

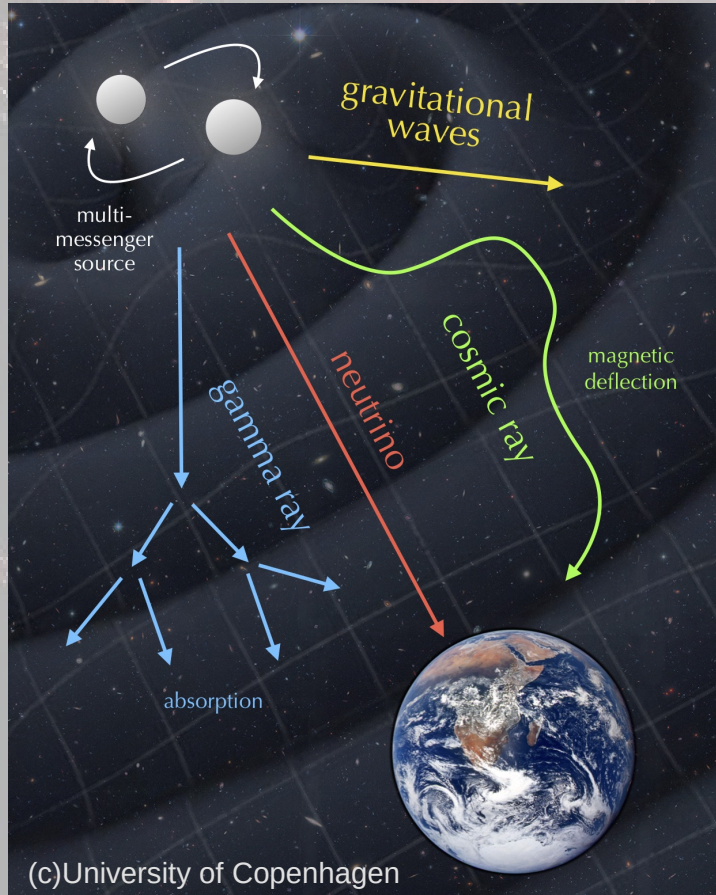


Многоканальная астрономия

Г.И. Рубцов (ИЯИ РАН)

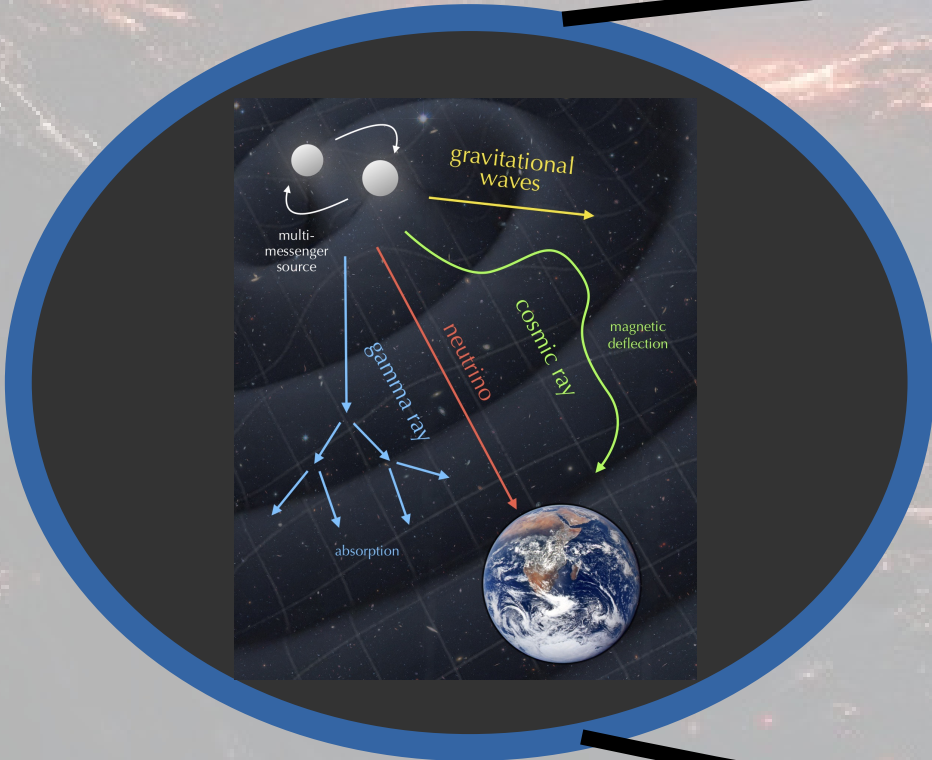
XXIII Байкальская летняя школа
по физике частиц и астрофизике
16-17 июля 2023, Большие Коты

Многоканальная астрономия



Многоканальная астрономия (multi-messenger astronomy) - исследование процессов в космосе с помощью совместного анализа электромагнитного излучения, гравитационных волн, нейтрино и космических лучей высоких энергий.

Познание Вселенной в богатстве и многообразии ее сигналов



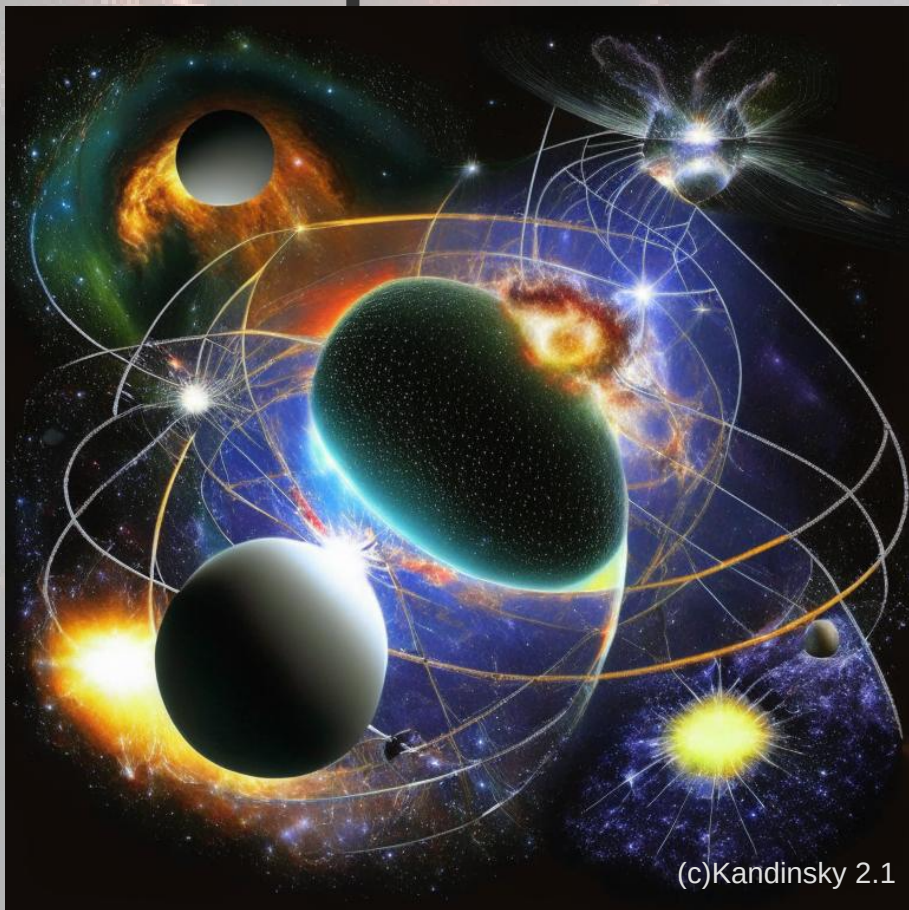
Многоканальная астрономия



- аксионы
- Лоренц-нарушение
- WIMP
- темная энергия
- стерильные нейтрино
- космические струны
- ...

Связующее звено между наблюдениями и физическим знанием

Почему многоканальная астрономия интересна?



- Что нам дает множество каналов?
- Почему недостаточно одного хорошего канала?
- Могут ли нарушаться физические законы?
- Существует ли новая физика?

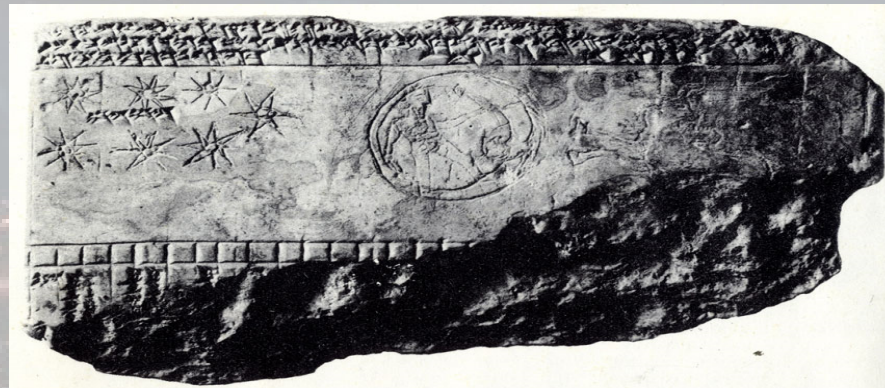
Истоки астрономии

И сказал: посмотри на небо и сосчитай звезды, если ты можешь счесть их.

