов взяли определить темп замедления**
 - Оказалось, что темп расширения увеличивается
 - На больших расстояниях действует расталкивание — что-то типа антигравитации
 - Как же это согласовать с уравнениями Эйнштейна?



Мы живем во фридмановой вселенной

Фридман, 1922–1924:



- Решение уравнений Эйнштейна – нестационарная вселенная
 - Расстояния в ней или увеличиваются, или уменьшаются
— она или расширяется, или сжимается
 - В зависимости от средней плотности энергии расширение может или продолжаться вечно, или смениться сжатием
 - Хаббл 1927: Вселенная расширяется!
-
- Притяжение всех частей материи ко всем должно замедлять расширение Вселенной
 - 1998: две группы астрономов взялись определить темп замедления
 - **Оказалось, что темп расширения увеличивается**
 - На больших расстояниях действует расталкивание — что-то типа антигравитации
 - Как же это согласовать с уравнениями Эйнштейна?



Мы живем во фридмановой вселенной

Фридман, 1922–1924:



- Решение уравнений Эйнштейна – нестационарная вселенная
- Расстояния в ней или увеличиваются, или уменьшаются — она или расширяется, или сжимается
- В зависимости от средней плотности энергии расширение может или продолжаться вечно, или смениться сжатием
- Хаббл 1927: Вселенная расширяется!
- Притяжение всех частей материи ко всем должно замедлять расширение Вселенной
- 1998: две группы астрономов взялись определить темп замедления
- Оказалось, что темп расширения увеличивается
- На больших расстояниях действует расталкивание — что-то типа антигравитации
- Как же это согласовать с уравнениями Эйнштейна?



Мы живем во фридмановой вселенной

Фридман, 1922–1924:



- Решение уравнений Эйнштейна – нестационарная вселенная
 - Расстояния в ней или увеличиваются, или уменьшаются — она или расширяется, или сжимается
 - В зависимости от средней плотности энергии расширение может или продолжаться вечно, или смениться сжатием
 - Хаббл 1927: Вселенная расширяется!
-
- Притяжение всех частей материи ко всем должно замедлять расширение Вселенной
 - 1998: две группы астрономов взялись определить темп замедления
 - Оказалось, что темп расширения увеличивается
 - На больших расстояниях действует расталкивание — что-то типа антигравитации
 - Как же это согласовать с уравнениями Эйнштейна?



Мы живем в Λ -фридмановой вселенной

Работает космологическое слагаемое, добавленное Эйнштейном

- Эйнштейн увидел, что добавление космологической постоянной не нарушает основные принципы
- Добавил, исходя из неверной идея о стационарной вселенной
- Мы не живем в стационарной вселенной, не надо было добавлять
- Но космологическое слагаемое описывает *ускоренное* расширение вселенной
- Снова понадобилось его добавить

Добавленное слагаемое назвали темной энергией

Темная энергия — синоним ускоренного расширения Вселенной
О ее природе не известно ничего

Мораль

В природе существуют явления, которые мы не можем объяснить с помощью известных законов физики и химии

Мы живем в Λ -фридмановой вселенной

Работает космологическое слагаемое, добавленное Эйнштейном

- Эйнштейн увидел, что добавление космологической постоянной не нарушает основные принципы
- Добавил, исходя из неверной идея о стационарной вселенной
- Мы не живем в стационарной вселенной, не надо было добавлять
- Но космологическое слагаемое описывает *ускоренное* расширение вселенной
- Снова понадобилось его добавить

Добавленное слагаемое назвали темной энергией

Темная энергия — синоним ускоренного расширения Вселенной
О ее природе не известно ничего

Мораль

Вспомните сказку о мальчике, который кричал "волки" и "волки"
Может быть, и сейчас кто-то кричит "волки" и "волки"

Мы живем в Λ -фридмановой вселенной

Работает космологическое слагаемое, добавленное Эйнштейном

- Эйнштейн увидел, что добавление космологической постоянной не нарушает основные принципы
- **Добавил, исходя из неверной идея о стационарной вселенной**
- Мы не живем в стационарной вселенной, не надо было добавлять
- Но космологическое слагаемое описывает *ускоренное* расширение вселенной
- Снова понадобилось его добавить

Добавленное слагаемое назвали темной энергией

Темная энергия — синоним ускоренного расширения Вселенной
О ее природе не известно ничего

Мораль

Самые большие космологические загадки — темная материя и темная энергия — являются следствием наших ошибок в понимании Вселенной

Мы живем в Λ -фридмановой вселенной

Работает космологическое слагаемое, добавленное Эйнштейном

- Эйнштейн увидел, что добавление космологической постоянной не нарушает основные принципы
- Добавил, исходя из неверной идея о стационарной вселенной
- Мы не живем в стационарной вселенной, не надо было добавлять
- Но космологическое слагаемое описывает ускоренное расширение вселенной
- Снова понадобилось его добавить

Добавленное слагаемое назвали темной энергией

Темная энергия — синоним ускоренного расширения Вселенной
О ее природе не известно ничего

Мораль

Мы живем в Λ -фридмановой вселенной

Работает космологическое слагаемое, добавленное Эйнштейном

- Эйнштейн увидел, что добавление космологической постоянной не нарушает основные принципы
- Добавил, исходя из неверной идея о стационарной вселенной
- Мы не живем в стационарной вселенной, не надо было добавлять
- Но космологическое слагаемое описывает *ускоренное расширение вселенной*
- Снова понадобилось его добавить

Добавленное слагаемое назвали темной энергией

Темная энергия — синоним ускоренного расширения Вселенной.
О ее природе не известно ничего.

Мораль

Мы живем в Λ -фридмановой вселенной

Работает космологическое слагаемое, добавленное Эйнштейном

- Эйнштейн увидел, что добавление космологической постоянной не нарушает основные принципы
- Добавил, исходя из неверной идея о стационарной вселенной
- Мы не живем в стационарной вселенной, не надо было добавлять
- Но космологическое слагаемое описывает *ускоренное* расширение вселенной
- **Снова понадобилось его добавить**

Добавленное слагаемое назвали темной энергией

Темная энергия — основной ускоренного расширения Вселенной.
Она не взаимодействует с веществом.

