

Нейтрино. Увлекательный квест.

Д.В. Наумов
ОИЯИ (Дубна)

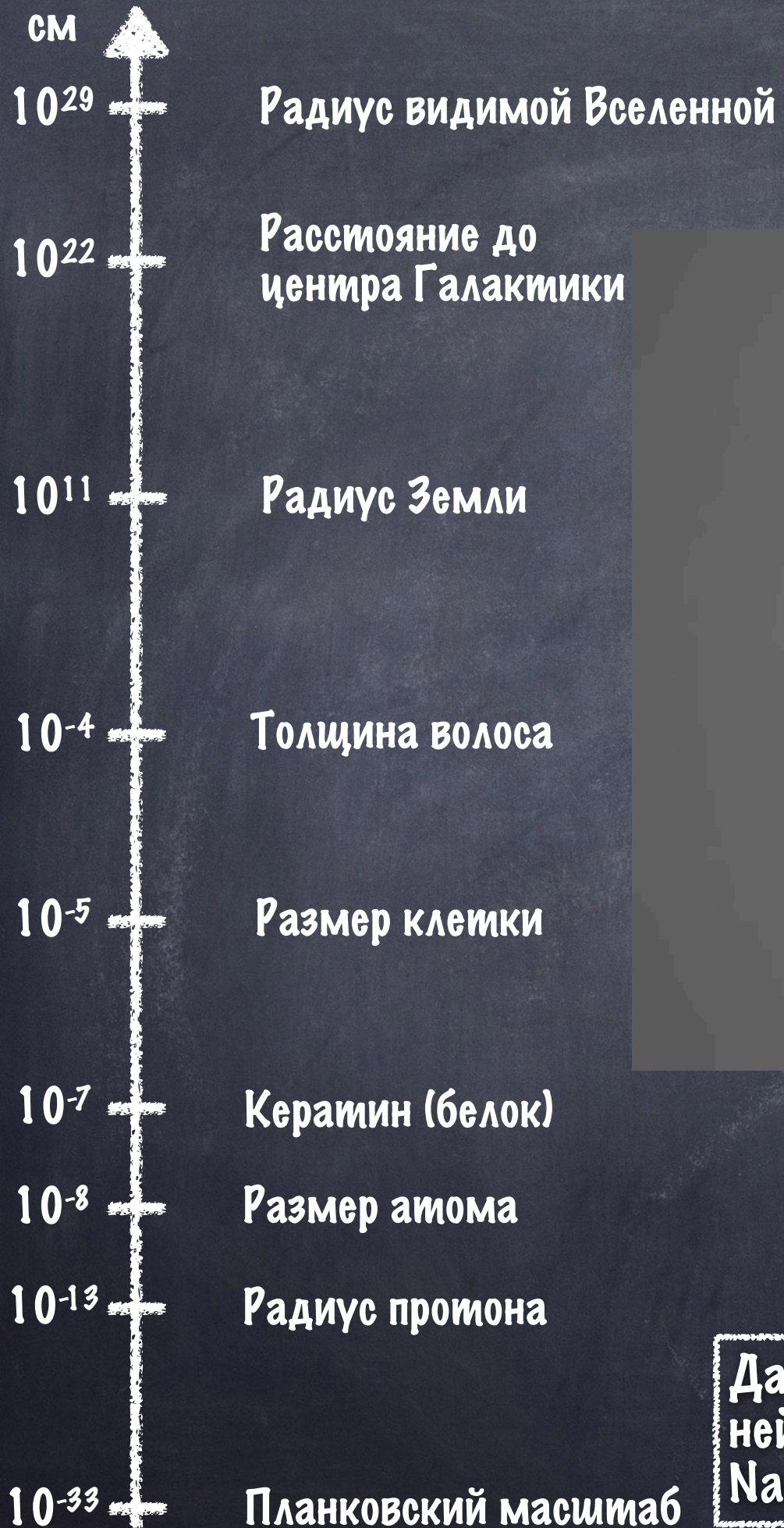
Предисловие

- История исследования нейтрино — это постоянное разгадывание загадок, подбрасываемых Природой.
- В этой лекции мы рассмотрим только две решенные загадки и расскажем только об одной текущей
- Остальное — темы для других лекций
- Задавайте вопросы по ходу лекции.
- «Глупых» вопросов не бывает.

Как все устроено?

Роль нейтрино в понимании
картины мира

Масштабы



Анимация ЦЕРН

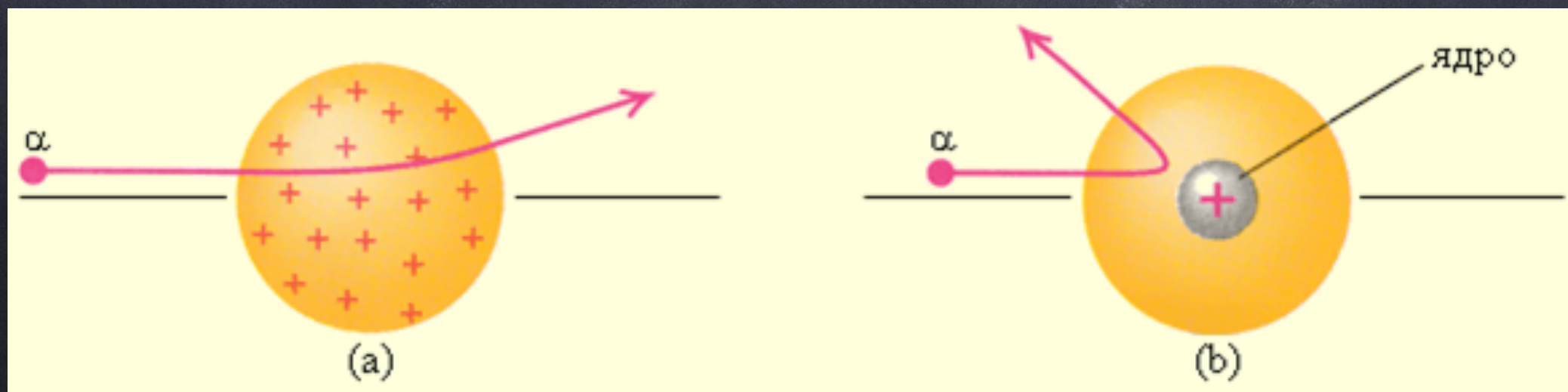
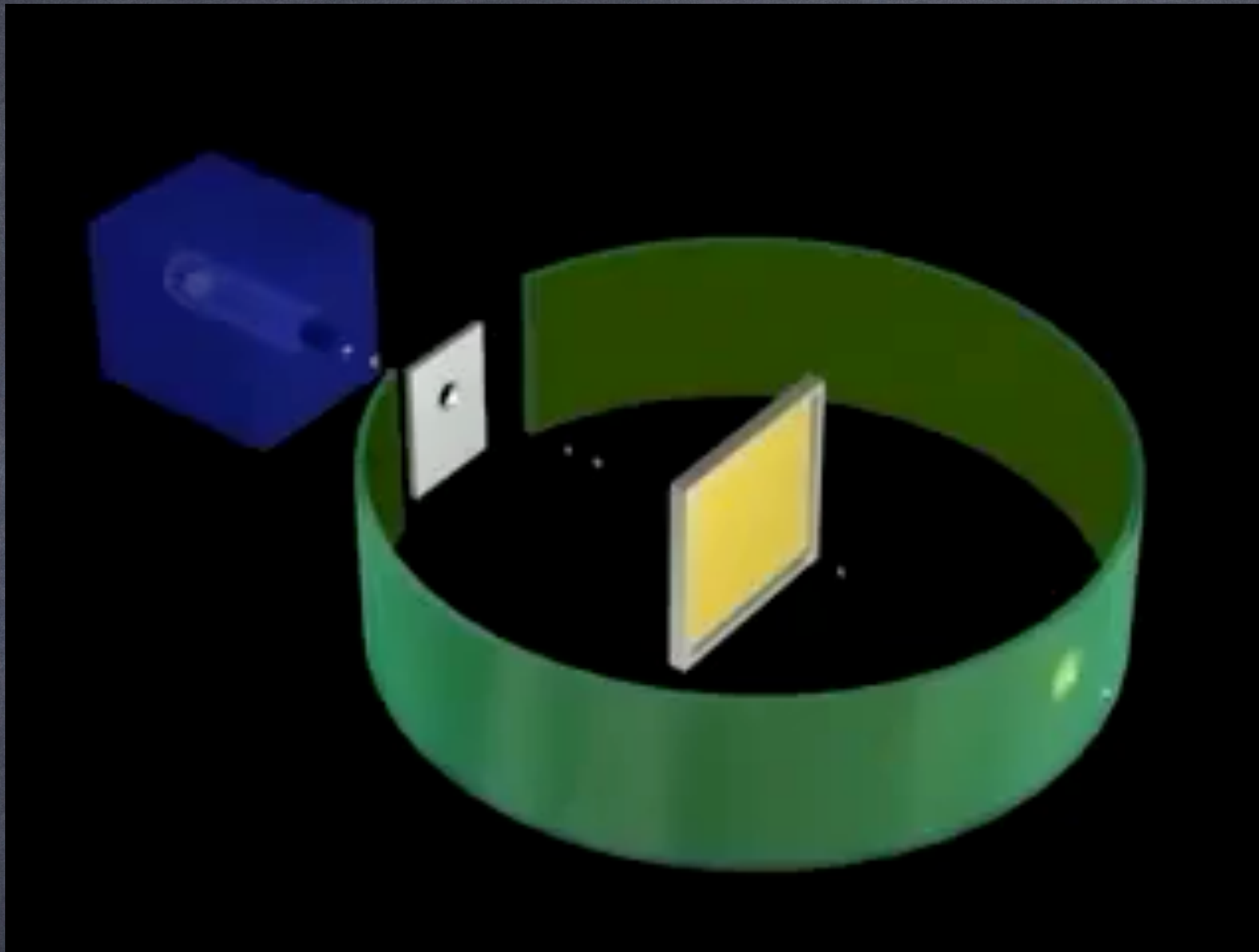
Давление внутри протона порядка 10^{35} Па, больше чем в нейтронной звезде!
Nature 557, 396–399 (2018)