Бытие 15:5



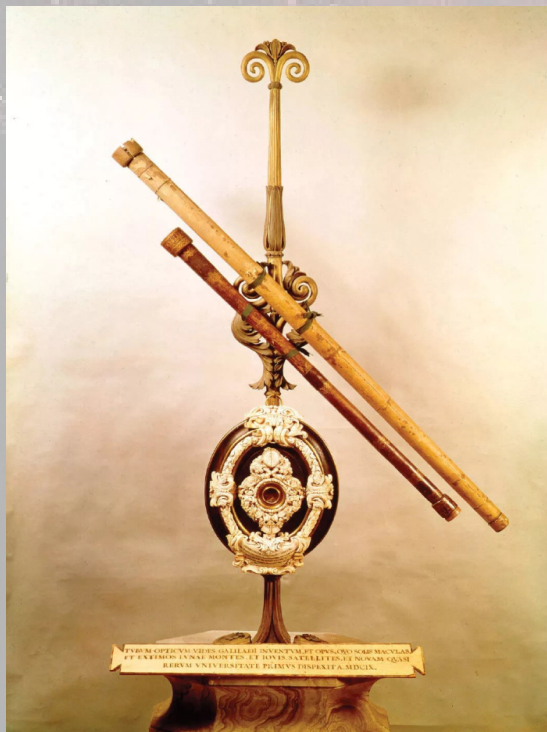
Европа 1600BC



Древний Вавилон

- Первая классификация: деление на светила и звезды

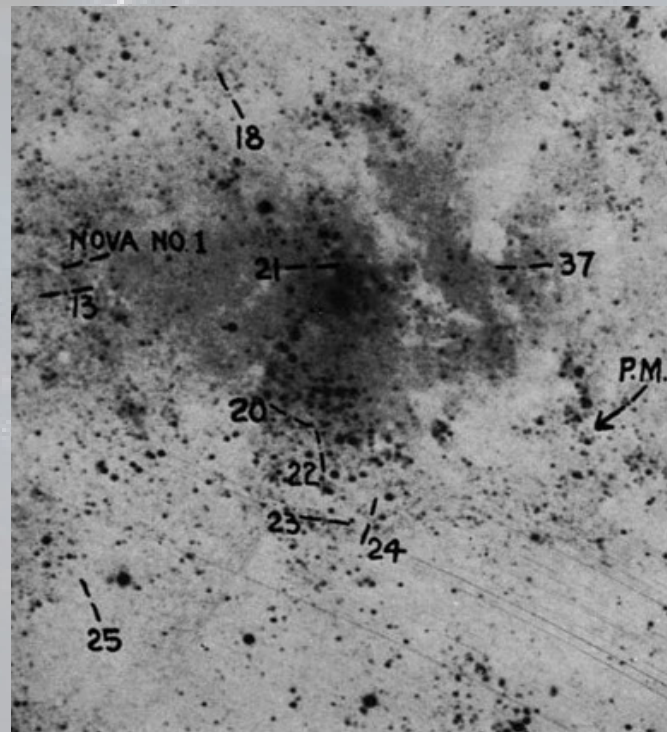
Открытия связаны с развитием инструментов и математики



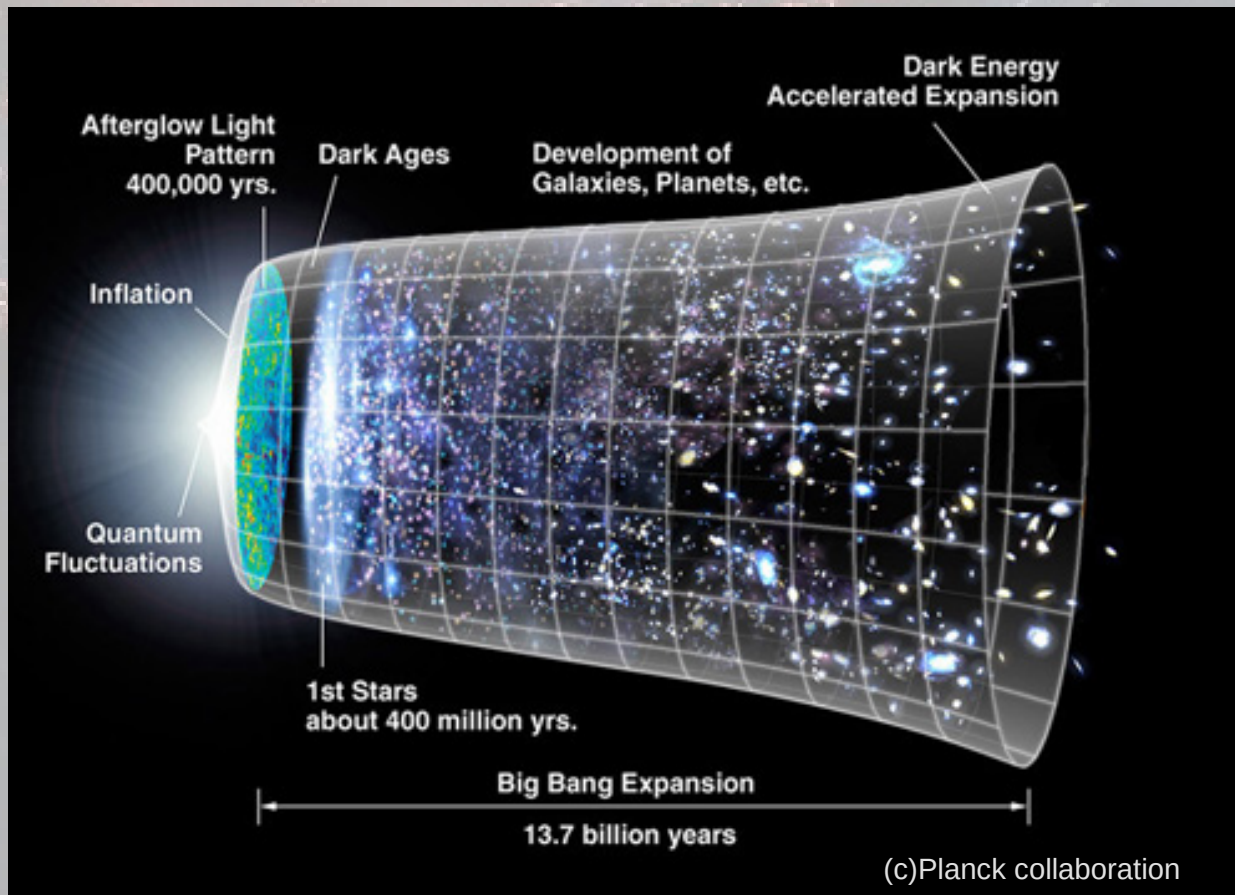
Телескоп Галилея, 1609



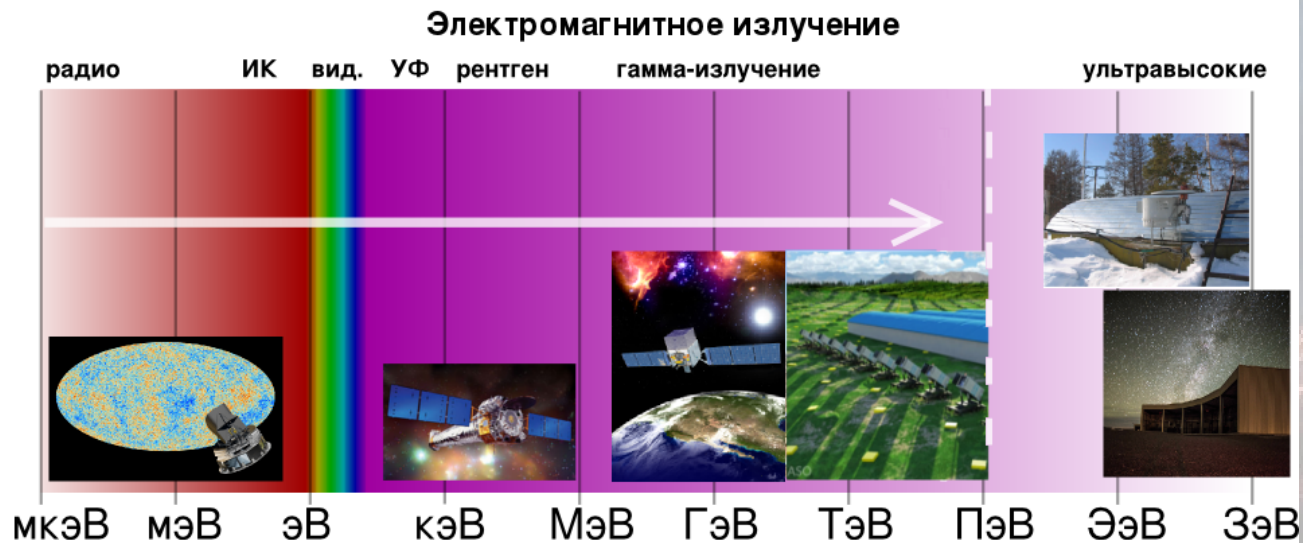
Эдвин Хаббл и снимок М33 на 2.5м телескопе, 1923-1929
Спиральные туманности – отдельные галактики



Современное представление об эволюции Вселенной

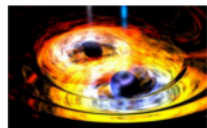


Наблюдаемые каналы

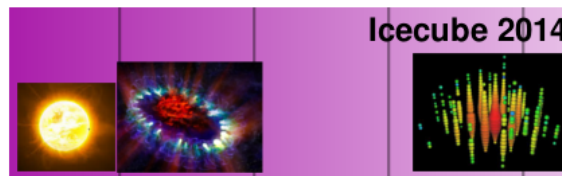


**38 порядков
по частоте**

2023, нГц



Нейтрино



2016, LIGO, гравитационные волны 35-250 Hz

Примеры многоканальных наблюдений



- Нейтрино от Солнца, SN 1987A
- Нейтрино от блазара TXS 0506+056

лекции Д. Заборова

- Наблюдение гравитационных волн от гамма-всплеска GRB 170817A / GW170817

LIGO Collaboration, Phys.Rev.Lett. 119 (2017)

- Корреляции нейтринных событий IceCube с радиоблазарами

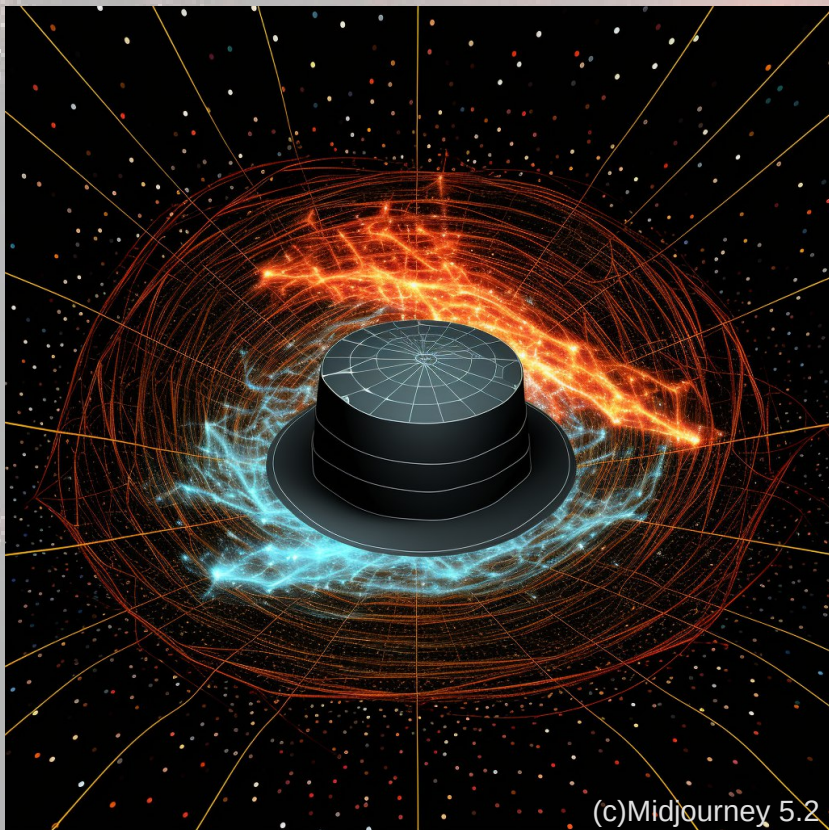
Plavin et al, Astrophys. J. 908 (2021)