Мораль

Мы живем в Λ -фридмановой вселенной

Работает космологическое слагаемое, добавленное Эйнштейном

- Эйнштейн увидел, что добавление космологической постоянной не нарушает основные принципы
- Добавил, исходя из неверной идея о стационарной вселенной
- Мы не живем в стационарной вселенной, не надо было добавлять
- Но космологическое слагаемое описывает *ускоренное* расширение вселенной
- Снова понадобилось его добавить

Добавленное слагаемое назвали темной энергией

- Темная энергия — синоним ускоренного расширения Вселенной
- О ее природе не известно ничего

Мораль

Мы живем в Λ -фридмановой вселенной

Работает космологическое слагаемое, добавленное Эйнштейном

- Эйнштейн увидел, что добавление космологической постоянной не нарушает основные принципы
- Добавил, исходя из неверной идея о стационарной вселенной
- Мы не живем в стационарной вселенной, не надо было добавлять
- Но космологическое слагаемое описывает *ускоренное* расширение вселенной
- Снова понадобилось его добавить

Добавленное слагаемое назвали темной энергией

- Темная энергия — синоним ускоренного расширения Вселенной
- О ее природе не известно ничего

Мораль

Мы живем в Λ -фридмановой вселенной

Работает космологическое слагаемое, добавленное Эйнштейном

- Эйнштейн увидел, что добавление космологической постоянной не нарушает основные принципы
- Добавил, исходя из неверной идея о стационарной вселенной
- Мы не живем в стационарной вселенной, не надо было добавлять
- Но космологическое слагаемое описывает *ускоренное* расширение вселенной
- Снова понадобилось его добавить

Добавленное слагаемое назвали темной энергией

- Темная энергия — синоним ускоренного расширения Вселенной
- **О ее природе не известно ничего**

Мораль

Мы живем в Λ -фридмановой вселенной

Работает космологическое слагаемое, добавленное Эйнштейном

- Эйнштейн увидел, что добавление космологической постоянной не нарушает основные принципы
- Добавил, исходя из неверной идея о стационарной вселенной
- Мы не живем в стационарной вселенной, не надо было добавлять
- Но космологическое слагаемое описывает *ускоренное* расширение вселенной
- Снова понадобилось его добавить

Добавленное слагаемое назвали темной энергией

- Темная энергия — синоним ускоренного расширения Вселенной
- О ее природе не известно ничего

Мораль

- В природе оказалось реализованным то, что было *разрешено* успешными уравнениями и общими принципами

Мы живем в Λ -фридмановой вселенной

Работает космологическое слагаемое, добавленное Эйнштейном

- Эйнштейн увидел, что добавление космологической постоянной не нарушает основные принципы
- Добавил, исходя из неверной идея о стационарной вселенной
- Мы не живем в стационарной вселенной, не надо было добавлять
- Но космологическое слагаемое описывает *ускоренное* расширение вселенной
- Снова понадобилось его добавить

Добавленное слагаемое назвали темной энергией

- Темная энергия — синоним ускоренного расширения Вселенной
- О ее природе не известно ничего

Мораль

- В природе оказалось реализованным то, что было *разрешено* успешными уравнениями и общими принципами

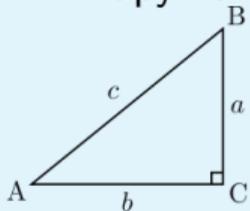
Еще одно предсказание: 100 лет ожидания

Возможна *распространяющаяся* кривизна:

Еще одно предсказание: 100 лет ожидания

Возможна *распространяющаяся* кривизна:

- Нарушения в теореме Пифагора

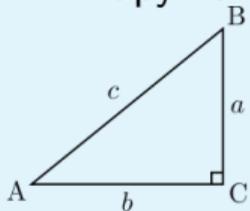


$$c^2 = a^2 + b^2 \quad \Rightarrow \quad c^2 = (1 + \alpha)a^2 + (1 + \beta)b^2 + 2\gamma ab$$

Еще одно предсказание: 100 лет ожидания

Возможна *распространяющаяся* кривизна:

- Нарушения в теореме Пифагора



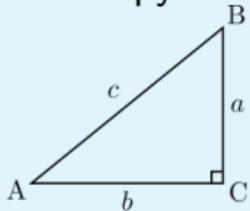
$$c^2 = a^2 + b^2 \quad \Longrightarrow \quad c^2 = (1 + \alpha)a^2 + (1 + \beta)b^2 + 2\gamma ab$$

Распространяющаяся кривизна – это определенного вида решение
линеаризованных уравнений Эйнштейна

Еще одно предсказание: 100 лет ожидания

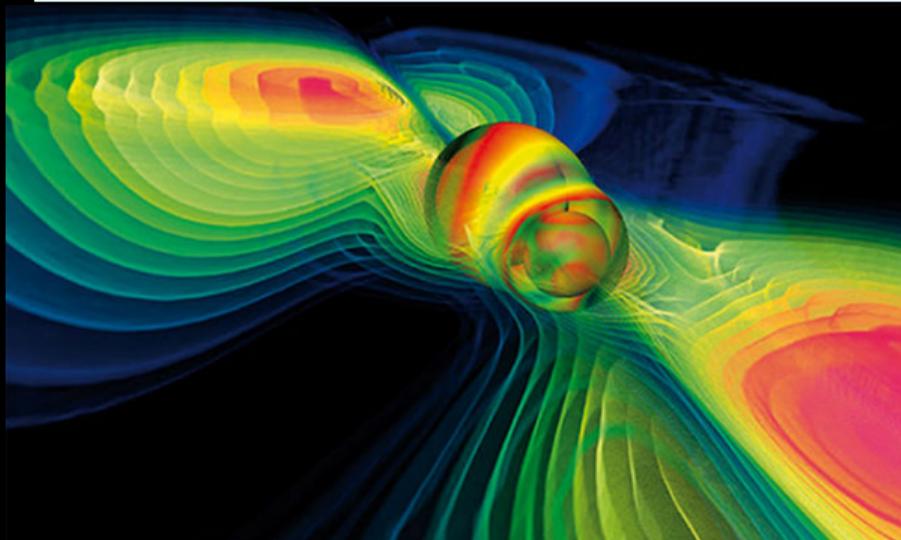
Возможна *распространяющаяся* кривизна:

- Нарушения в теореме Пифагора



$$c^2 = a^2 + b^2 \quad \Longrightarrow \quad c^2 = (1 + \alpha)a^2 + (1 + \beta)b^2 + 2\gamma ab$$