Структура вещества

Все (привычное нам) вещество состоит из атомов

H 1																	He 2				
Li 3	Be 4															B 5	C 6	N 7	O 8	F 9	Ne 10
Na 11	Mg 12															Al 13	Si 14	P 15	S 16	Cl 17	Ar 18
K 19	Ca 20	Sc 21	Ti 22	V 23	Cr 24	Mn 25	Fe 26	Co 27	Ni 28	Cu 29	Zn 30	Ga 31	Ge 32	As 33	Se 34	Br 35	Kr 36				
Rb 37	Sr 38	Y 39	Zr 40	Nb 41	Mo 42	Tc 43	Ru 44	Rh 45	Pd 46	Ag 47	Cd 48	In 49	Sn 50	Sb 51	Te 52	I 53	Xe 54				
Cs 55	Ba 56			Hf 72	Ta 73	W 74	Re 75	Os 76	Ir 77	Pt 78	Au 79	Hg 80	Tl 81	Pb 82	Bi 83	Po 84	At 85	Rn 86			
Fr 87	Ra 88																				
		La 57	Ce 58	Pr 59	Nd 60	Pm 61	Sm 62	Eu 63	Gd 64	Tb 65	Dy 66	Ho 67	Er 68	Tm 69	Yb 70	Lu 71					
		Ac 89	Th 90	Pa 91	U 92	Np 93	Pu 94	Am 95	Cm 96	Bk 97	Cf 98	Es 99	Fm 100	Md 101	No 102	Lr 103					

Пудинг, Резерфорд, Атом



Загадка 1. Потерянная энергия

1930 г.
04
ДЕКАБРЯ

на кончике пера
Новости

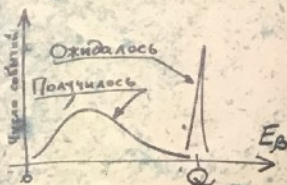
Назад в будущее
Все РАДИО- и просто АКТИВНЫЕ дамы и господа в пятницу 04.12.2015 празднуют 85-летие самой распространенной частицы во Вселенной. Поздравим Юбилера!

№1 ЧЕТВЕРГ, 4 ДЕКАБРЯ 1930 г. Цена: бесценна

В БЕТА-РАСПАДЕ ПРОПАДАЕТ ЭНЕРГИЯ!

Куда смотрит правительство?

В начале XX века экспериментально было обнаружено, что, в бета-распаде известного тогда радия творится что-то неладное: энергетический бета-спектр не дискретен, как ожидалось, а напротив — непрерывен. Получалось, что вылетающему из ядра электрону достается не вся энер-



гия распада (как это происходит, напи-

Пропажка века найдена!



Четырьмя годами позднее итальянский физик Энрико Ферми, разрабатывая подробную теорию бета-распада, дал этой, тогда еще гипотетической, маленькой нейтральной частице итальянское имя Нейтрино, то есть «Нейтрончик», — в противовес большому тяжелому Нейтрону, экспериментально открытому к тому времени Джеймсом Чедвиком. В отличие от нейтрона, зарегистрировать нейтрино оказалось крайне непросто. Долгое время это считалось вообще невозможным. Сам Паули признавался, что поступил ужасно по отношению к экспериментаторам, придумав принципиально не регистрируемую частицу, и даже поспорил со своим другом на бутылку шам-

Молодой австрийский физик Вольфганг Паули, работавший в Цюрихе, предположил, что при бета-распаде из ядра, кроме электро-

Дорогие радиоактивные дамы и господа!

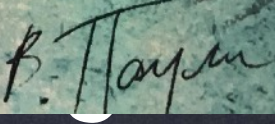
4 декабря 1930 года Паули был приглашен на вечеринку с танцами, поэтому он, разумеется, отказался поехать на конференцию в Тюбинген. Но он не мог не поделиться своей идеей с коллегами и потому написал им знаменитое письмо, открыв тем самым новую частицу «на кончике пера».



Дорогие радиоактивные дамы и господа! Я прошу Вас выслушать со вниманием в наиболее удобный момент посланца, доставившего данное письмо. Он расскажет Вам, что я нашел отличное средство для спасения закона сохранения энергии и получения правильной статистики... Оно заключается в возмож-

нейтронами (частица, за которой в последствии закрепилось это название была открыта через два года — Прим. редактора). Непрерывность бета-спектра станет понятной, если предположить, что при бета-распаде с каждым электроном испускается такой нейтрон, причем сумма энергии нейтрона и электрона постоянна. Итак, дорогой радиоактивный народ, рассматривайте и судите. К сожалению, я не могу появиться в Тюбингене лично, так как мое присутствие здесь необходимо из-за бала, который состоится в Цюрихе в ночь с 6 на 7 декабря.

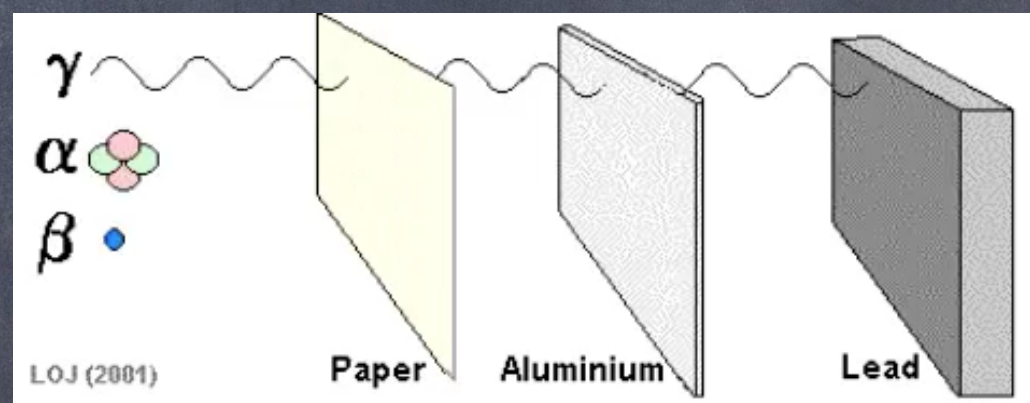
Ваш покорный слуга
В. Паули.



теоретическое рождение нейтрино

Радиоактивность

Энергия начального ядра = Энергия конечного ядра + энергия $\alpha(\gamma)$ частицы



Энергия начального ядра $\neq$ Энергия конечного ядра + энергия β частицы

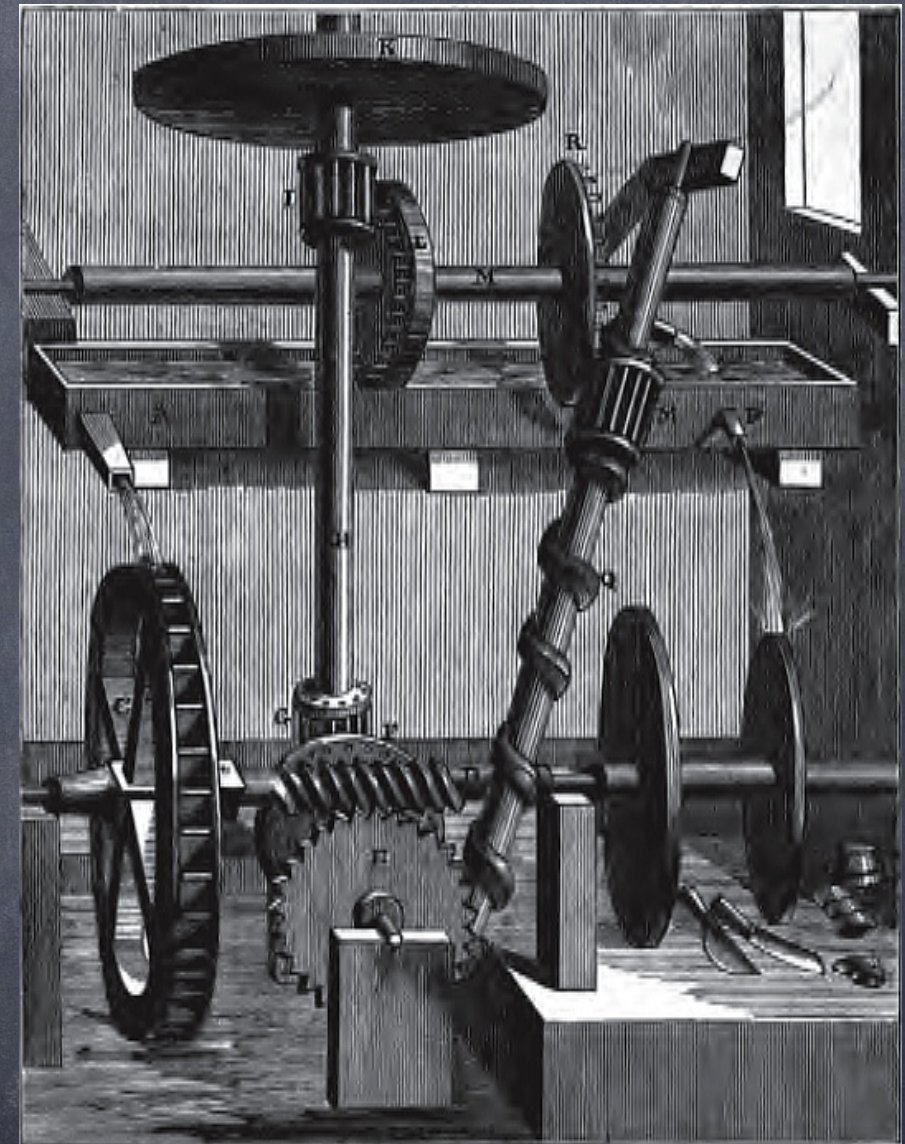
Энергия в бейта-распадах
ядер не сохраняется?!