доклад П. Кивокурцевой 15 июля



(c)Midjourney 5.2

Магистр в многоканальной астрономии

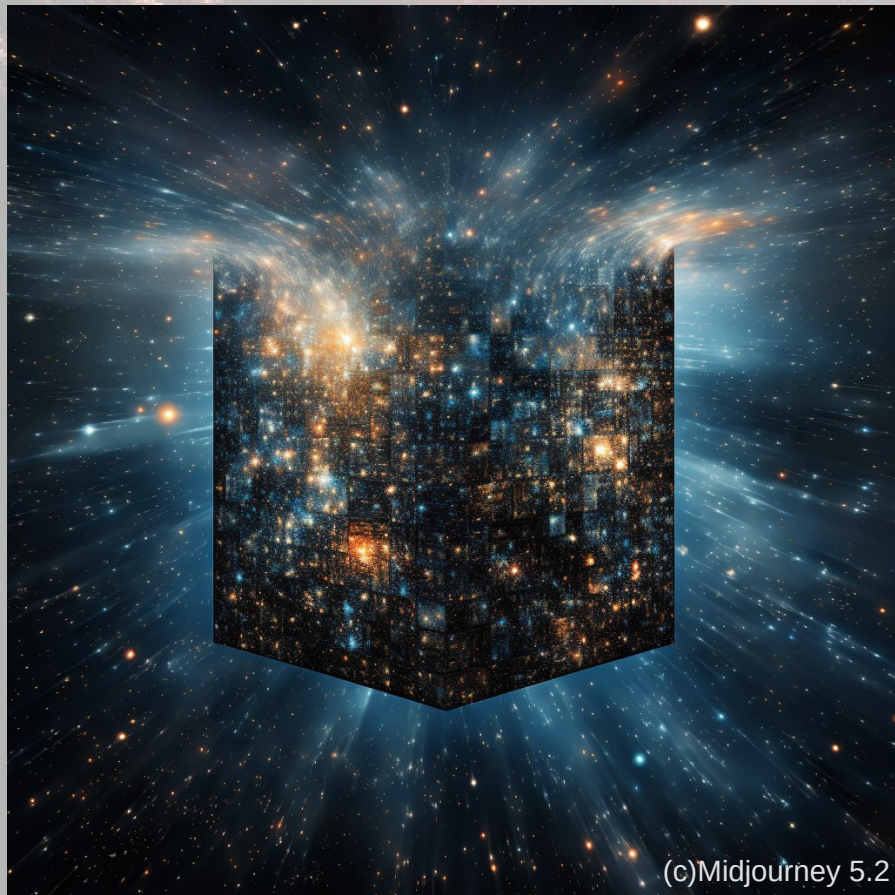




Унести с собой (Введение)

- Многоканальная астрономия
 - это интересно
 - востребованная специальность
 - объединяет физику частиц, астрофизику и обработку данных

BigData: анализ больших данных



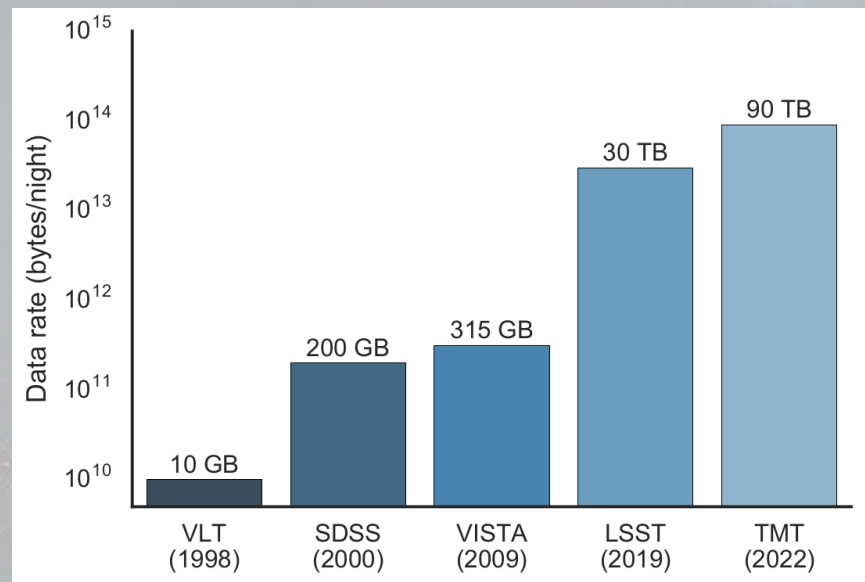
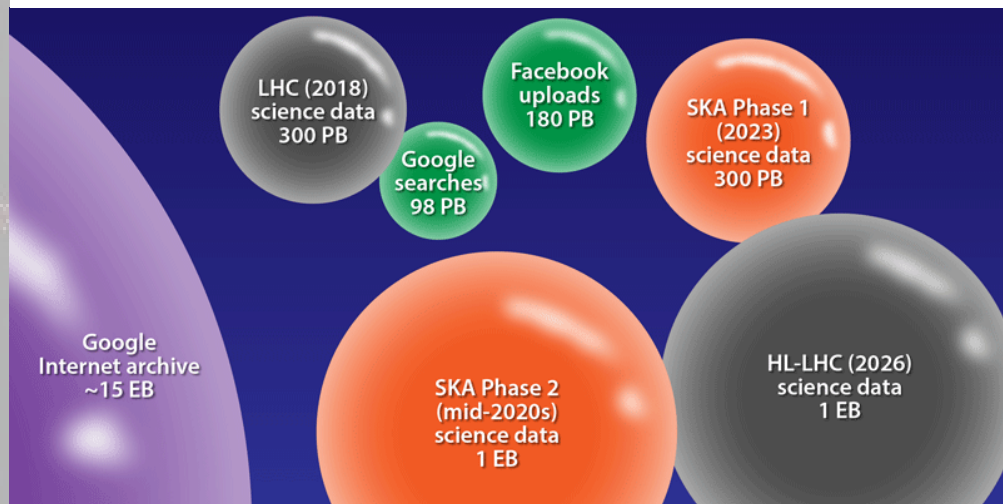
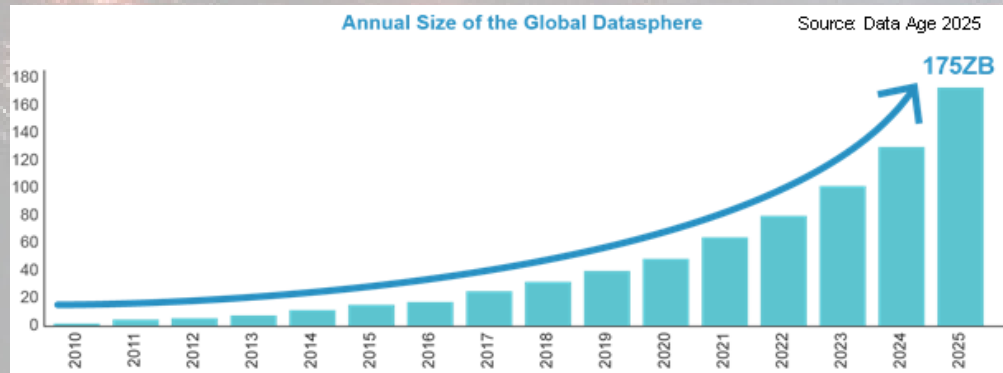
(c)Midjourney 5.2

- Концепция BigData появилась на фоне технологического роста 1990-х

John Mashey @ Silicon Graphics; IBM

- Популярность термина, журнал Nature 2008, спец. выпуск «Big Data»
- «Big is a moving target», трактуется диалектически, как переход количества в качество
- Отказ от алгоритмов, основанных на знании, в пользу алгоритмов, основанных на данных
- Терминологически корректным было

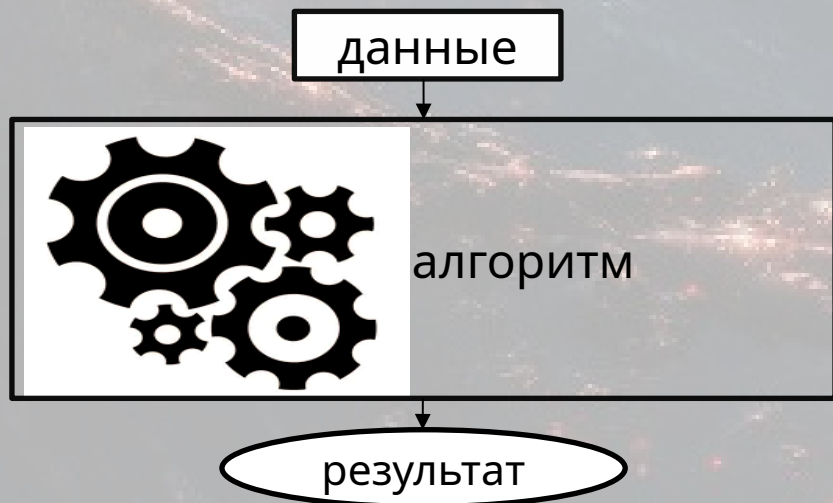
Рост объема научных данных



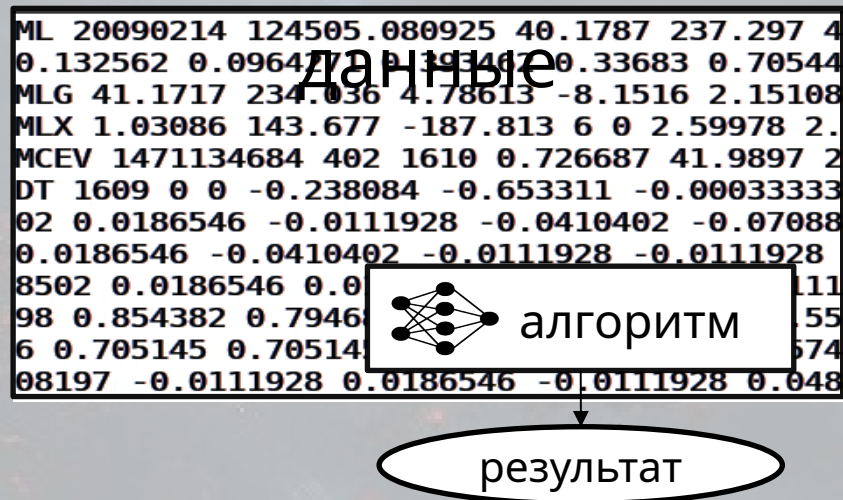
Kremer et al. arXiv:1740.04650

Парадигма больших данных

- Машинное обучение – отказ от алгоритмов, основанных на знании в пользу алгоритмов, основанных на данных.
- С ростом объема данных растет эффективность.