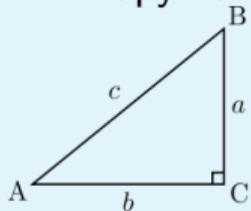
Распространяющаяся кривизна – это определенного вида решение
линеаризованных уравнений Эйнштейна



Еще одно предсказание: 100 лет ожидания

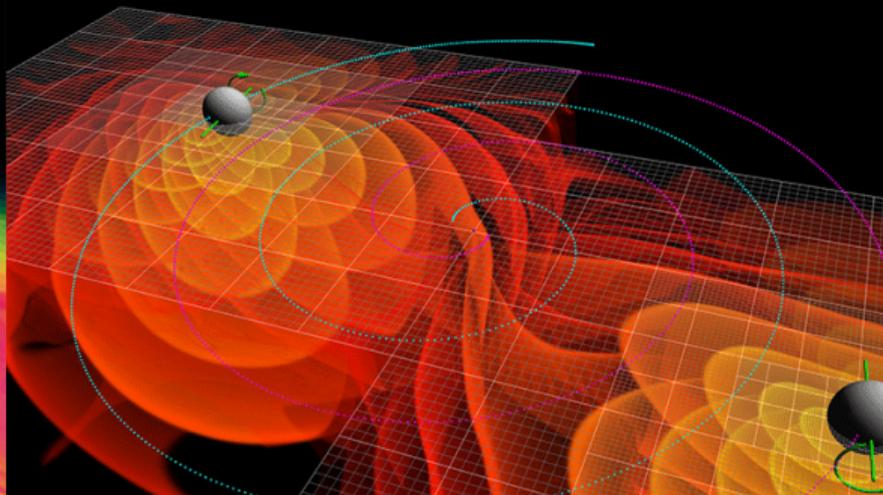
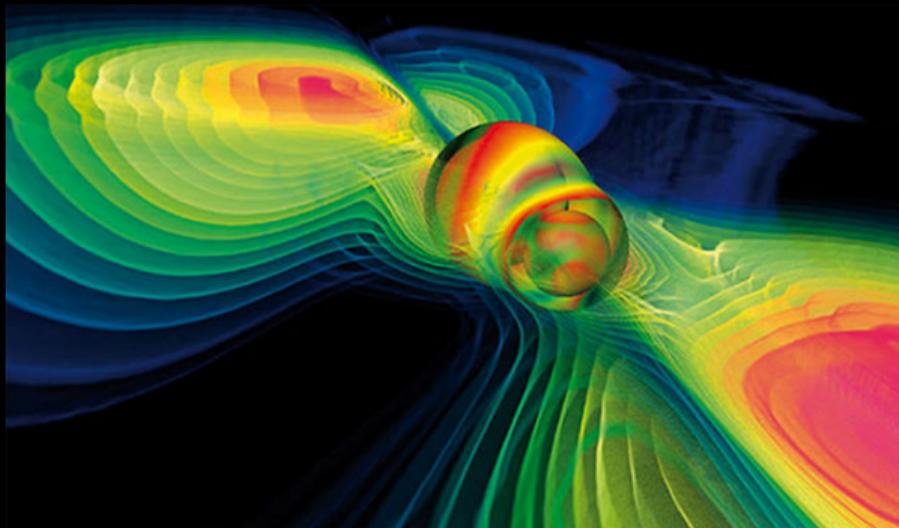
Возможна *распространяющаяся* кривизна:

- Нарушения в теореме Пифагора



$$c^2 = a^2 + b^2 \quad \Longrightarrow \quad c^2 = (1 + \alpha)a^2 + (1 + \beta)b^2 + 2\gamma ab$$

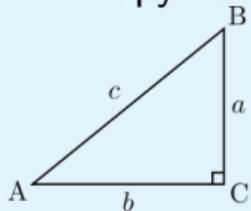
Распространяющаяся кривизна – это определенного вида решение
линеаризованных уравнений Эйнштейна



Еще одно предсказание: 100 лет ожидания

Возможна *распространяющаяся* кривизна:

- Нарушения в теореме Пифагора



$$c^2 = a^2 + b^2 \quad \Longrightarrow \quad c^2 = (1 + \alpha)a^2 + (1 + \beta)b^2 + 2\gamma ab$$

Распространяющаяся кривизна – это определенного вида решение
линеаризованных уравнений Эйнштейна

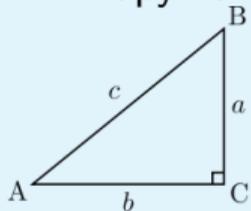
И, да, их обнаружили (LIGO)



Еще одно предсказание: 100 лет ожидания

Возможна *распространяющаяся* кривизна:

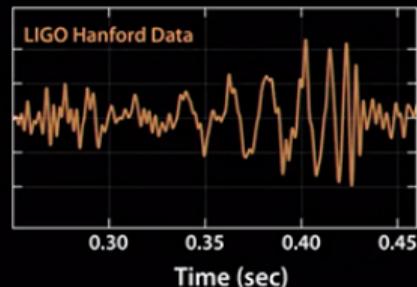
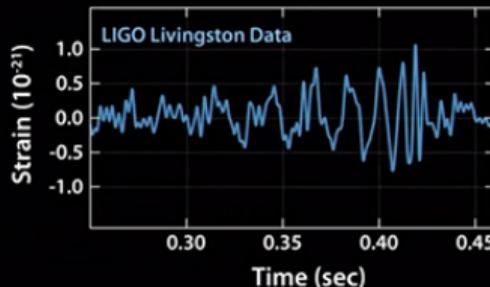
- Нарушения в теореме Пифагора



$$c^2 = a^2 + b^2 \quad \Longrightarrow \quad c^2 = (1 + \alpha)a^2 + (1 + \beta)b^2 + 2\gamma ab$$

Распространяющаяся кривизна – это определенного вида решение
линеаризованных уравнений Эйнштейна

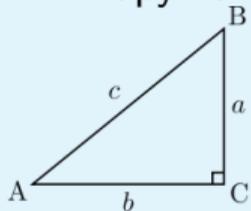
И, да, их обнаружили (LIGO)



Еще одно предсказание: 100 лет ожидания

Возможна *распространяющаяся* кривизна:

- Нарушения в теореме Пифагора



$$c^2 = a^2 + b^2 \quad \Rightarrow \quad c^2 = (1 + \alpha)a^2 + (1 + \beta)b^2 + 2\gamma ab$$

Распространяющаяся кривизна – это определенного вида решение
линеаризованных уравнений Эйнштейна

И, да, их обнаружили (LIGO)



The Nobel Prize in Physics 2017

Nobelpriset i fysik 2017

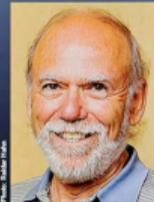


Med ena hälften till
With one half to:



Rainer Weiss
LIGO/VIRGO Collaboration

och med den andra hälften gemensamt
and with the other half jointly to:



Barry C. Barish
LIGO/VIRGO Collaboration



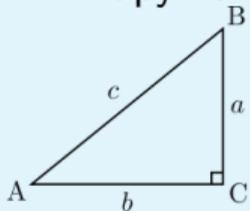
Kip S. Thorne
LIGO/VIRGO Collaboration

"för avgörande bidrag till LIGO-detektorn och observationen av gravitationsvågor"

Еще одно предсказание: 100 лет ожидания

Возможна *распространяющаяся* кривизна:

- Нарушения в теореме Пифагора

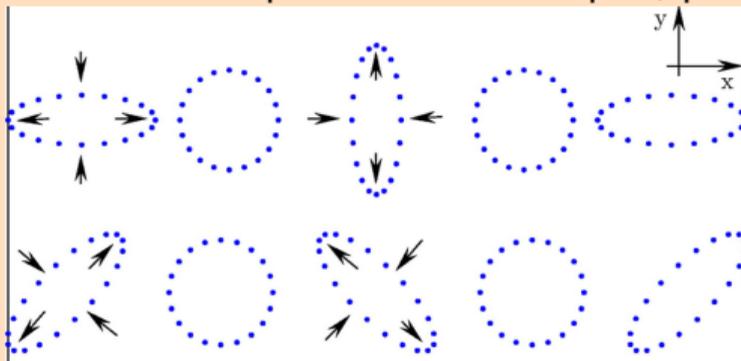


$$c^2 = a^2 + b^2 \implies c^2 = (1 + \alpha)a^2 + (1 + \beta)b^2 + 2\gamma ab$$

Распространяющаяся кривизна – это определенного вида решение
линеаризованных уравнений Эйнштейна

И, да, их обнаружили (LIGO)

Гравитационные волны — это риманова геометрия, распространяющаяся со
скоростью света



Мы понимаем устройство Вселенной и диковинных объектов в ней благодаря Римановой геометрии (1854).

“Мораль”:

Мысль может проделать долгий путь, чтобы стать предсказанием
Нужна **ВООРУЖЕННАЯ** мысль.

Мысль **МОЖЕТ** опередить наблюдение на десятки лет

Математика снова приготовлена заранее

Предсказание того, что меньше неделимого

Поиски “кирпичиков” материи

- (электрон), протон, нейтрон
- 1950-е: мезоны, гипероны, — “слишком много”
- Классификация зоопарка элементарных частиц по *семействам*.
- Сколько частиц в семействах: 8, 10, 15, 15, 21, ...
- Картинки из учебника математики

1	3	6	10	15	21
	8	15	24	35	48
		27	42	60	81
			64	90	120
				125	165
					216

- Сколько точек на математических картинках:
- Семейство из трех частиц никогда не наблюдалось
 - $3 \otimes 3 = 6 + 3 + 3$
 - $3 \otimes 3 \otimes 3 = 10 + 10 + 6 + 6 + 3 + 3 + 3 + 3$
- Соблазнительная математика: операция \otimes производит из семейства **3** все остальные семейства!!
 - $3 \otimes 3 \otimes 3 \otimes 3 = 15 + 15 + 10 + 10 + 6 + 6 + 3 + 3 + 3 + 3$

Предсказание того, что меньше неделимого

Поиски “кирпичиков” материи

- (электрон), протон, нейтрон

- 1950-е: мезоны, гипероны, — “слишком много”
- Классификация зоопарка элементарных частиц по *семействам*.
- Сколько частиц в семействах: 8, 10, 15, 15, 21, ...
- Картинки из учебника математики

1	3	6	10	15	21
	8	15	24	35	48
		27	42	60	81
			64	90	120
				125	165
					216

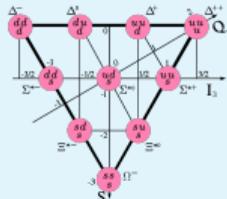
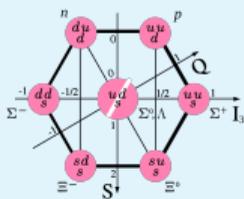
- Сколько точек на математических картинках:
- Семейство из трех частиц никогда не наблюдалось
 - $3 \otimes 3 = 6 + 3 + 3$
 - $3 \otimes 3 \otimes 3 = 10 + 10 + 6 + 6 + 3 + 3 + 3 + 3$
- Соблазнительная математика: операция \otimes производит из семейства **3** все остальные семейства!!

- $3 \otimes 3 \otimes 3 \otimes 3 = 35 + 35 + 21 + 21 + 15 + 15 + 10 + 10 + 6 + 6 + 3 + 3 + 3 + 3$

Предсказание того, что меньше неделимого

Поиски “кирпичиков” материи

- (электрон), протон, нейтрон
- 1950-е: мезоны, гипероны, — “слишком много”
- **Классификация зоопарка элементарных частиц по семействам.**



- Сколько частиц в семействах: 8, 10, 15, 15, 21, ...
- Картинки из учебника математики

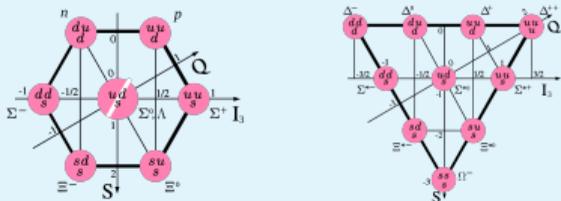
1	3	6	10	15	21
	8	15	24	35	48
		27	42	60	81
			64	90	120
				125	165
					216

- Сколько точек на математических картинках:
- Семейство из трех частиц никогда не наблюдалось

Предсказание того, что меньше неделимого

Поиски “кирпичиков” материи

- (электрон), протон, нейтрон
- 1950-е: мезоны, гипероны, — “слишком много”
- Классификация зоопарка элементарных частиц по *семействам*.