Сохранение энергии

- Сохранение энергии — фундаментальный закон природы

- «История «Вечного движения» — это история безрассудства как полубразованных, так и совершенно невежественных людей». Генри Диск (1861)

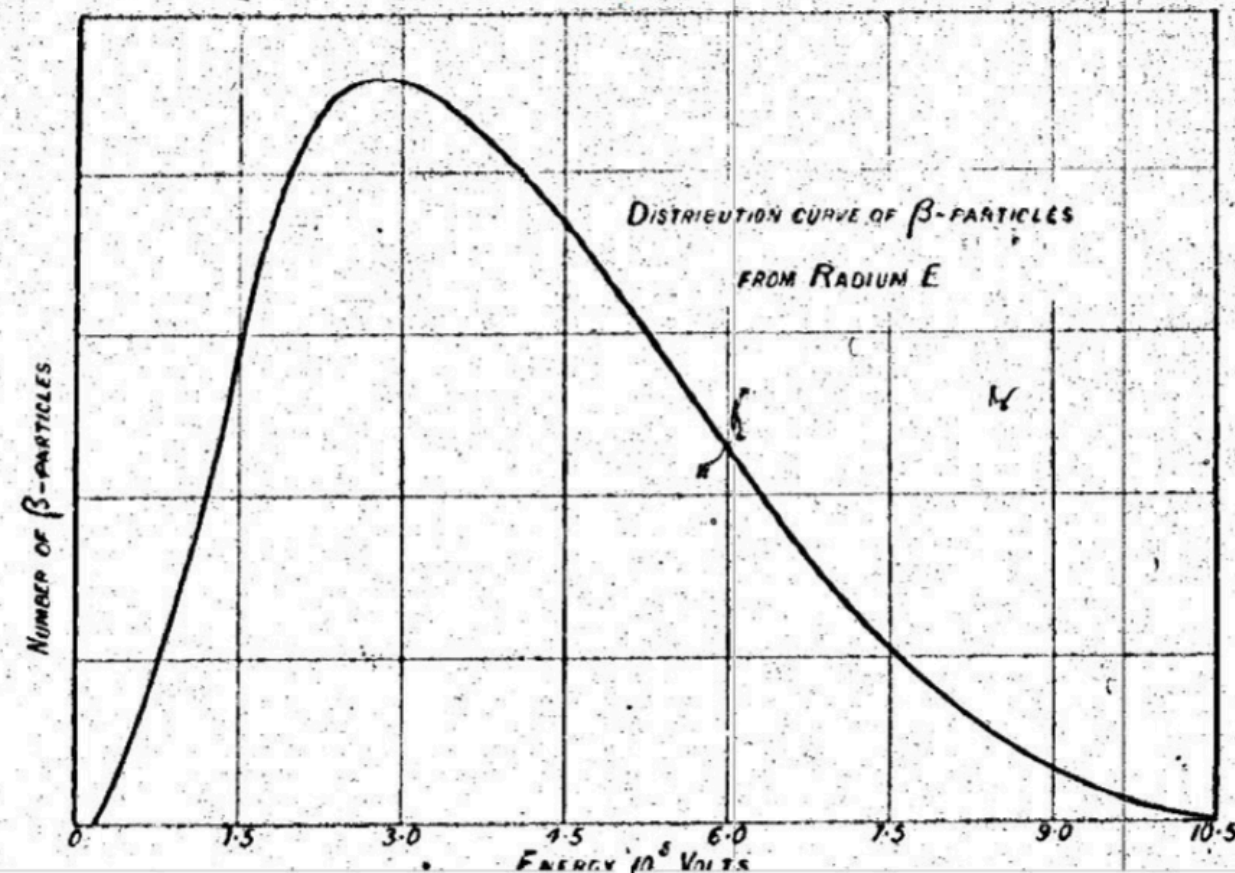
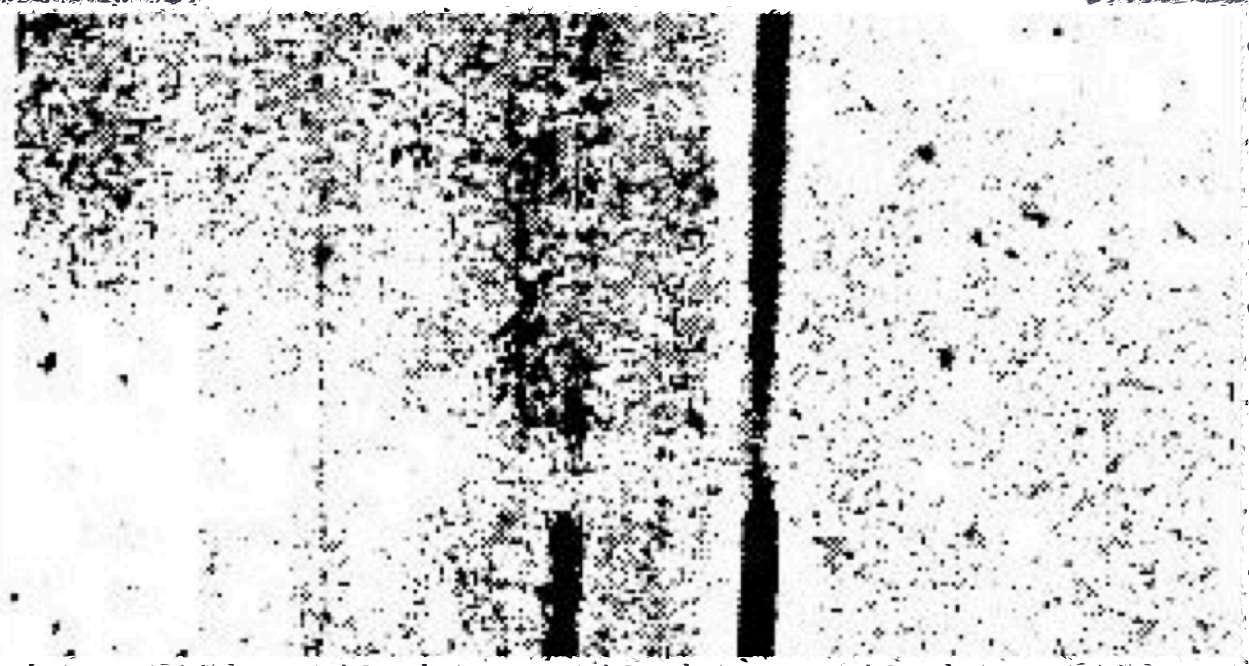
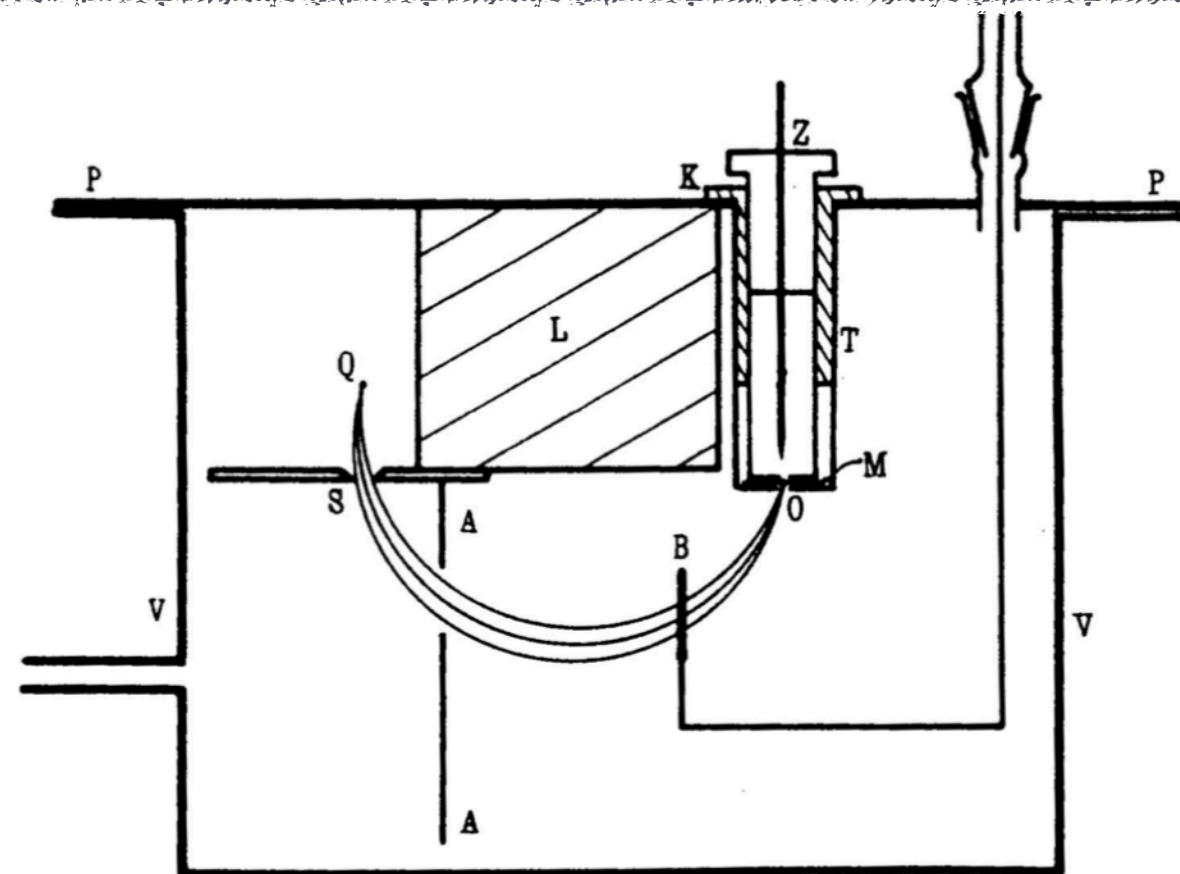
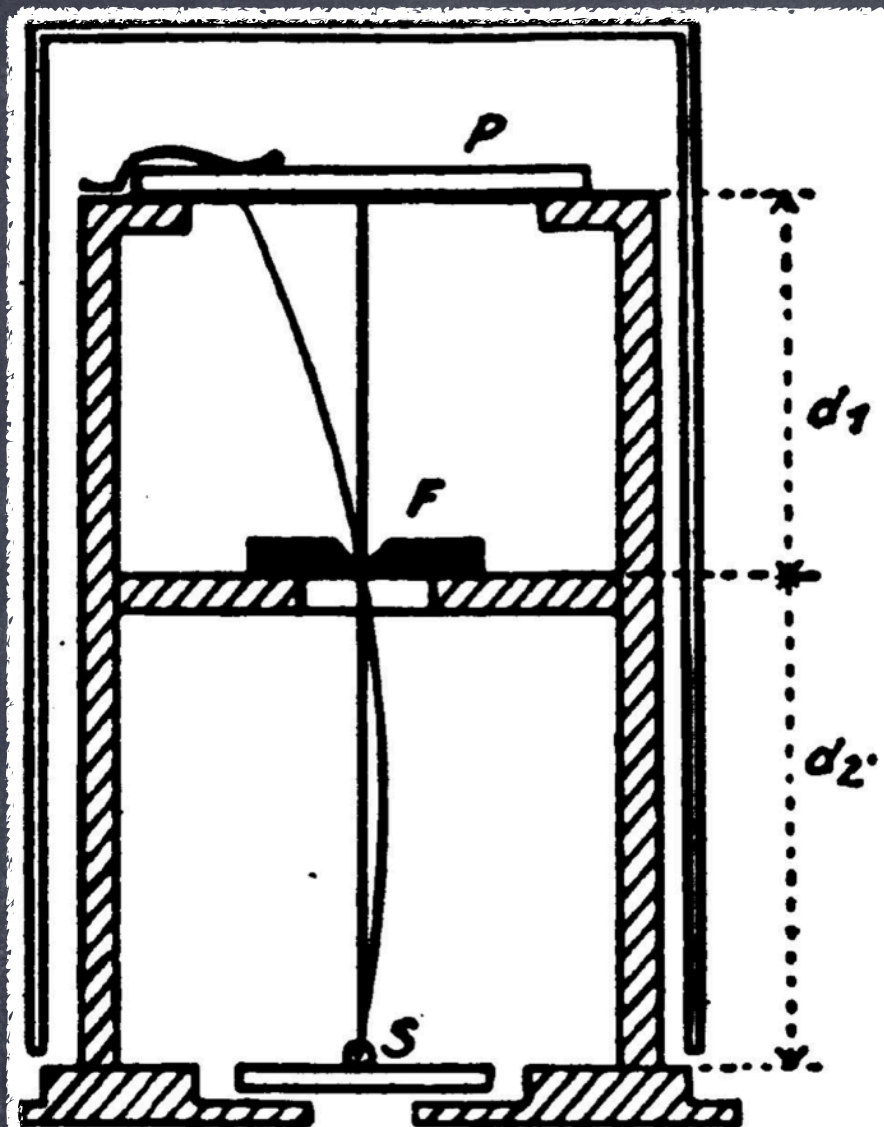