Классические алгоритмы

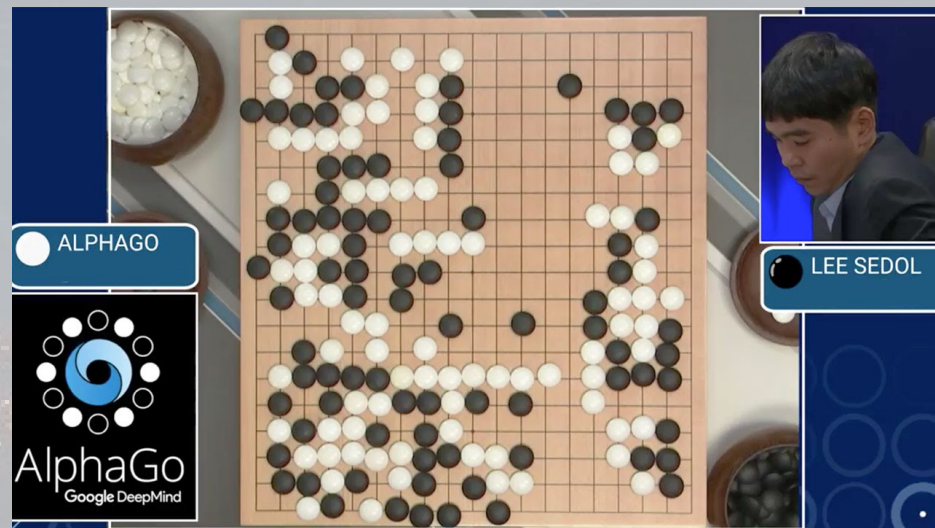


Методы машинного обучения

Го: пример применения парадигмы BigData

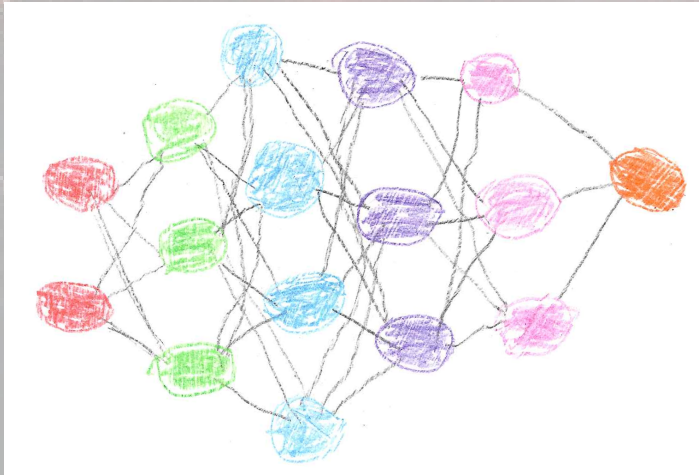
- Отказ от знаний в пользу данных на примере игры Го

Many Faces of Go, Go++, др. до 2008	Правила и рекомендации «как играть», основанные на базе данных партий мастеров Го
Zen, MoGo, др. 2008-2015	Оценка позиции; Монте-Карло моделирование деревьев ходов
AlphaGo 2016	Оценка позиции; обучение на партиях мастеров, а затем на играх между машинами
AlphaZero 2017	Только правила и обучение на игре между машинами; уровень мирового чемпиона за сутки!



Компьютер стал чемпионом мира в игре Го (2016)

Метод: нейронные сети



$$a_j^l = \sigma(z_j^l), \quad z_j^l = \sum_k w_{jk}^l a_k^{l-1} + b_j^l$$

$$C(w, b) = \frac{1}{2n} \sum_x (y(x) - a^L)^2$$

- Нейронная сеть – функция специального вида со свободными параметрами w_{jk}^l
- Обучение нейронной сети – подбор весов w_{jk}^l для минимизации функции цены C
 - обучение с учителем и без учителя

Задачи машинного обучения

- Регрессия
 - предсказание значения зависимой величины на основе независимых
 - Пример: arXiv:1902.02680, предсказание масс галактик по данным SDSS
- Классификация
 - дан набор объектов, принадлежащих к разным классам; задача: определить класс каждого объекта
 - Пример: классификация гамма-источников Fermi LAT
- Автокодировка данных
 - Отображение набора M параметров в набор K параметров ($K < M$) и обратное отображение, результат которого близок к исходному
 - $\{x_i\} \rightarrow \{y_\alpha\} \rightarrow \{\tilde{x}_i\}, \{\tilde{x}_i\} \approx \{x_i\}, i = 1..M, \alpha = 1..K$

Работа со случайными величинами



- Вопрос к залу:
 - Что такое случайная величина?
- Ответ:
 - Функция, заданная на вероятностном пространстве.
- Вероятностное пространство – пространство элементарных исходов.
- **Важно:** перед любым анализом случайных величин нужно установить что собой представляет вероятностное пространство.

Случайные величины

- x – случайная величина, $p(x)$ – плотность распределения вероятности случайной величины
- Равномерное распределение

$$x \in U[a, b] \Leftrightarrow p(x) = \begin{cases} \frac{1}{(b-a)}, & a \leq x \leq b \\ 0, & \text{else} \end{cases}$$

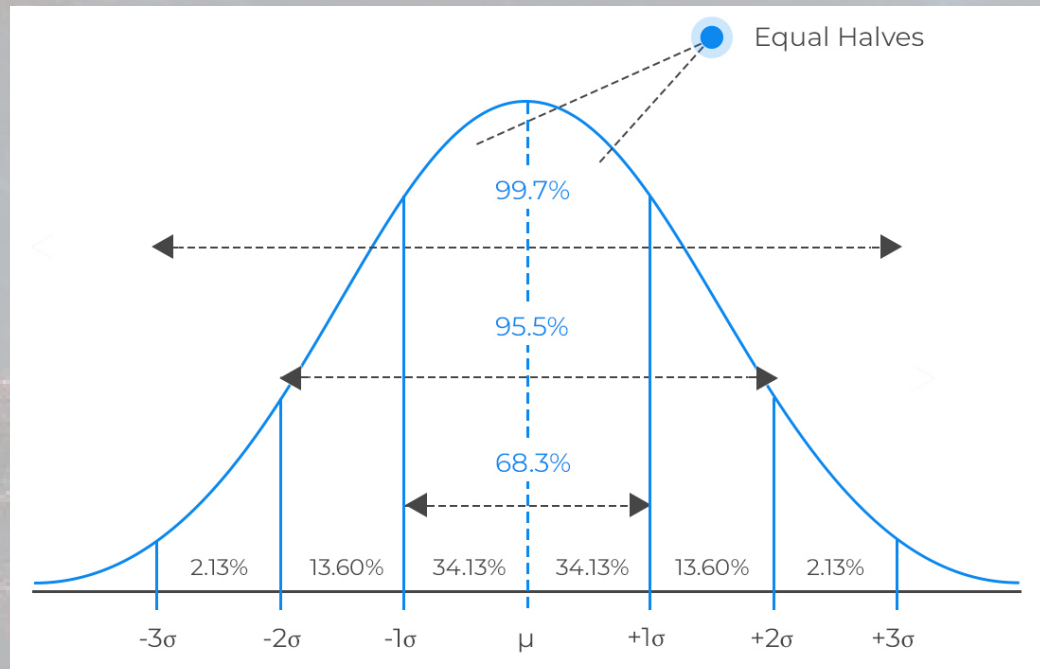
- Гауссово распределение

$$x \in G(\bar{x}, \sigma) \Leftrightarrow p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma^2}}$$

Проверка гипотез и гауссово распределение

- Открытие – исключение нулевой гипотезы
- Достоверность исключения изменяется в числе сигм

N	p
1σ	32%
2σ	5%
3σ	0.27%
4σ	1 из 16 тыс.
5σ	1 из 2 млн.
6σ	1 из 500 млн.





Гауссово распределение: вопрос залу

- Пусть X — гауссова случайная величина со средним 1 и среднеквадратичным отклонением 0.2 $x \in G(1, 0.2)$
- Мы знаем, что $\langle X \rangle = 1$
 - Чему равно $\langle 1/X \rangle$?
 - (а) $\langle 1/X \rangle < 1$;
 - (б) $\langle 1/X \rangle = 1$;
 - (в) $\langle 1/X \rangle > 1$;

Гауссово распределение: вопрос залу

- Пусть X — гауссова случайная величина со средним 1 и среднеквадратичным отклонением 0.2
 $x \in G(1, 0.2)$
- Мы знаем, что $\langle X \rangle = 1$
 - Чему равно $\langle 1/X \rangle$?
 - (а) $\langle 1/X \rangle < 1$;
 - (б) $\langle 1/X \rangle = 1$;
 - (в) $\langle 1/X \rangle > 1$;
- Ответ: численно $\langle 1/X \rangle \sim 1.05$
- деление на ноль в анализе должно насторожить; точность очень низкая
 $\sigma_{1/X} \sim 1$

Вопрос про монету

- Монета 10 руб. выпала 22 раза подряд на орла (бобра)



- Какова вероятность, что монета в 23-й раз выпадет на бобра?
 - (а) $\frac{1}{2}$ (б) больше $\frac{1}{2}$

Вопрос про монету

- Монета 10 руб. выпала 22 раза подряд на орла (бобра)



- Какова вероятность, что монета в 23-й раз выпадет на бобра?
 - (а) $\frac{1}{2}$ (б) больше $\frac{1}{2}$
- Математический ответ: $\frac{1}{2}$
- Физический ответ: открытие на уровне 5σ ($2^{21} \sim 2$ млн), что гипотеза $p = \frac{1}{2}$ исключена.



Вопрос про монету 2

- Математический ответ: $\frac{1}{2}$
- Физический ответ: открытие на уровне 5σ ($2^{21} \sim 2$ млн), что гипотеза $p = \frac{1}{2}$ исключена.
- В чем разница в этих ответах?