- Сколько частиц в семействах: 8, 10, 15, 15, 21, ...

- Картинки из учебника математики

1	3	6	10	15	21
	8	15	24	35	48
		27	42	60	81
			64	90	120
				125	165
					216

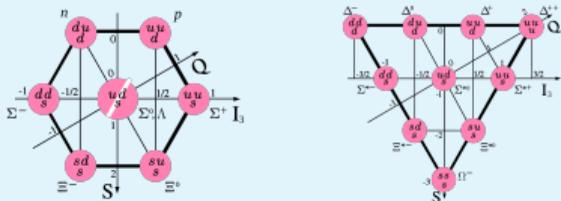
- Сколько точек на математических картинках:

- Семейство из трех частиц никогда не наблюдалось

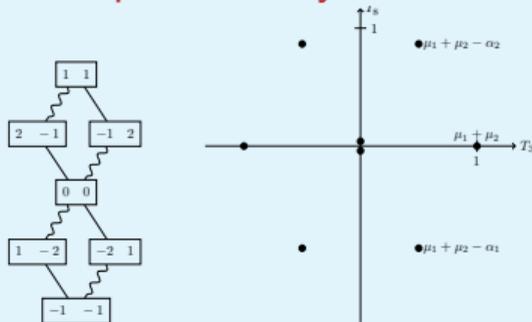
Предсказание того, что меньше неделимого

Поиски “кирпичиков” материи

- (электрон), протон, нейтрон
- 1950-е: мезоны, гипероны, — “слишком много”
- Классификация зоопарка элементарных частиц по семействам.



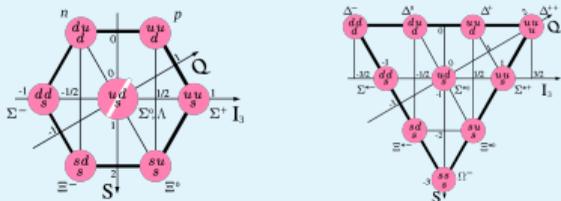
- Сколько частиц в семействах: 8, 10, 15, 15, 21, ...
- Картинки из учебника математики:



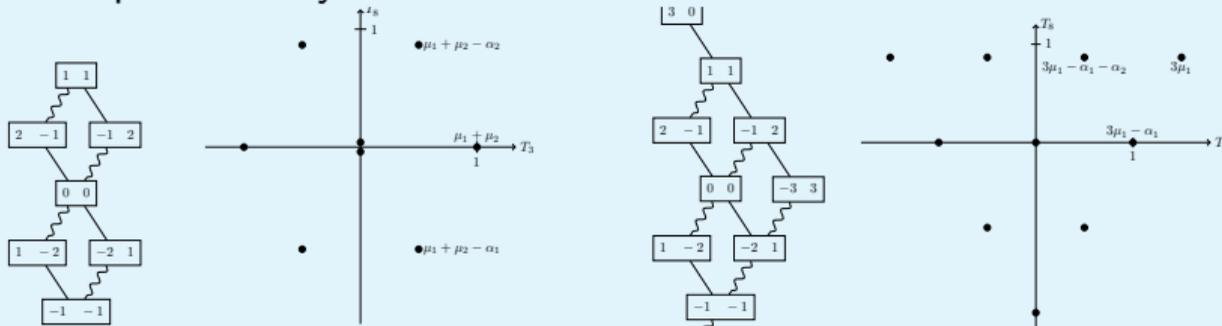
Предсказание того, что меньше неделимого

Поиски “кирпичиков” материи

- (электрон), протон, нейтрон
- 1950-е: мезоны, гипероны, — “слишком много”
- Классификация зоопарка элементарных частиц по *семействам*.



- Сколько частиц в семействах: 8, 10, 15, 15, 21, ...
- Картинки из учебника математики:



Предсказание того, что меньше неделимого

Поиски “кирпичиков” материи

- (электрон), протон, нейтрон
- 1950-е: мезоны, гипероны, — “слишком много”
- Классификация зоопарка элементарных частиц по *семействам*.
- Сколько частиц в семействах: 8, 10, 15, 15, 21, ...
- Картинки из учебника математики — представления $SU(3)$

1	3	6	10	15	21
	8	15	24	35	48
		27	42	60	81
			64	90	120
				125	165
					216

- Семейство из трех частиц никогда не наблюдалось
 - у них должны быть дробные электрические заряды: $\pm\frac{1}{3}, \pm\frac{2}{3}$
 - — такие заряды никогда не наблюдались!
- Соблазнительная математика: операция \otimes производит из семейства **3** все остальные семейства!

Предсказание того, что меньше неделимого

Поиски “кирпичиков” материи

- (электрон), протон, нейтрон
- 1950-е: мезоны, гипероны, — “слишком много”
- Классификация зоопарка элементарных частиц по *семействам*.
- Сколько частиц в семействах: 8, 10, 15, 15, 21, ...
- Картинки из учебника математики — представления $SU(3)$

1	3	6	10	15	21
	8	15	24	35	48
		27	42	60	81
			64	90	120
				125	165
					216

- Семейство из трех частиц никогда не наблюдалось
 - у них должны быть дробные электрические заряды: $\pm\frac{1}{3}$, $\pm\frac{2}{3}$
 - — такие заряды никогда не наблюдались!
- Соблазнительная математика: операция \otimes производит из семейства **3** все остальные семейства!

Предсказание того, что меньше неделимого

Поиски “кирпичиков” материи

- (электрон), протон, нейтрон
- 1950-е: мезоны, гипероны, — “слишком много”
- Классификация зоопарка элементарных частиц по *семействам*.
- Сколько частиц в семействах: 8, 10, 15, 15, 21, ...
- Картинки из учебника математики — представления $SU(3)$

1	3	6	10	15	21
	8	15	24	35	48
		27	42	60	81
			64	90	120
				125	165
					216

- Семейство из трех частиц никогда не наблюдалось
 - у них должны быть дробные электрические заряды: $\pm\frac{1}{3}$, $\pm\frac{2}{3}$
 - — такие заряды никогда не наблюдались!
- Соблазнительная математика: операция \otimes производит из семейства **3** все остальные семейства!