1618. Роберт Флуд.
Вечный двигатель

Мейтнер

15 лет

ЧэДВИК



Паули



~~Начальное ядро $\rightarrow$ Конечное ядро + e^-~~

Начальное ядро $\rightarrow$ Конечное ядро + e^- + "нейтрон"

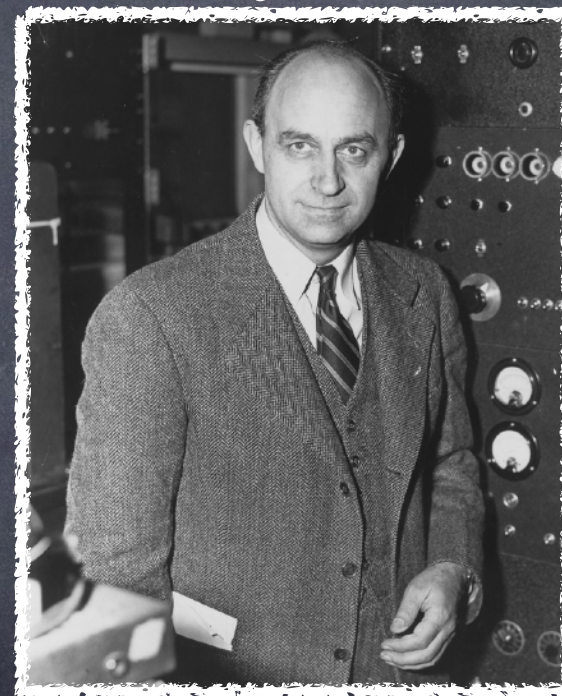
«Нейтрон» Паули легкий и слабо взаимодействует

Чэдвик



Открывает нейтрон

Ферми



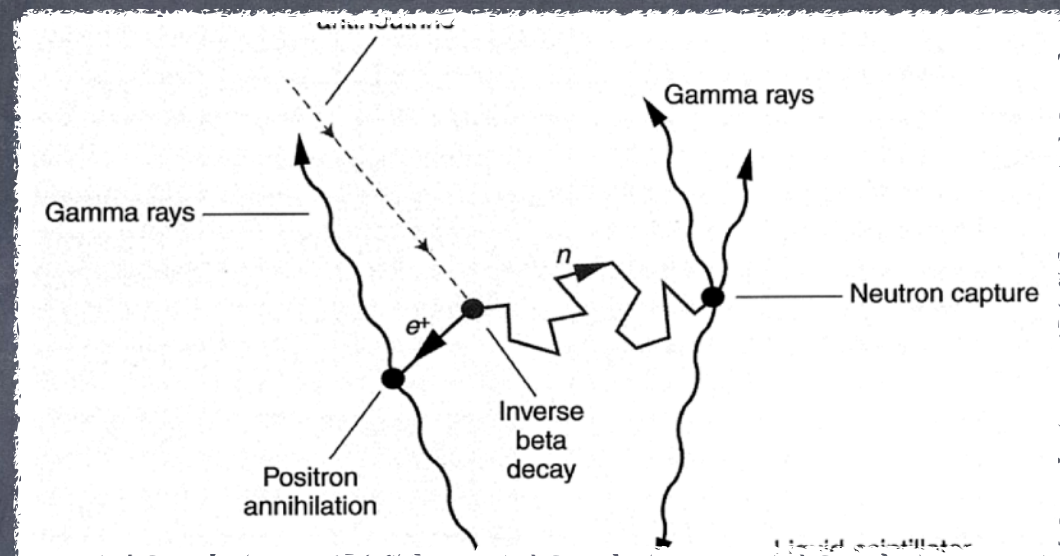
- Нейтрон $\rightarrow$ нейтрино
- Теория бета-распада

Райнс

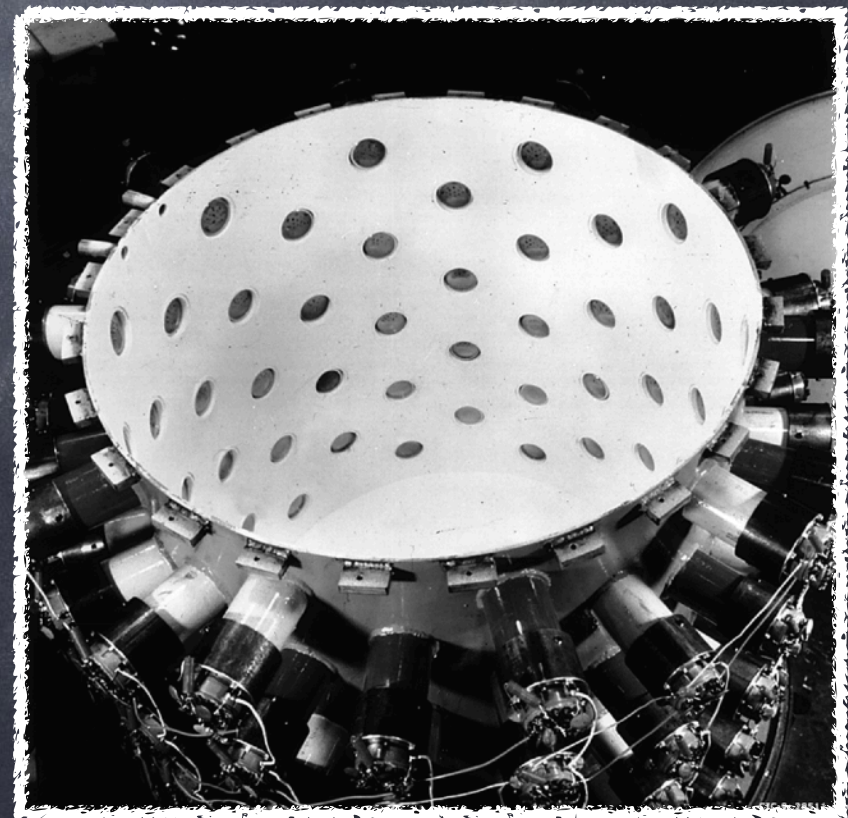
Коэн



$$\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$$



«Мы счастливы проинформировать Вас, что мы определенно обнаружили нейтрино от развалов ядер, наблюдая обратные бета-распады протонов.»