Вопрос про монету 2

- Математический ответ: $\frac{1}{2}$
- Физический ответ: открытие на уровне 5σ ($2^{21} \sim 2$ млн), что гипотеза $p = \frac{1}{2}$ исключена.
- В чем разница в этих ответах?
- Ответ: различное вероятностное пространство
 - в первом случае случайным событием является исход подбрасывания монеты
 - во втором случае случайным событием является свойство самой монеты
- Исследуя Вселенную мы предполагаем ее свойства случайными (иногда называют баесовским подходом в по

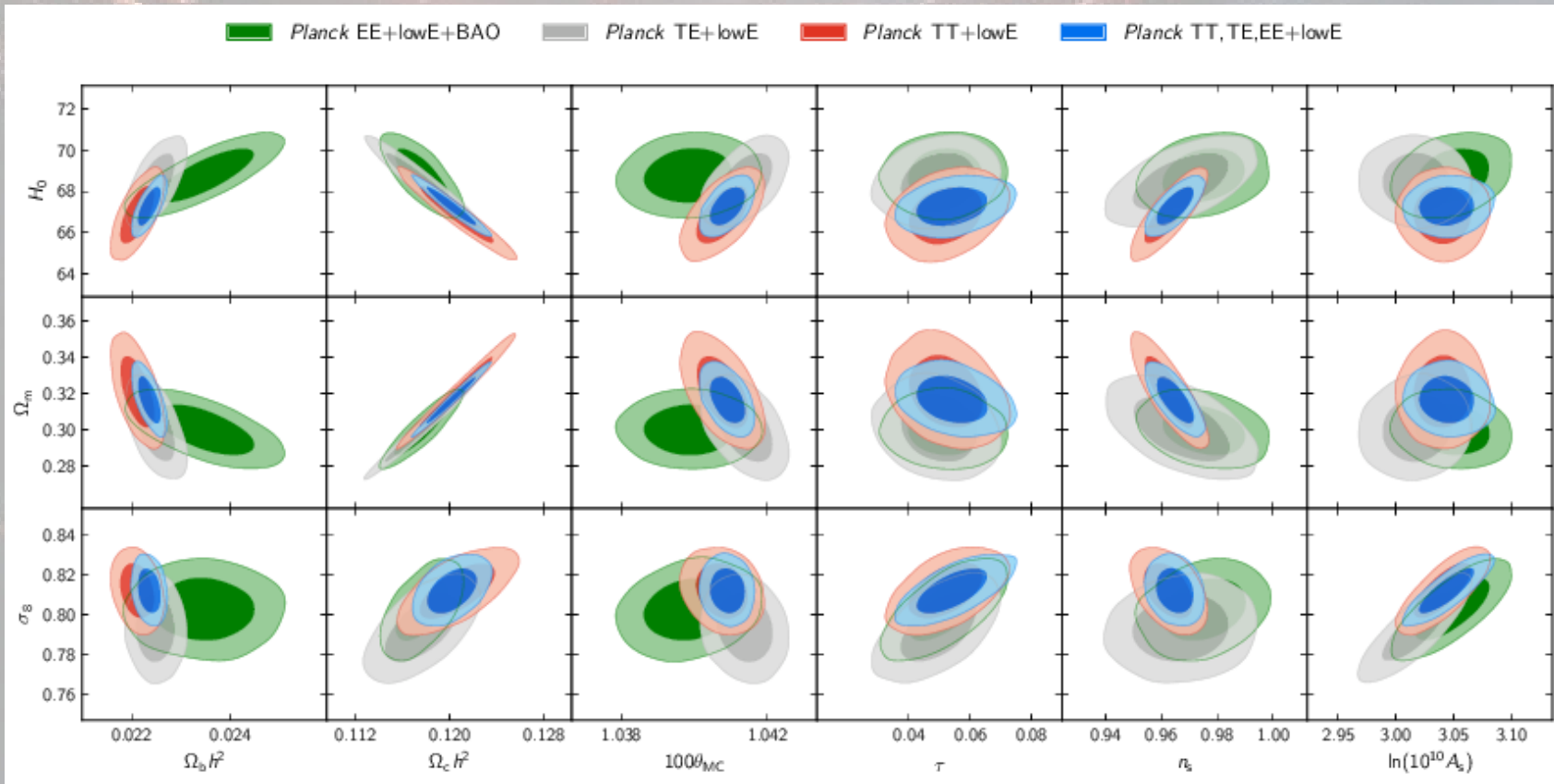


He deals the cards as a meditation
And those he plays never suspect
He doesn't play for the money he wins
He don't play for respect

He deals the cards to find the answer
The sacred geometry of chance
The hidden law of a probable outcome
The numbers lead a dance

Sting, Shape of My Heart

Пример: космологические параметры по данным Planck





Унести с собой (большие данные)

- BigData – Переход от алгоритмов, основанных на знании, в пользу алгоритмов, основанных на данных
- Открытие — исключение нулевой гипотезы на уровне 5σ
- В разговоре о вероятности требуйте определить пространство элементарных исходов

Унести с собой (задачи)

- 1) Пусть $\{x_i\}$, $i = 1..N$ — случайные величины из равномерного распределения $U[0,1]$. Найти плотность распределения вероятности максимума из этих чисел $\max\{x_i\}$.
- 2) Каталог гамма-источников содержит 1000 источников. В нейтринном эксперименте зарегистрировано 25 нейтрино с угловым разрешением 2 градуса. Оказалось, что 3 нейтринных события находятся в пределах углового разрешения от одного и того же гамма-источника. Можно ли это считать открытием?

Электромагнитное излучение

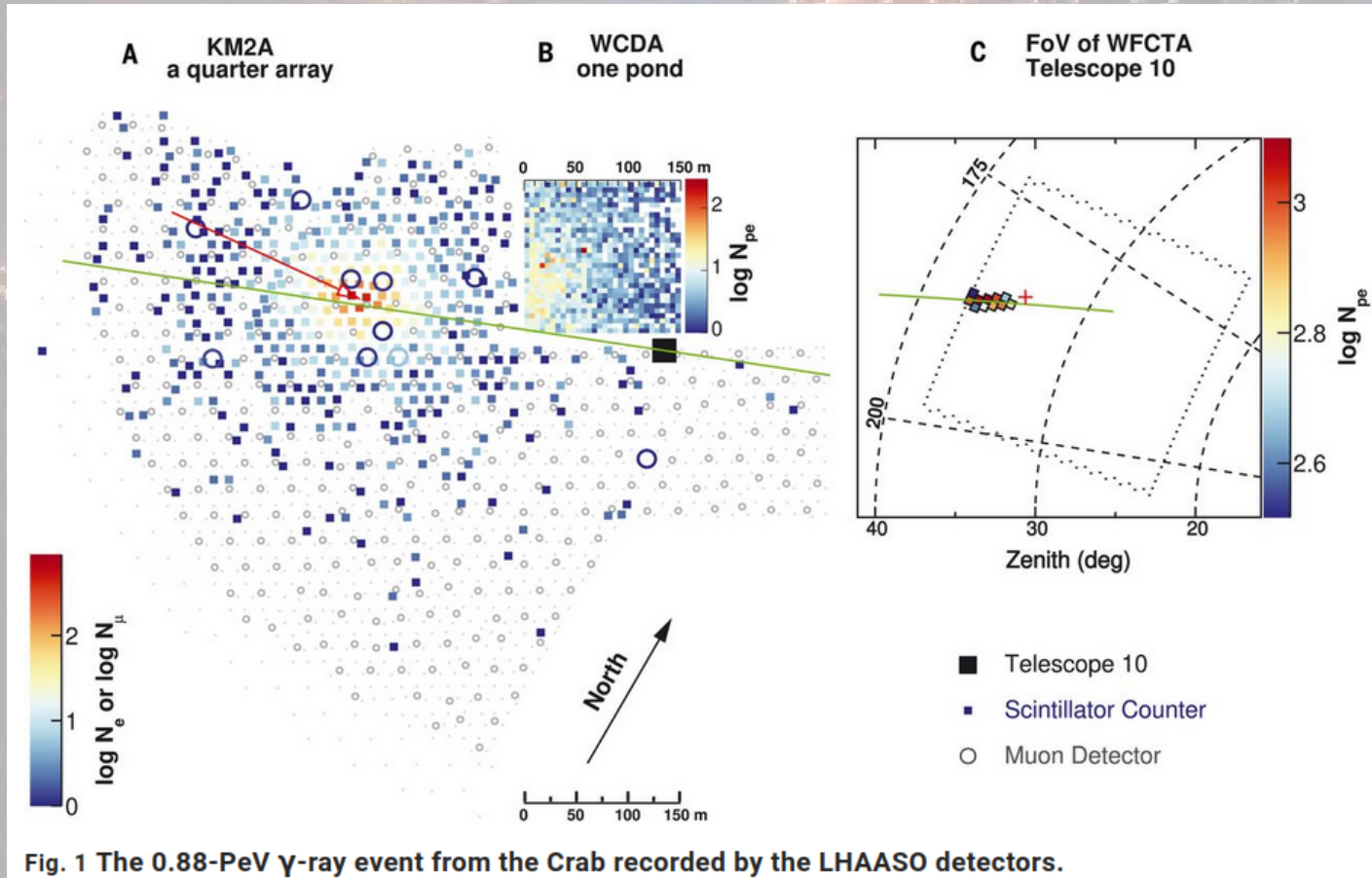
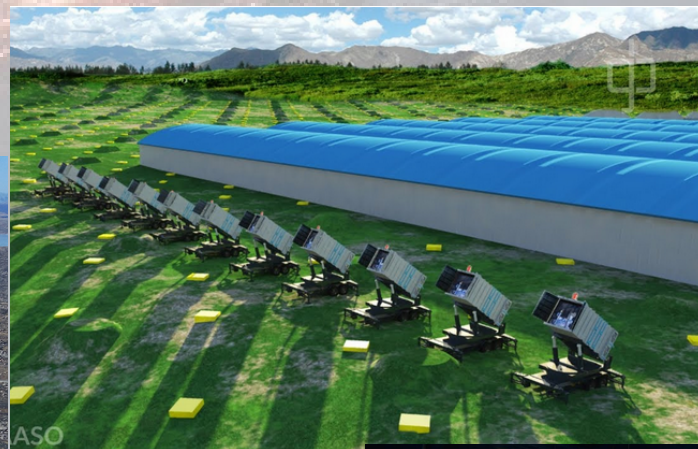
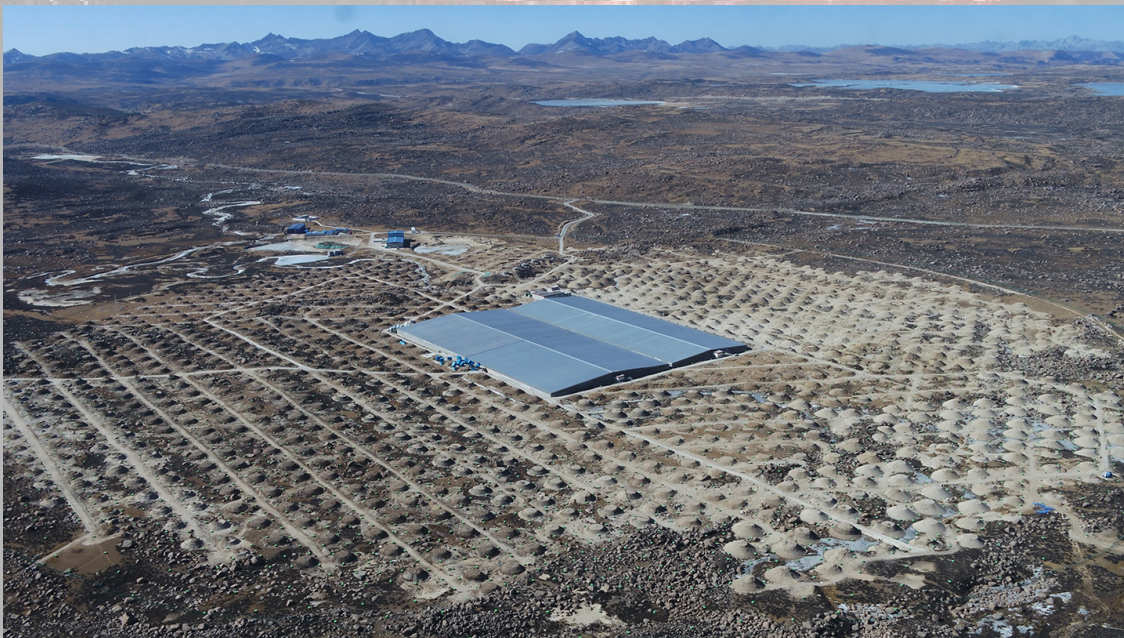
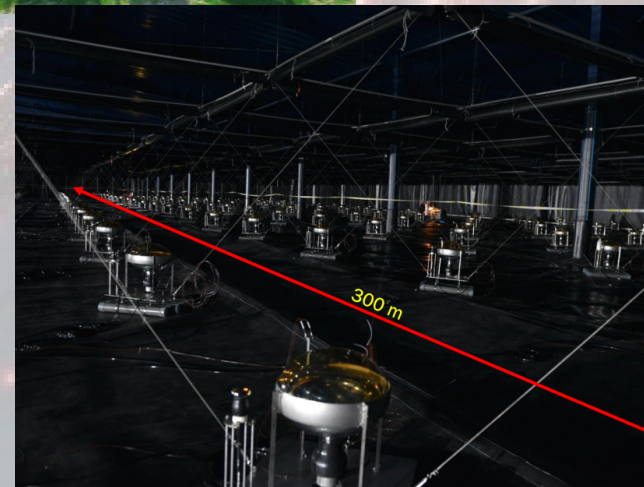