Предсказание того, что меньше неделимого

Поиски “кирпичиков” материи

- (электрон), протон, нейтрон
- 1950-е: мезоны, гипероны, — “слишком много”
- Классификация зоопарка элементарных частиц по *семействам*.
- Сколько частиц в семействах: 8, 10, 15, 15, 21, ...
- Картинки из учебника математики — представления $SU(3)$

1	3	6	10	15	21
	8	15	24	35	48
		27	42	60	81
			64	90	120
				125	165
					216

- Сколько точек на математических картинках:
- Семейство из трех частиц никогда не наблюдалось
 - у них должны быть дробные электрические заряды: $\pm\frac{1}{3}$, $\pm\frac{2}{3}$
 - — такие заряды никогда не наблюдались!
- **Соблазнительная математика: операция \otimes производит из семейства **3** все остальные семейства!!**

• Быть может, в природе все частицы всех семейств можно собрать из трех фундаментальных?!

Предсказание того, что меньше неделимого

Поиски “кирпичиков” материи

- (электрон), протон, нейтрон
- 1950-е: мезоны, гипероны, — “слишком много”
- Классификация зоопарка элементарных частиц по *семействам*.
- Сколько частиц в семействах: 8, 10, 15, 15, 21, ...
- Картинки из учебника математики — представления $SU(3)$

1	3	6	10	15	21
	8	15	24	35	48
		27	42	60	81
			64	90	120
				125	165
					216

- Сколько точек на математических картинках:
- Семейство из трех частиц никогда не наблюдалось
 - у них должны быть дробные электрические заряды: $\pm\frac{1}{3}$, $\pm\frac{2}{3}$
 - — такие заряды никогда не наблюдались!
- Соблазнительная математика: операция \otimes производит из семейства **3** все остальные семейства!
 - **Быть может, в природе все частицы всех семейств можно собрать из трех фундаментальных?!**

Предсказание того, что меньше неделимого

Все адроны (протон, нейтрон, мезоны, гипероны, ...) действительно состоят из кварков

- протон = uud : $\frac{2}{3} + \frac{2}{3} - \frac{1}{3} = 1$; нейтрон = udd : $\frac{1}{3} + \frac{1}{3} - \frac{2}{3} = 0$.
- Но кварки не летают по-одиночке
- Протон нельзя разобрать на части (теоретический вывод: \$1 000 000)
- Кварковый состав адронов, как и дробный заряд кварков, подтверждены множеством косвенных проявлений

Мораль: уже не уравнения, а симметрии!

Семейство кварков расширилось

Первые три: u, d, s

Следующий, c , предсказан тоже математически

Еще два: b, t

Предсказание того, что меньше неделимого

Все адроны (протон, нейтрон, мезоны, гипероны, ...) действительно состоят из кварков

- протон = uud : $\frac{2}{3} + \frac{2}{3} - \frac{1}{3} = 1$; нейтрон = udd : $\frac{1}{3} + \frac{1}{3} - \frac{2}{3} = 0$.
- Но кварки не летают по-одиночке
- Протон нельзя разобрать на части (теоретический вывод: \$1 000 000)
- Кварковый состав адронов, как и дробный заряд кварков, подтверждены множеством косвенных проявлений

Мораль: уже не уравнения, а симметрии!

Семейство кварков расширилось

Первые три: u, d, s

Следующий, c , предсказан тоже математически

Еще два: b, t

Предсказание того, что меньше неделимого

Все адроны (протон, нейтрон, мезоны, гипероны, ...) действительно состоят из кварков

- протон = uud : $\frac{2}{3} + \frac{2}{3} - \frac{1}{3} = 1$; нейтрон = udd : $\frac{1}{3} + \frac{1}{3} - \frac{2}{3} = 0$.
- Но кварки не летают по-одиночке
 - Протон нельзя разобрать на части (теоретический вывод: \$1 000 000)
 - Кварковый состав адронов, как и дробный заряд кварков, подтверждены множеством косвенных проявлений

Мораль: уже не уравнения, а симметрии!

Семейство кварков расширилось

Первые три: u, d, s

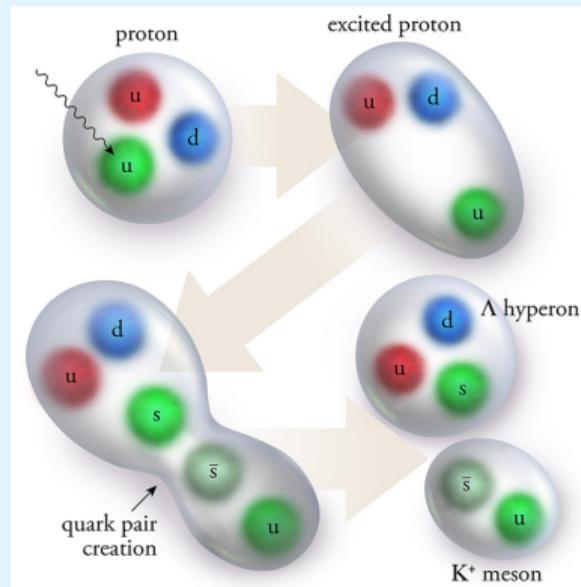
Следующий, c , предсказан тоже математически

Еще два: b, t

Предсказание того, что меньше неделимого

Все адроны (протон, нейтрон, мезоны, гипероны, ...) действительно состоят из кварков

- протон = uud : $\frac{2}{3} + \frac{2}{3} - \frac{1}{3} = 1$; нейтрон = udd : $\frac{1}{3} + \frac{1}{3} - \frac{2}{3} = 0$.
- Но кварки не летают по-одиночке
- Протон нельзя разобрать на части



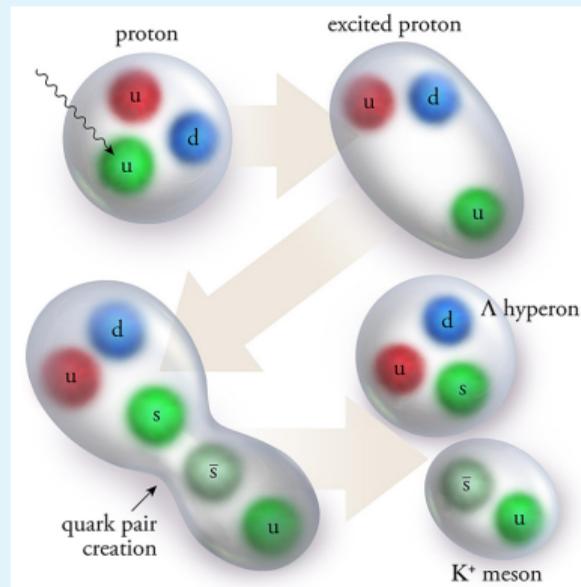
(теоретический вывод: \$1 000 000)