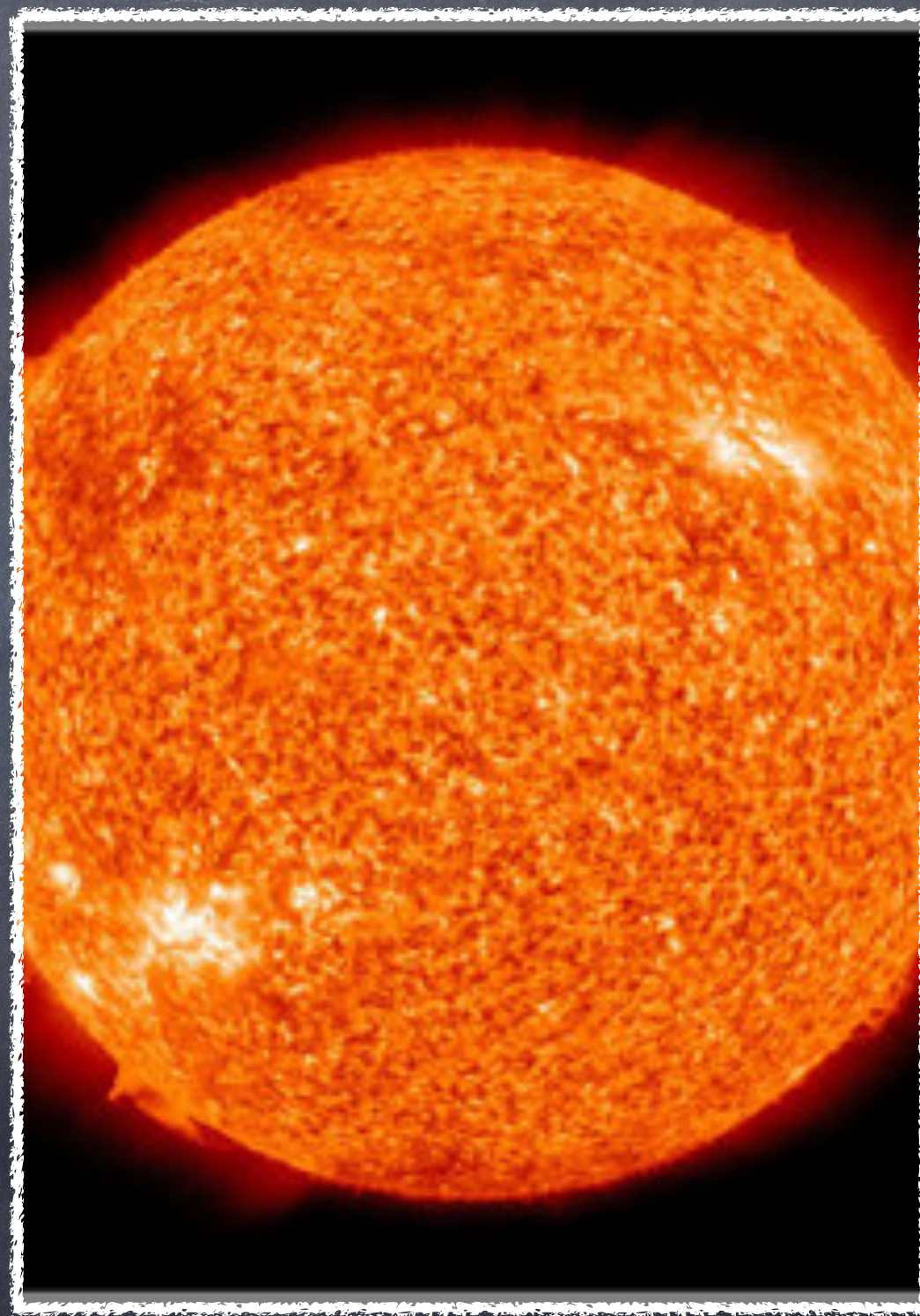


Загадка 2.
Померянные нейтрино
от Солнца

Почему светит Солнце?

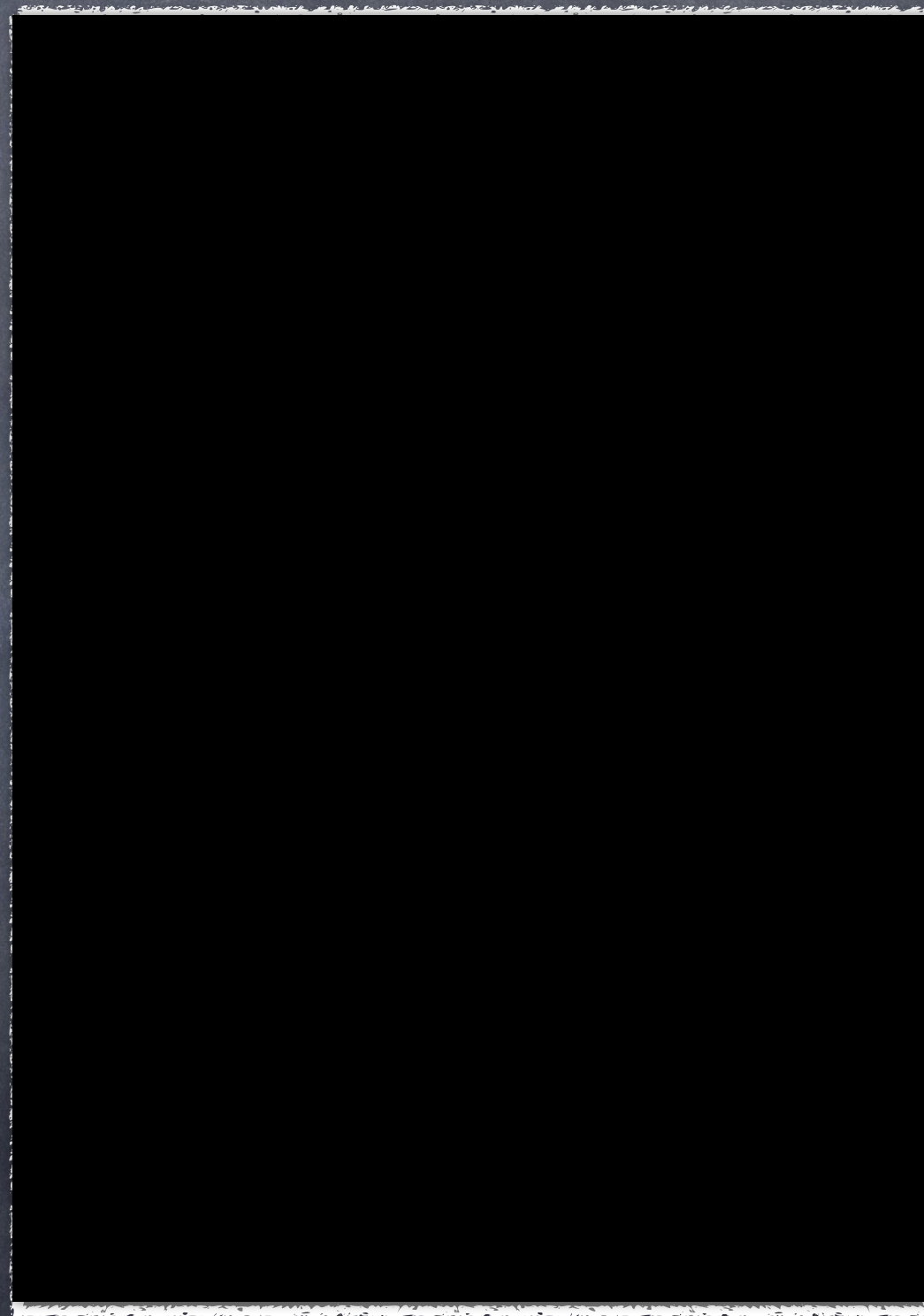
Spin:

$$\underbrace{\frac{1}{2} + \frac{1}{2}}_{\text{even}} \rightarrow \underbrace{1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{2}}_{\text{even}}$$



Почему светит Солнце?

Spin:
$$\underbrace{\frac{1}{2} + \frac{1}{2}}_{\text{even}} \nrightarrow \underbrace{1 + \frac{1}{2}}_{\text{odd}} + e^+$$



Нем нейтрино = Нем света от Солнца = Нем жизни

Решим простую задачку. 12+

Сколько времени нужно, чтобы фотону и нейтрино, родившимся в центре Солнца, добраться до Земли?