Fig. 1 The 0.88-PeV γ -ray event from the Crab recorded by the LHAASO detectors.

LHAASO Observatory

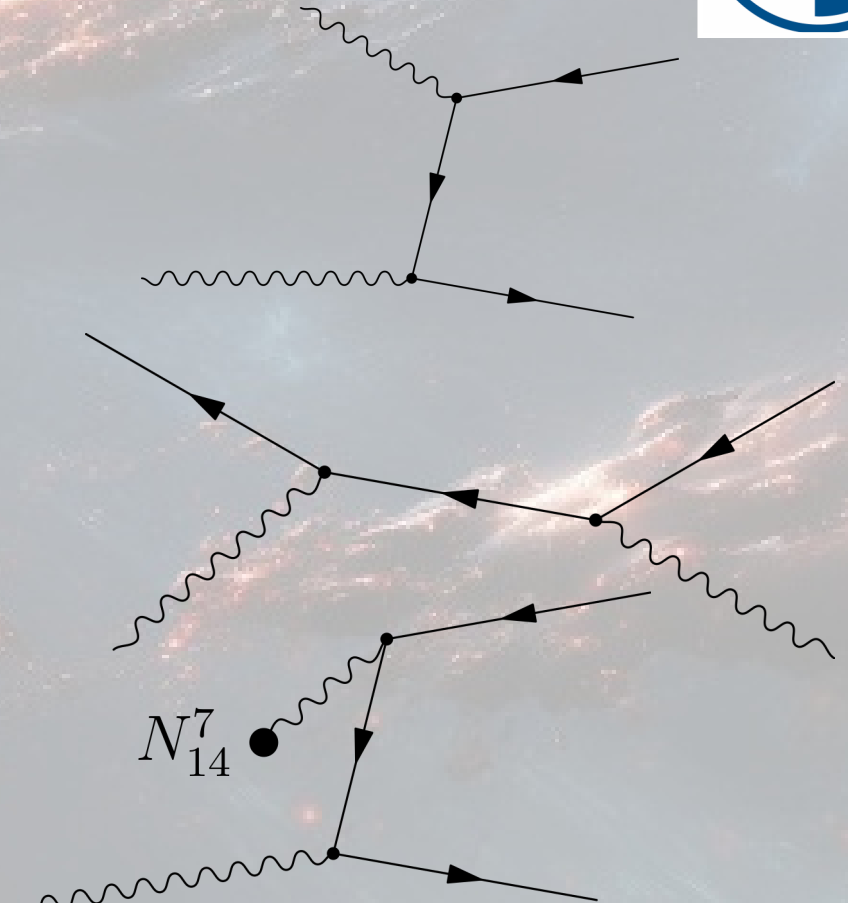


Daocheng, China, 4400 m. a.s.l.



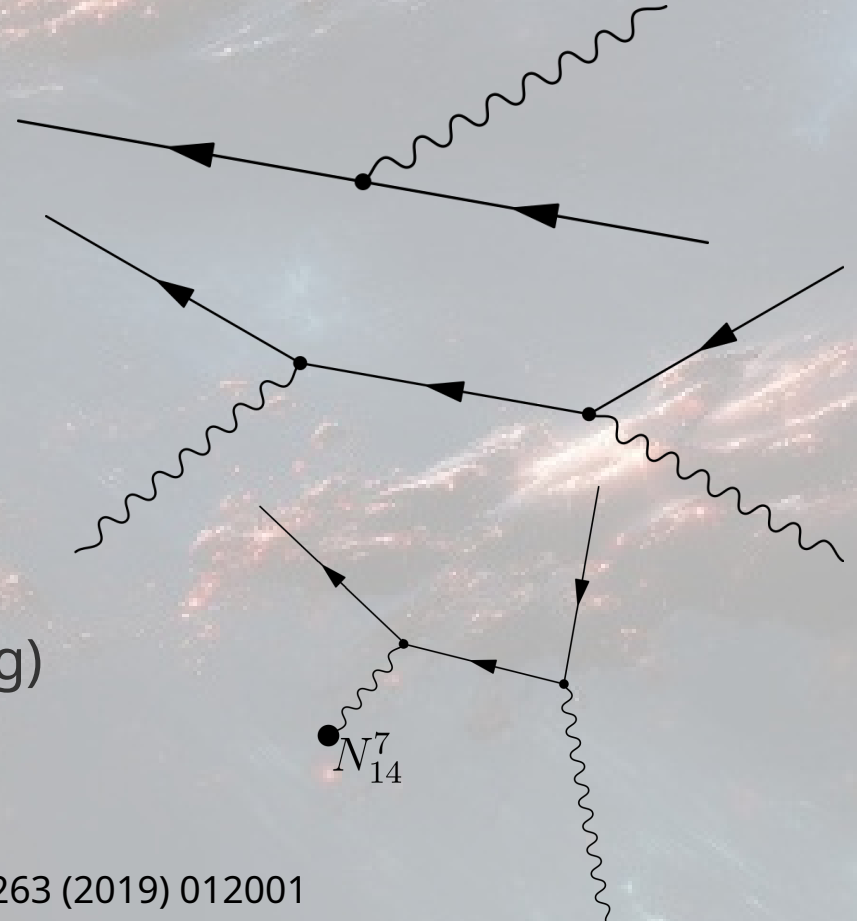
Основные реакции γ -кванта в КЭД

- Рождение пар
- Комптоновское рассеяние
- Процесс Бете-Гайтлера



Основные реакции электрона в КЭД

- Синхротронное излучение
- Черенковское излучение
- Обратное комптоновское рассеяние
- Тормозное излучение (bremsstrahlung)



TeV-излучение от гамма-всплеска GRB 221009A



Subject: LHAASO observed GRB 221009A with more than 5000 VHE photons up to around 18 TeV

Date: 2022-10-11 09:21:54

From: Judith Racusin at GSFC <judith.racusin@nasa.gov>

GRB 221009A is detected by LHAASO-WCDA at energy above 500 GeV, within 2000 seconds after Fermi-GBM trigger, with the significance above 100 s.d., and is observed as well by **LHAASO-KM2A** with the significance about 10 s.d. where the energy of the highest photon reaches **18 TeV**. This represents the first detection of photons above 10 TeV from GRBs.

GCN Circular 32677

Subject: GRB 221009A: detection of a 250-TeV photon-like air shower by Carpet-2

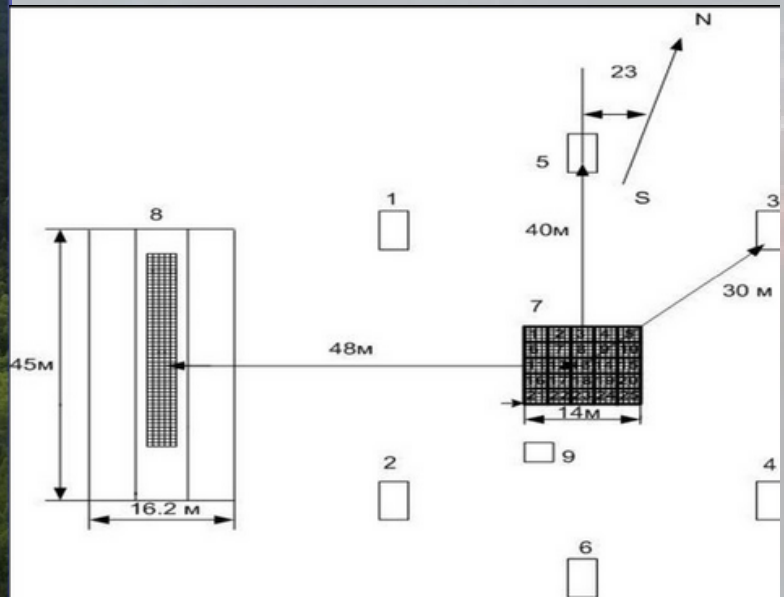
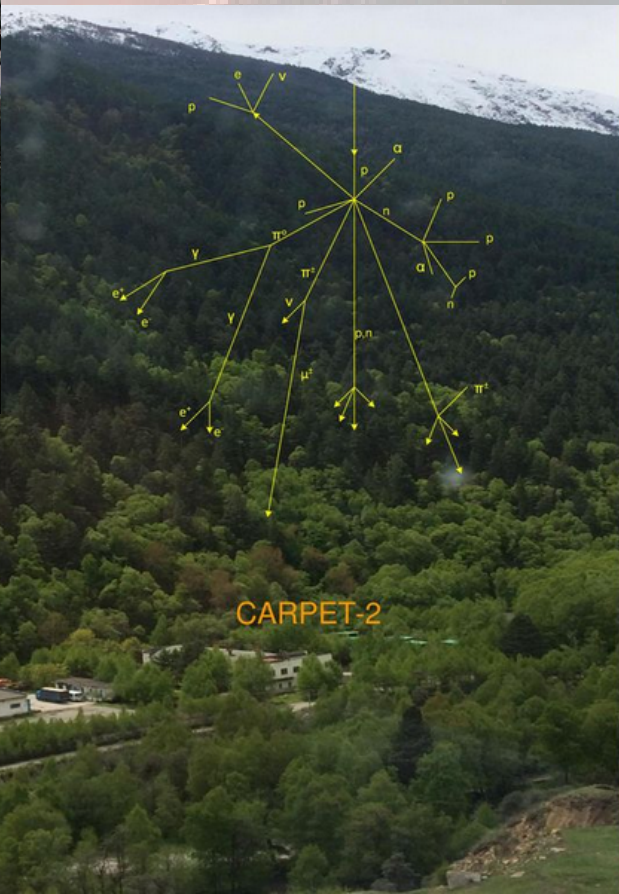
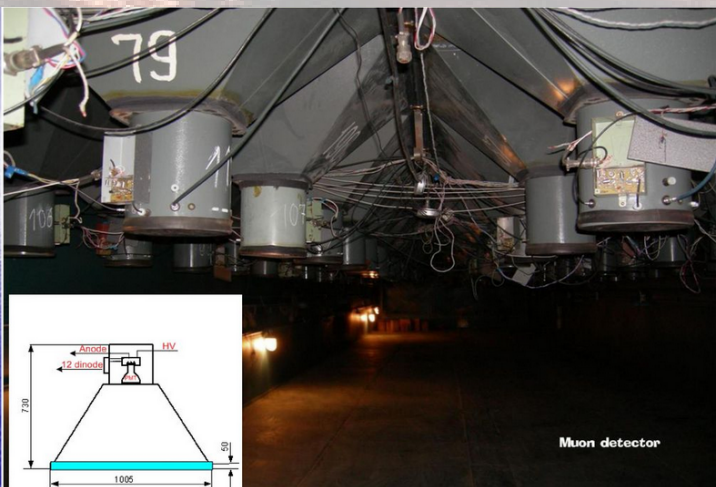
Date: 2022-10-12 13:56