Кварковый состав адронов, как и дробный заряд кварков, подтверждены

Предсказание того, что меньше неделимого

Все адроны (протон, нейтрон, мезоны, гипероны, ...) действительно состоят из кварков

- протон = uud : $\frac{2}{3} + \frac{2}{3} - \frac{1}{3} = 1$; нейтрон = udd : $\frac{1}{3} + \frac{1}{3} - \frac{2}{3} = 0$.
- Но кварки не летают по-одиночке
- Протон нельзя разобрать на части



(теоретический вывод: \$1 000 000)

Предсказание того, что меньше неделимого

Все адроны (протон, нейтрон, мезоны, гипероны, ...) действительно состоят из кварков

- протон = uud : $\frac{2}{3} + \frac{2}{3} - \frac{1}{3} = 1$; нейтрон = udd : $\frac{1}{3} + \frac{1}{3} - \frac{2}{3} = 0$.
- Но кварки не летают по-одиночке
- Протон нельзя разобрать на части (теоретический вывод: \$1 000 000)
- Кварковый состав адронов, как и дробный заряд кварков, подтверждены множеством косвенных проявлений

Мораль: уже не уравнения, а симметрии!

Семейство кварков расширилось

Параметры u, d, s

Следующий, с предположительно математически

Будет c, b

Предсказание того, что меньше неделимого

Все адроны (протон, нейтрон, мезоны, гипероны, ...) действительно состоят из кварков

- протон = uud : $\frac{2}{3} + \frac{2}{3} - \frac{1}{3} = 1$; нейтрон = udd : $\frac{1}{3} + \frac{1}{3} - \frac{2}{3} = 0$.
- Но кварки не летают по-одиночке
- Протон нельзя разобрать на части (теоретический вывод: \$1 000 000)
- Кварковый состав адронов, как и дробный заряд кварков, подтверждены множеством косвенных проявлений

Мораль: уже не уравнения, а симметрии!

- “Поиск математики” в доступном \implies выводы о недоступном

Семейство кварков расширилось

Через три поколения

Следующий шаг предсказанное математически

Кварки и лептоны

Предсказание того, что меньше неделимого

Все адроны (протон, нейтрон, мезоны, гипероны, ...) действительно состоят из кварков

- протон = uud : $\frac{2}{3} + \frac{2}{3} - \frac{1}{3} = 1$; нейтрон = udd : $\frac{1}{3} + \frac{1}{3} - \frac{2}{3} = 0$.
- Но кварки не летают по-одиночке
- Протон нельзя разобрать на части (теоретический вывод: \$1 000 000)
- Кварковый состав адронов, как и дробный заряд кварков, подтверждены множеством косвенных проявлений

Мораль: уже не уравнения, а симметрии!

- “Поиск математики” в доступном \implies выводы о недоступном
— даже если оно принципиально недоступно

Семейство кварков расширилось

Протон и нейтрон

Семейство кварков расширилось

Предсказание того, что меньше неделимого

Все адроны (протон, нейтрон, мезоны, гипероны, ...) действительно состоят из кварков

- протон = uud : $\frac{2}{3} + \frac{2}{3} - \frac{1}{3} = 1$; нейтрон = udd : $\frac{1}{3} + \frac{1}{3} - \frac{2}{3} = 0$.
- Но кварки не летают по-одиночке
- Протон нельзя разобрать на части (теоретический вывод: \$1 000 000)
- Кварковый состав адронов, как и дробный заряд кварков, подтверждены множеством косвенных проявлений

Мораль: уже не уравнения, а симметрии!

- “Поиск математики” в доступном \implies выводы о недоступном

Семейство кварков расширилось

- Первые три: u, d, s
- Следующий, c , предсказан тоже математически
- Еще два: b, t .

Предсказание того, что меньше неделимого

Все адроны (протон, нейтрон, мезоны, гипероны, ...) действительно состоят из кварков

- протон = uud : $\frac{2}{3} + \frac{2}{3} - \frac{1}{3} = 1$; нейтрон = udd : $\frac{1}{3} + \frac{1}{3} - \frac{2}{3} = 0$.
- Но кварки не летают по-одиночке
- Протон нельзя разобрать на части (теоретический вывод: \$1 000 000)
- Кварковый состав адронов, как и дробный заряд кварков, подтверждены множеством косвенных проявлений

Мораль: уже не уравнения, а симметрии!

- “Поиск математики” в доступном \implies выводы о недоступном

Семейство кварков расширилось

- Первые три: u, d, s
- Следующий, c , предсказан тоже математически
 - На ускорителях стали открывать частицы, в которых он участвует
- Еще два: b, t .

Предсказание того, что меньше неделимого

Все адроны (протон, нейтрон, мезоны, гипероны, ...) действительно состоят из кварков

- протон = uud : $\frac{2}{3} + \frac{2}{3} - \frac{1}{3} = 1$; нейтрон = udd : $\frac{1}{3} + \frac{1}{3} - \frac{2}{3} = 0$.
- Но кварки не летают по-одиночке
- Протон нельзя разобрать на части (теоретический вывод: \$1 000 000)
- Кварковый состав адронов, как и дробный заряд кварков, подтверждены множеством косвенных проявлений

Мораль: уже не уравнения, а симметрии!

- “Поиск математики” в доступном \implies выводы о недоступном

Семейство кварков расширилось

- Первые три: u, d, s
- Следующий, c , предсказан тоже математически
 - На ускорителях стали открывать частицы, в которых он участвует
- Еще два: b, t .