Дано: расстояние от центра Солнца до Земли

$R=150$ миллионов километров.

Скорость фотона=скорость нейтрино

$v=300$ тысяч км/сек

Решение

$$T = R/v = 150\,000\,000/300\,000 \text{ сек} \\ = 500 \text{ сек}$$

Правильный ответ:

- $T=100\,000$ лет для фотона.
- $T=500$ сек для нейтрино

Загорая на пляже, помните
Фотоны выбирались 100 000 лет к Вам,
испытав более 10^{22} столкновений



Почему светит Солнце?

- В результате цепочки ядерных реакций



- Выделяется энергия $Q=26.7$ МэВ в каждой такой цепочке
- Легко оценить число нейтрино в секунду от Солнца, ожидаемое на Земле, исходя из

число нейтрино в сек = $2 \cdot$ число цепочек в секунду
свечимость Солнца = $Q \cdot$ число цепочек в секунду

- Разделим левую и правую части

$$\frac{\text{число нейтрино в сек}}{\text{свешимоссть Солнца}} = \frac{2}{Q}$$

- Разделим числитель и знаменатель на R^2

$$\frac{\text{число нейтрино в сек}/R^2}{\text{свешимоссть Солнца}/R^2} = \frac{2}{Q}$$

- Подставим числа $Q=26.7$ МэВ, поток солнечной энергии на Земле (свешимоссть/ R^2) = 1.4 кВт/м²

$$\text{поток нейтрино на Земле} = 6.5 \cdot 10^{10} / \text{см}^2 / \text{сек}$$

- Эксперименты обнаружили почти в два раза меньшее число нейтрино от Солнца

Куда пропали солнечные нейтрино?

Где ошибка в расчетах?

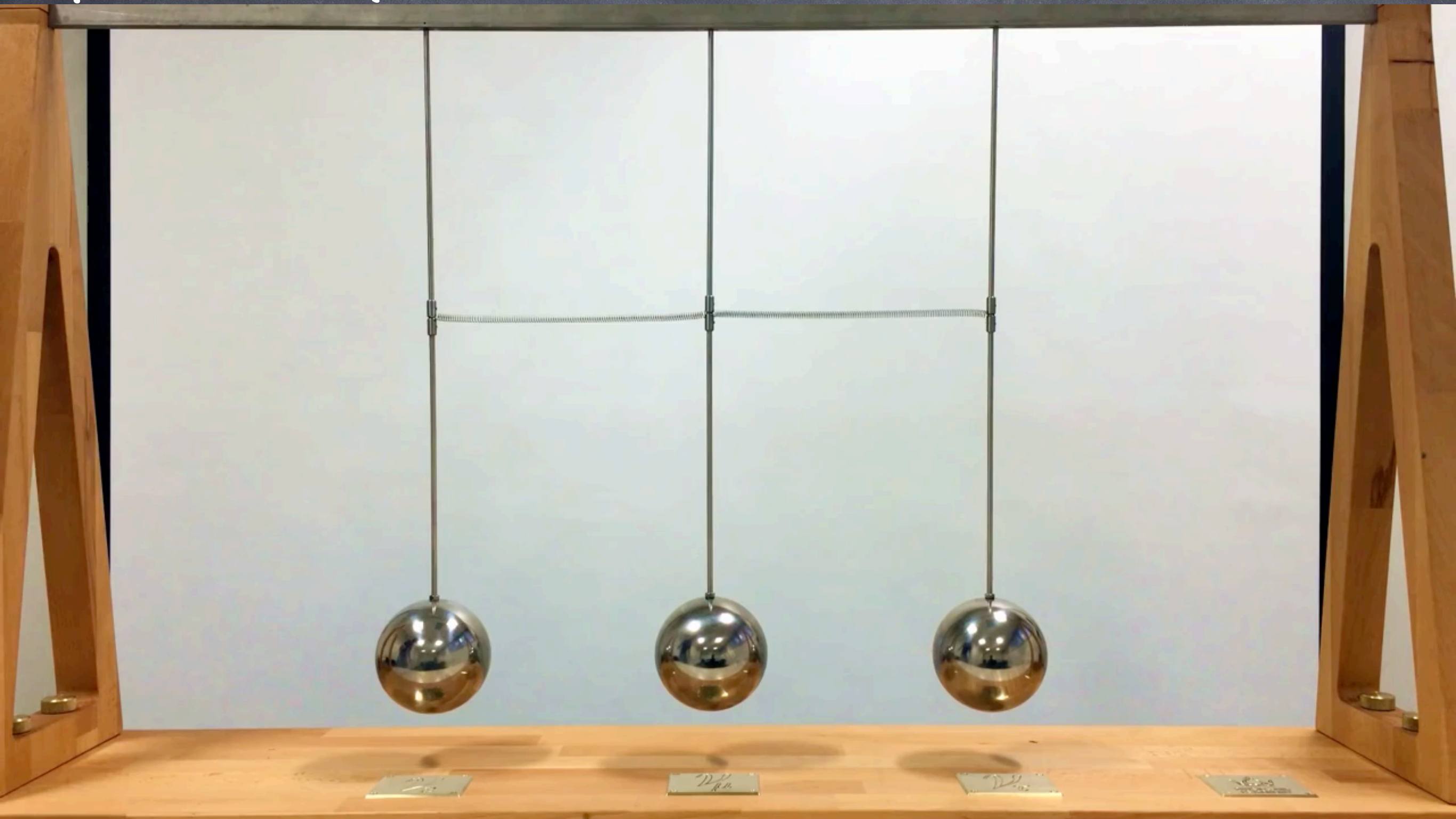


Школьник за ошибку
получает двойку

Ученые назвали это
«Загадка солнечных
нейтрино» и
потребовали денег,
чтобы ее решить

Нейтринные осцилляции

Электронные нейтрино превратились в другой тип нейтрино по пути к от Солнца к Земле



<https://www.youtube.com/watch?v=YqVF3NSc5xg>



Бруно Понтекорво

- 1950-1993. В ЛЯП ОИЯИ работал выдающийся физик Б.М. Понтекорво.
- Он заложил школу нейтринной физики в Дубне.
- Предложил идеи дешифрирования реакторных, солнечных и ускорительных нейтрино.
- Предложил идею «нейтринных осцилляций»

Нобелевские премии по физике нейтрино

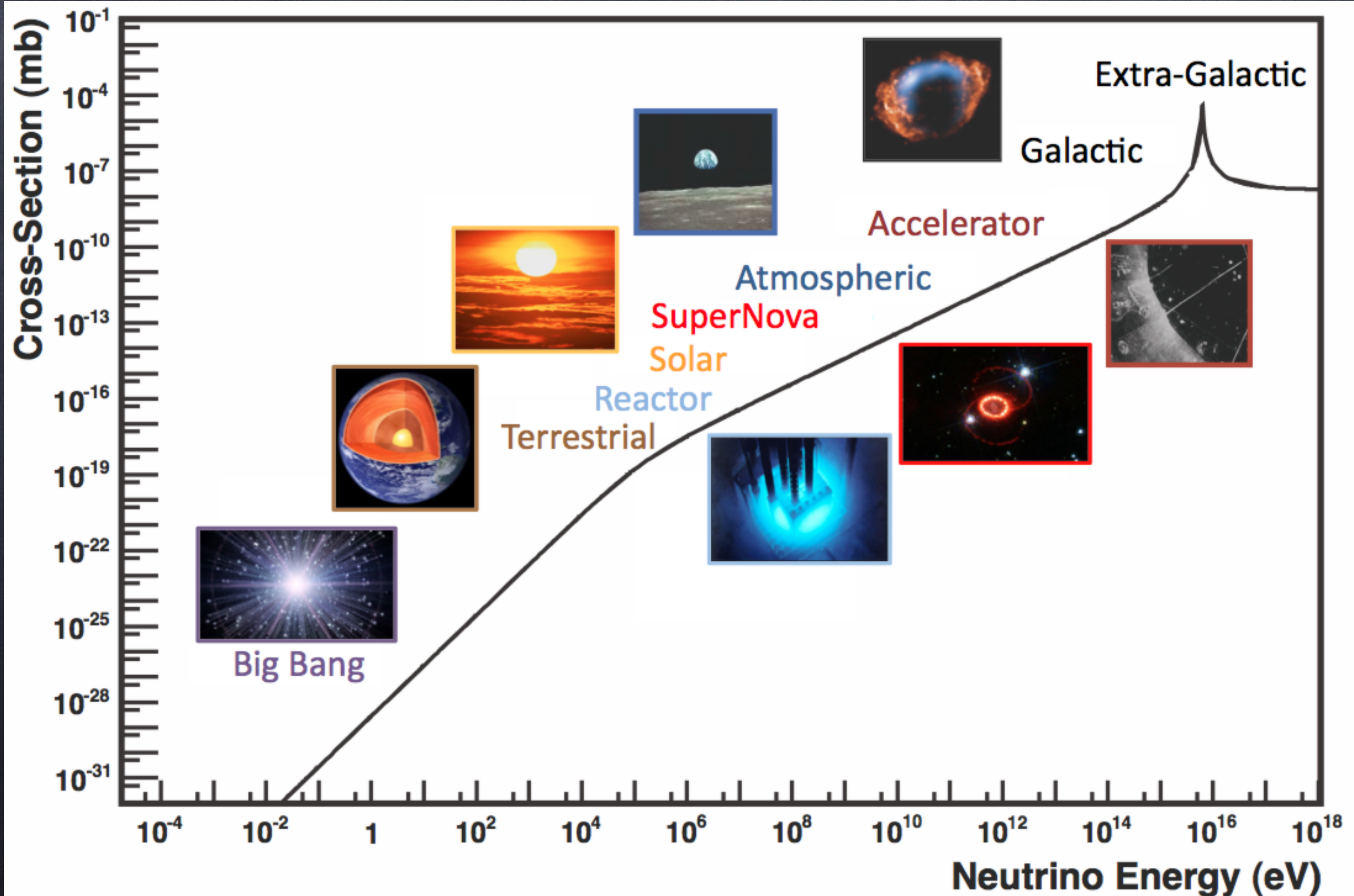
- 1995 (Frederick Reines). Открытие электронного антинейтрино.
- 1988 (Leon M. Lederman, Melvin Schwartz и Jack Steinberger). Открытие мюонного нейтрино.
- 2015 (Takaaki Kajita и Arthur B. McDonald). Осцилляции нейтрино.
- 2002 (Raymond Davis, Jr. и Masatoshi Koshiba). Сверхновая 1987А.