From: D.D. Dzhappuev et al. (INR RAS)

In a follow-up analysis of **Carpet-2** (Baksan neutrino observatory INR RAS) data, we found an air shower consistent with being caused by a photon of **251 TeV** energy, giving zero hits in the 175 m² muon detector. This event was detected at 14:32:35 UT, that is 1338 sec after the SWIFT trigger and 4536 sec after the GBM trigger. The reconstructed arrival direction is RA=289.51 deg, DEC=18.44 deg, that is 1.78 deg from the transient direction, well within the Carpet-2 angular resolution of 4.7 deg (90% CL).

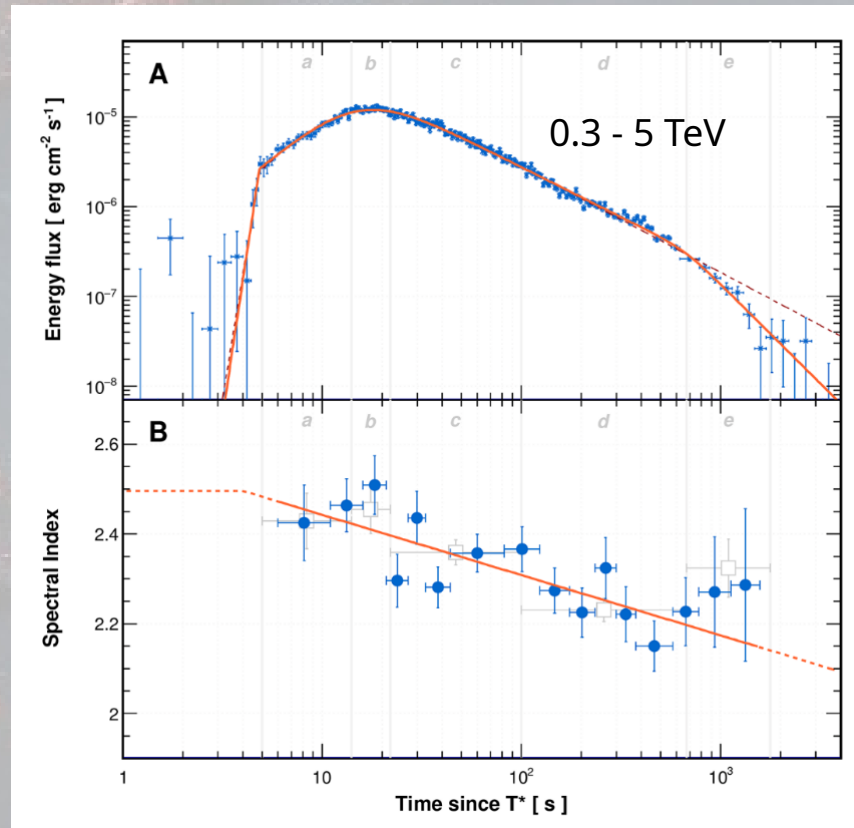
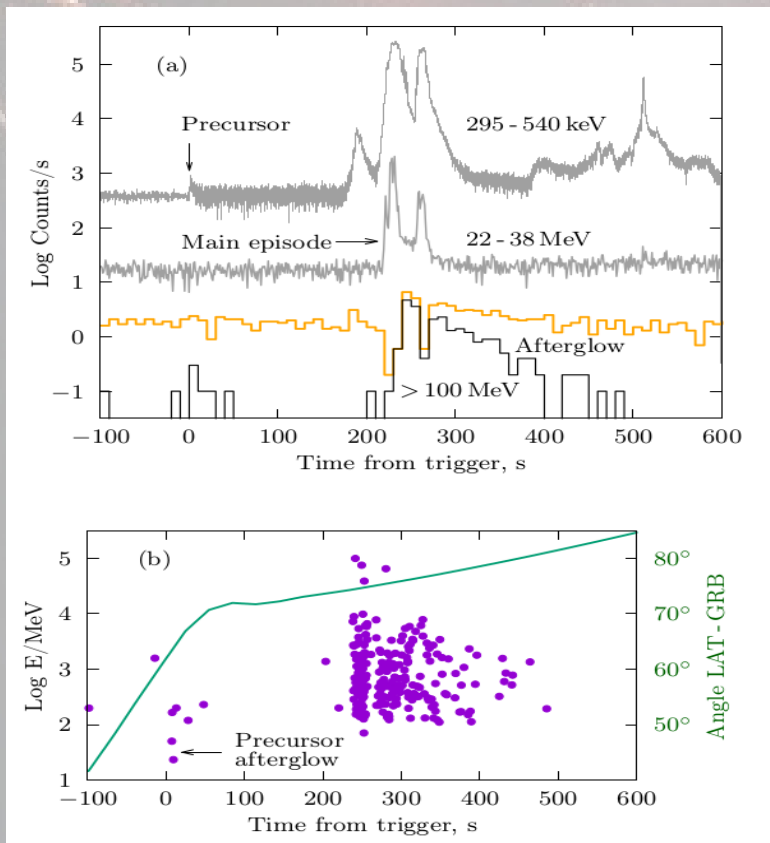


Установка Ковер-2 БНО ИЯИ РАН

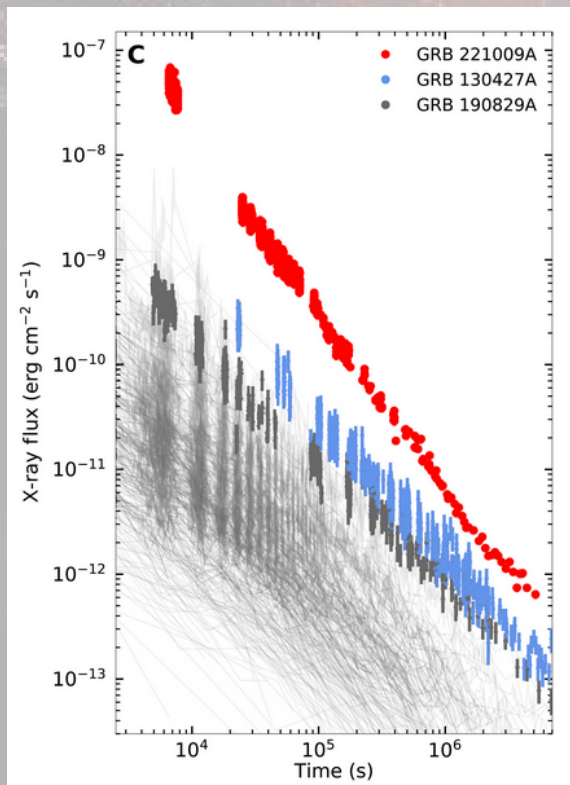


The "Carpet-2" array.
1-6 - outside detectors , 7 - "Carpet", 8 - muon detector,
9 - neutron monitor.

TeV-излучение от гамма-всплеска GRB 221009A



TeV-излучение от гамма-всплеска GRB 221009A



- Наиболее яркий гамма-всплеск за всю историю наблюдений
- Оптическая толщина для $z=0.151$, $E=18$ ТэВ – 18.3 по отношению к рождению пар на фоновом излучении. Такой фотон – редкое событие. 251 ТэВ от $z=0.151$ невозможно объяснить в рамках стандартной физики.

- осцилляции в аксионоподобные частицы

Troitsky, 2022

- нарушение Лоренц-инвариантности

Zhu & Ma, 2022

- другие сценарии новой физики

Лоренц-симметрия

- Все физические процессы протекают одинаково в любой инерциальной системе отчета
- В вычислениях используем 4-векторы $p = (E, \mathbf{p})$
- Инварианты: скалярные произведения или квадраты 4-векторов по метрике Минковского $\text{diag}(1, -1, -1, -1)$

$$E^2 - \mathbf{p}^2 = m^2$$

- Мы точно знаем, что Лоренц-симметрия имеет место при любых энергиях?

Нарушение Лоренц-инвариантности

- Дисперсионные соотношения

$$\gamma : \quad k_0^2 = k^2 + \alpha \frac{k^4}{M_{Pl}^2}$$

$$e^\pm : \quad p_0^2 = (1 + \xi)p^2 + m^2 + \beta \frac{p^4}{M_{Pl}^2}$$

- Сильные экспериментальные ограничения на ξ . Параметры α, β можно считать эффективной массой

$$m_{eff,\gamma}^2(k) = \alpha \frac{k^4}{M_{Pl}^2}$$

$$m_{eff,e^\pm}^2(p) = m^2 + \beta \frac{p^4}{M_{Pl}^2}$$



Как работать в теориях с Лоренц-нарушением?