Предсказание того, что меньше неделимого

Все адроны (протон, нейтрон, мезоны, гипероны, ...) действительно состоят из кварков

- протон = uud : $\frac{2}{3} + \frac{2}{3} - \frac{1}{3} = 1$; нейтрон = udd : $\frac{1}{3} + \frac{1}{3} - \frac{2}{3} = 0$.
- Но кварки не летают по-одиночке
- Протон нельзя разобрать на части (теоретический вывод: \$1 000 000)
- Кварковый состав адронов, как и дробный заряд кварков, подтверждены множеством косвенных проявлений

Мораль: уже не уравнения, а симметрии!

- “Поиск математики” в доступном \implies выводы о недоступном

Семейство кварков расширилось

- Первые три: u, d, s
- Следующий, c , предсказан тоже математически
 - На ускорителях стали открывать частицы, в которых он участвует
- Еще два: b, t .

По необъяснимым причинам
структура мира скрывает в себе математику

По необъяснимым причинам
структура мира скрывает в себе математику

Если мир в чем-то един, то в своей математичности

По необъяснимым причинам
структура мира скрывает в себе математику

Если мир в чем-то един, то в своей математичности

Но одной только математики для познания недостаточно:
все более **точные наблюдения** по-прежнему необходимы

СПАСИБО!

Всё, что движется

Прогулки по беспокойной Вселенной

АЛЕКСЕЙ СЕМИХАТОВ — доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник отделения теоретической физики Физического института им. П. Н. Лебедева РАН, ведущий передачи «Вопрос науку» на телеканале «Наука», лектор и автор научно-популярных фильмов.

Название книги выглядит шероховатым: более естественным кажется «Обо всем, что движется». Однако выбранное название точно отражает суть книги — Семихатов не сторонний наблюдатель, а проводник читателя по круговороту Вселенной. Я не встречал книг, похожих на эту. В ней представлена картина мира, в которой, как и считал, обходиться без формул невозможно, однако автору удалось объяснить фундаментальные уравнения словами так, что некоторые валаания повернулись назад для меня гранью.

Сергей Нечаев, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Национального центра научных исследований (CNRS), Франция

Квантовый мир — это самая большая загадка природы после загадки жизни. Тут нет ничего надежного, тут не работает наше обычное сознание и интуиция. Как рассказать о нем так, чтобы дух захватывало, чтобы воображение зашаливало? Перед вами, читатель, такая книга — книга о вечно движущейся Вселенной, в том числе квантовой, по которой вас пригласоаш на увлекательную прогулку.

Дмитрий Казаков, доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН, директор лаборатории теоретической физики им. Н. Н. Боголюбова Объединенного института ядерных исследований

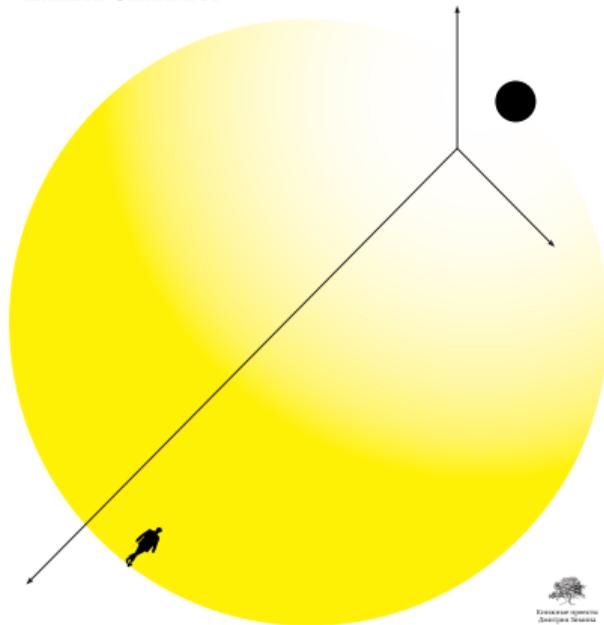
Прогулки по Вселенной — дело опасное, без проводника не обойтись. Многое останется непонятным, если рядом нет знающего человека. К счастью, в этой книге у вас есть надежный и симпатичный попутчик, опытный проводник по беспокойной Вселенной — Алексей Семихатов.

Владимир Сурдин, кандидат физико-математических наук, астроном, лауреат премии «Просветитель»

АЛЕКСЕЙ СЕМИХАТОВ
ВСЁ, ЧТО ДВИЖЕТСЯ

ВСЁ, ЧТО ДВИЖЕТСЯ ПРОГУЛКИ ПО БЕСПОКОЙНОЙ ВСЕЛЕННОЙ

АЛЕКСЕЙ СЕМИХАТОВ

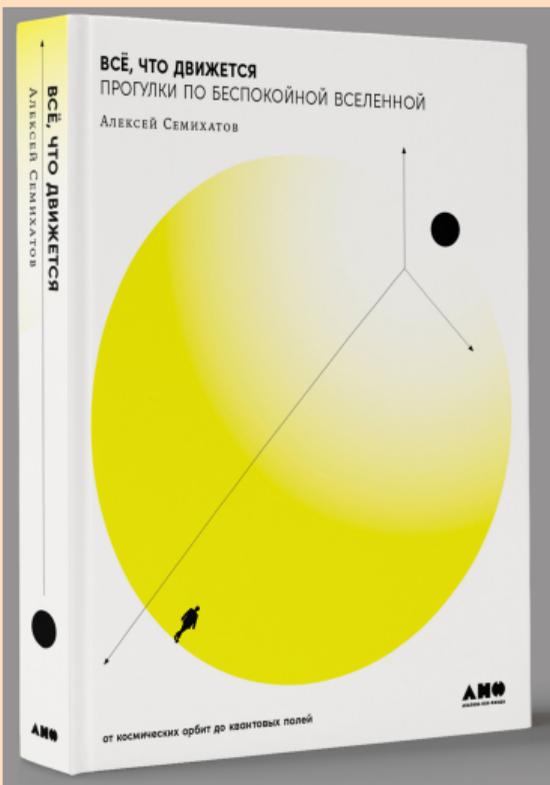


от космических орбит до квантовых полей



Думай по-своему





ВСЁ, ЧТО ДВИЖЕТСЯ

ПРОГУЛКИ ПО БЕСПОКОЙНОЙ ВСЕЛЕННОЙ от космических орбит до квантовых полей

АЛЕКСЕЙ СЕМИХАТОВ

Научные редакторы:

ВЛАДИМИР СУРДИН, СЕРГЕЙ НЕЧАЕВ

Редактор:

ПЕТР ФАВОРОВ

Альпина НонФикшн