Загадка 3.

Источники астропфизических
нейтрино сверхвысоких энергий

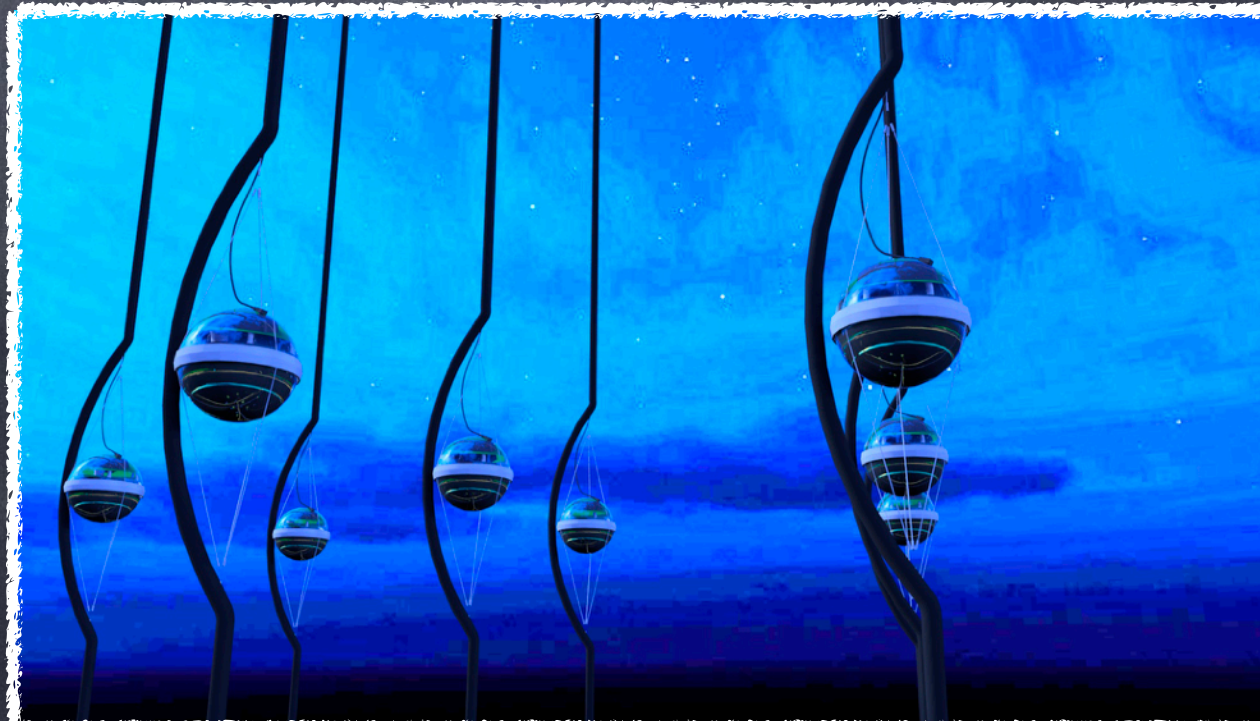
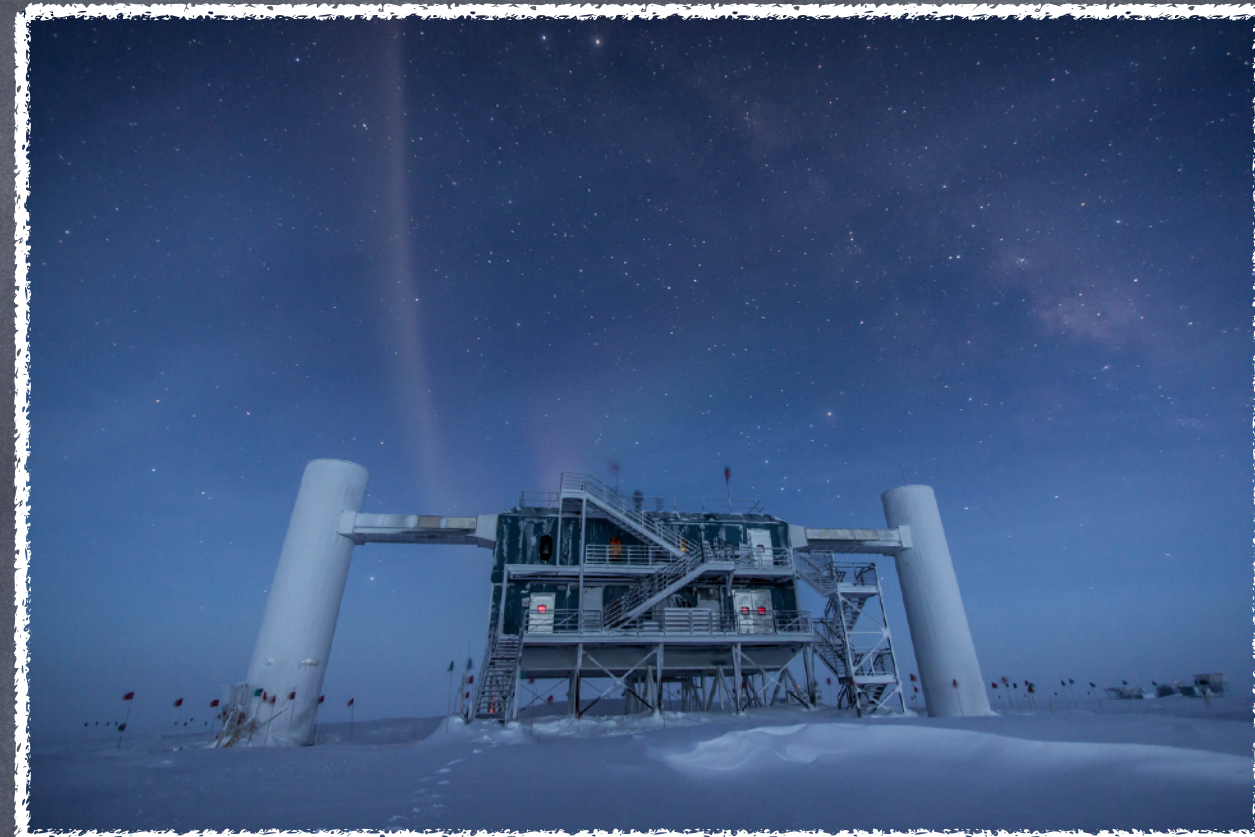
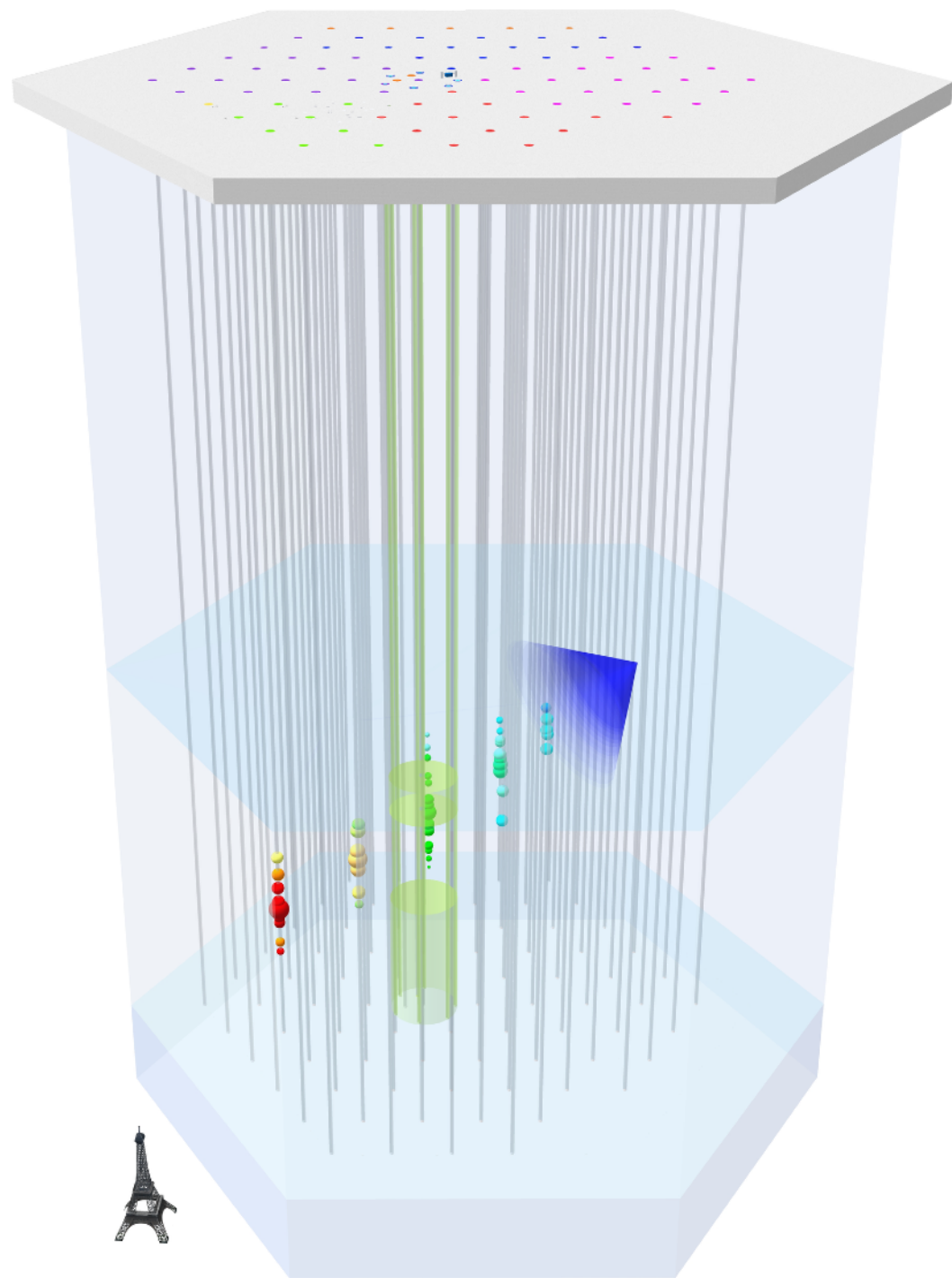
Источники нейтрино