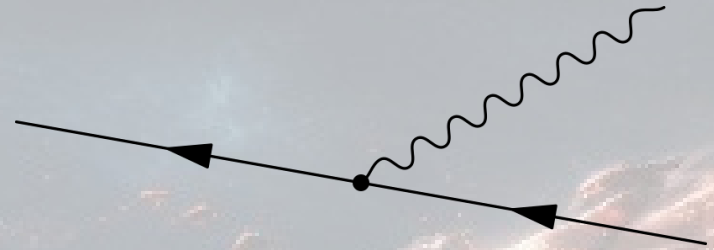
- Нельзя переходить в систему центра масс, все расчеты делаются в лабораторной системе отчета
- Преобразование Лоренца можно выполнять формально, но теперь оно не приводит к эквивалентной теории
- Для вычисления порога можно использовать то, что на пороге групповые скорости всех вторичных частиц одинаковы
 - $\mathbf{v}_i = dE_i/d\mathbf{p}_i = \mathbf{u}$

Coleman, Glashow, Phys.Rev.D 59 (1999)

Физические процессы в Лоренц-нарушенном мире

$$\gamma: \quad k_0^2 = k^2 + \alpha \frac{k^4}{M_{Pl}^2}$$

$$e^\pm: \quad p_0^2 = (1 + \xi)p^2 + m^2 + \beta \frac{p^4}{M_{Pl}^2}$$



- Вакуумное черенковское излучение
 - $\xi > 0$ или $\beta > 0$, электрон в вакууме движется быстрее скорости света

Физические процессы в Лоренц-нарушенном мире

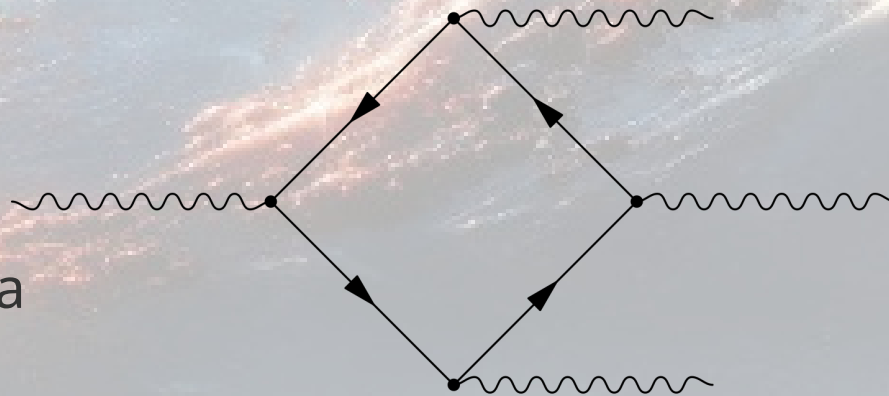
$$\gamma: \quad k_0^2 = k^2 + \alpha \frac{k^4}{M_{Pl}^2}$$

$$e^\pm: \quad p_0^2 = (1 + \xi)p^2 + m^2 + \beta \frac{p^4}{M_{Pl}^2}$$

- Распад фотона на e^+e^-
 - $\alpha > 0$ или $\beta < 0$
- Деление фотона на 3 фотона
 - $\alpha > 0$



Распад $\gamma \rightarrow 3\gamma$



- Деление фотона на 3 фотона
 - $\alpha > 0$

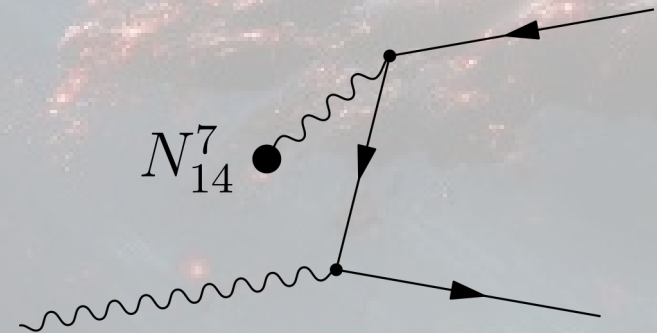
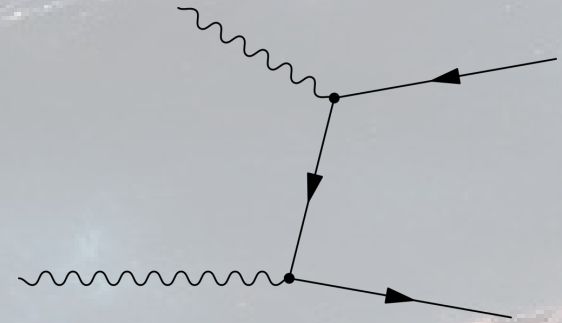
$$\Gamma(\gamma \rightarrow 3\gamma) \simeq \left(\frac{2\alpha_{em}^2}{45}\right)^2 \frac{1}{3!2^{11}\pi^9} \frac{\alpha^5 E_\gamma^{19}}{m^8 M_{Pl}^{10} \left(1 + \xi \frac{E_\gamma^2}{m^2} + \beta \frac{E_\gamma^4}{m^2 M_{Pl}^2}\right)^4} \cdot f$$

$$\Gamma_{\gamma \rightarrow 3\gamma} \simeq 1.2 \cdot 10^3 \left(\frac{2\alpha^2}{45}\right)^2 \frac{1}{2^8 3! \pi^4} \frac{E_\gamma^{19}}{m_e^8 M_{LV}^{10}} \simeq 5 \cdot 10^{-14} \frac{E_\gamma^{19}}{m_e^8 M_{LV}^{10}}.$$

Физические процессы в Лоренц-нарушенном мире

$$\gamma: \quad k_0^2 = k^2 + \alpha \frac{k^4}{M_{Pl}^2}$$

$$e^\pm: \quad p_0^2 = (1 + \xi)p^2 + m^2 + \beta \frac{p^4}{M_{Pl}^2}$$

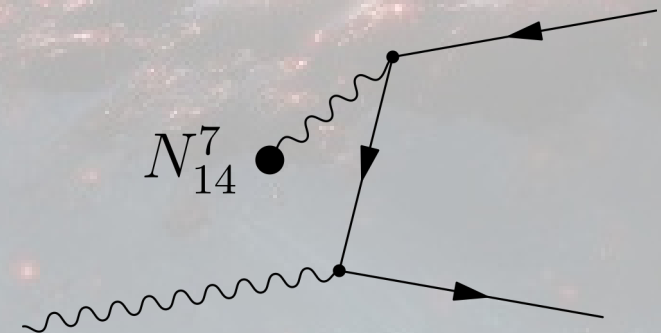
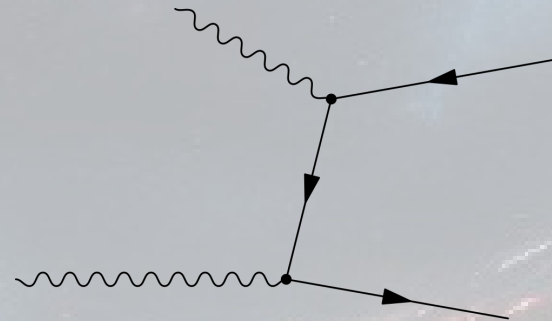


- Порог рождения пар сдвигается
- Процесс Бете-Гайтлера подавлен при $\alpha < 0$ или $\beta > 0$

GR, Satunin, Sibiryakov Phys.Rev.D 86 (2012)

Физические процессы в Лоренц-нарушенном мире

- Порог рождения пар сдвигается
- Процесс Бете-Гайтлера подавлен при $\alpha < 0$ или $\beta > 0$
- Вселенная может стать более прозрачной для гамма-квантов высоких энергий
- НО: атмосфера также станет прозрачнее
- Сильные ограничения на Лоренц-нарушение из самого факта наблюдения гамма-квантов высоких энергий





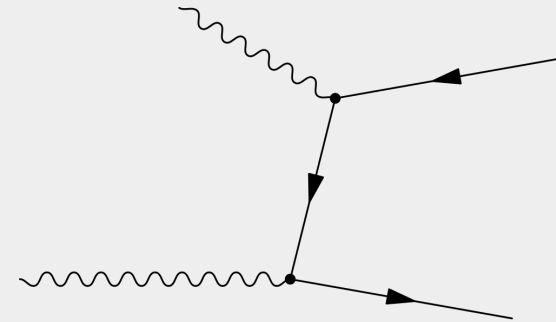
Унести с собой (EM-излучение)

- В эксперименте LHAASO зарегистрированы фотоны с энергией до 1.4 ПэВ
- GRB 221009A самый мощный гамма-всплеск за всю историю наблюдений
- Впервые зарегистрировано излучение от гамма-всплеска с энергией выше 10 ТэВ
- Нарушение Лоренц-инвариантности – одно из возможных объяснений аномальной прозрачности Вселенной

Унести с собой (задача)

$$\gamma : \quad k_0^2 = k^2 + \alpha \frac{k^4}{M_{Pl}^2}$$

$$e^\pm : \quad p_0^2 = (1 + \xi)p^2 + m^2 + \beta \frac{p^4}{M_{Pl}^2}$$



- 3) Вычислить порог рождения электрон-позитронной пары фотона с энергией TeV на фотонах фонового излучения $\sim eV$

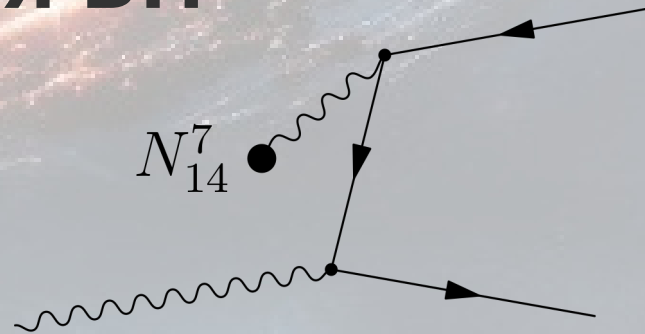
Спасибо за внимание!



Запасные слайды



Модификация сечения ВН



$$\sigma_{\gamma Z \rightarrow Ze^+e^-} = \frac{4Z^2\alpha^3}{3k|\omega_{LV}|} \left[2 \log \frac{1}{\alpha Z^{1/3}} + \frac{1}{2} \log \frac{k|\omega_{LV}|}{m^2} \right] \log \frac{k|\omega_{LV}|}{m^2}. \quad (40)$$

$$\sigma_{\gamma Z \rightarrow Ze^+e^-}^{LI} = \frac{28Z^2\alpha^3}{9m^2} \times \begin{cases} \log \frac{2k}{m} - \frac{109}{42} & \text{no screening} \\ \log \frac{183}{Z^{1/3}} - \frac{1}{42} & \text{with screening} \end{cases}$$