Нейтрино из космоса

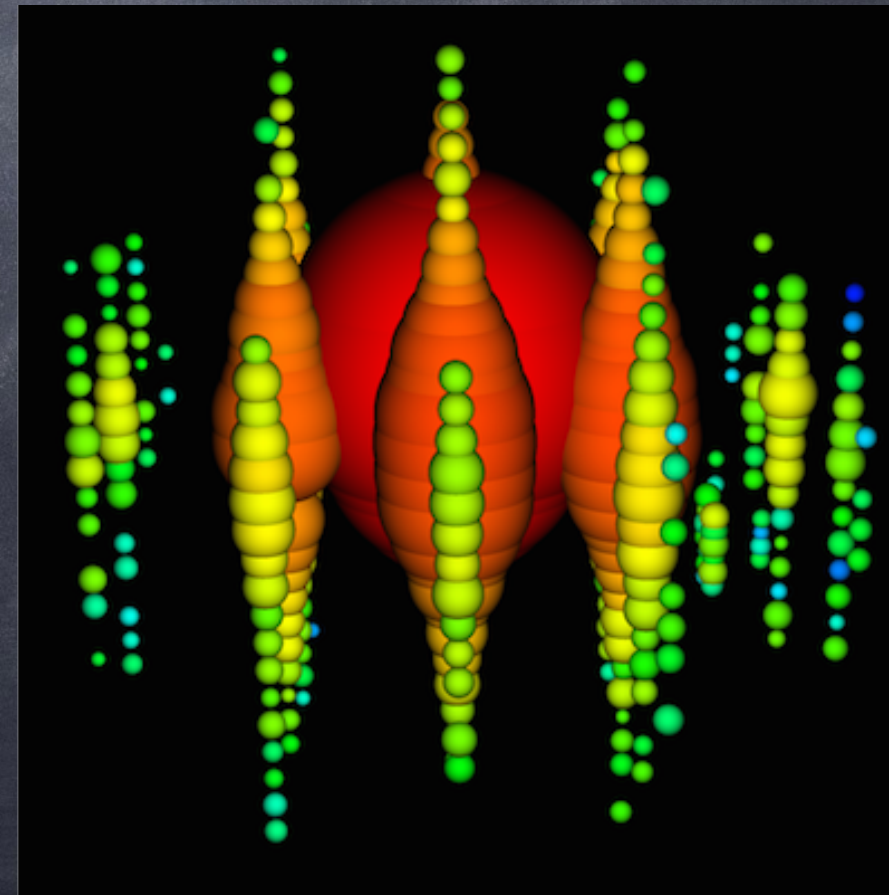
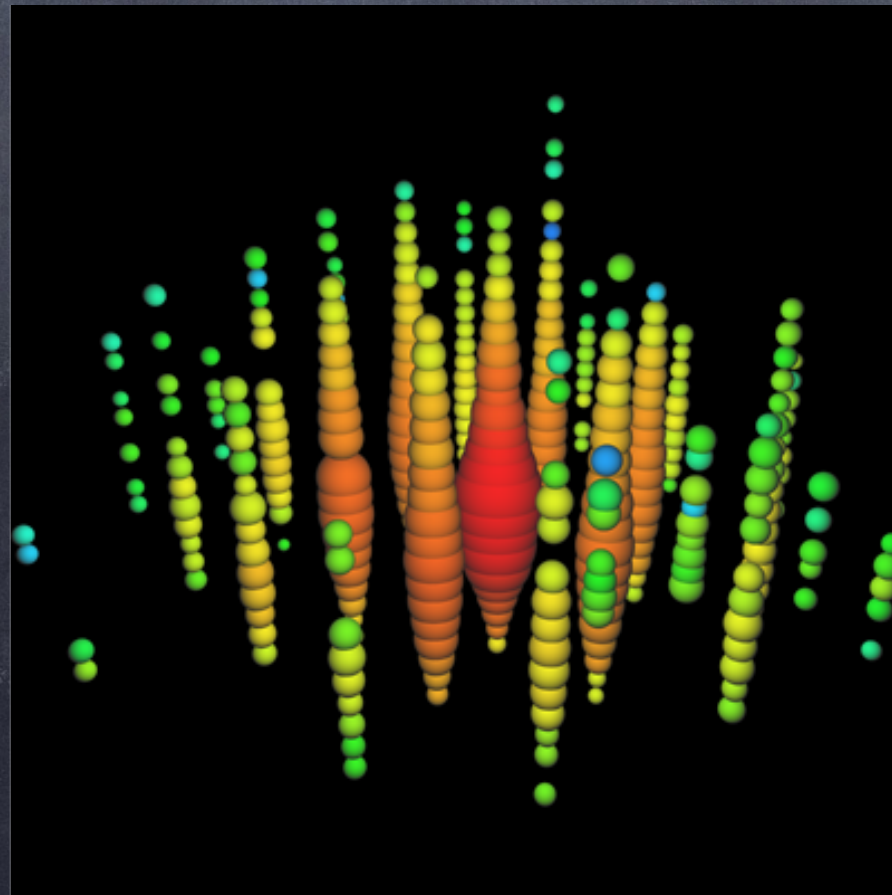
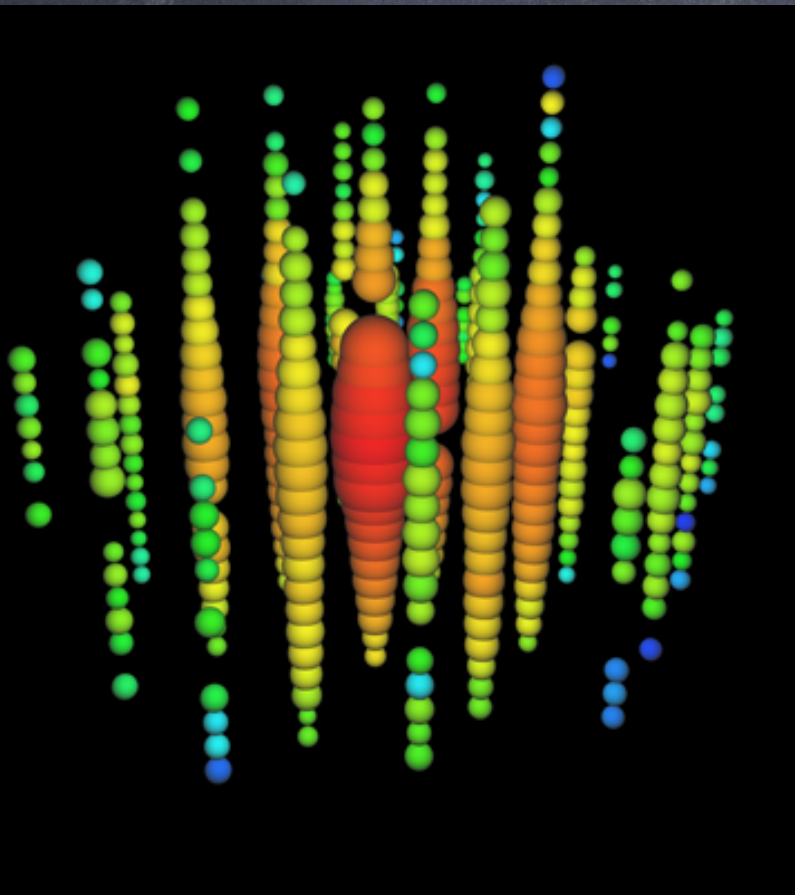
- Солнечные нейтрино
- Нейтрино от взрыва сверхновой SN1987A
- И ... наконец!

IceCube на южном полюсе



Астрофизические нейтрино сверхвысоких энергий существуют! (IceCube)

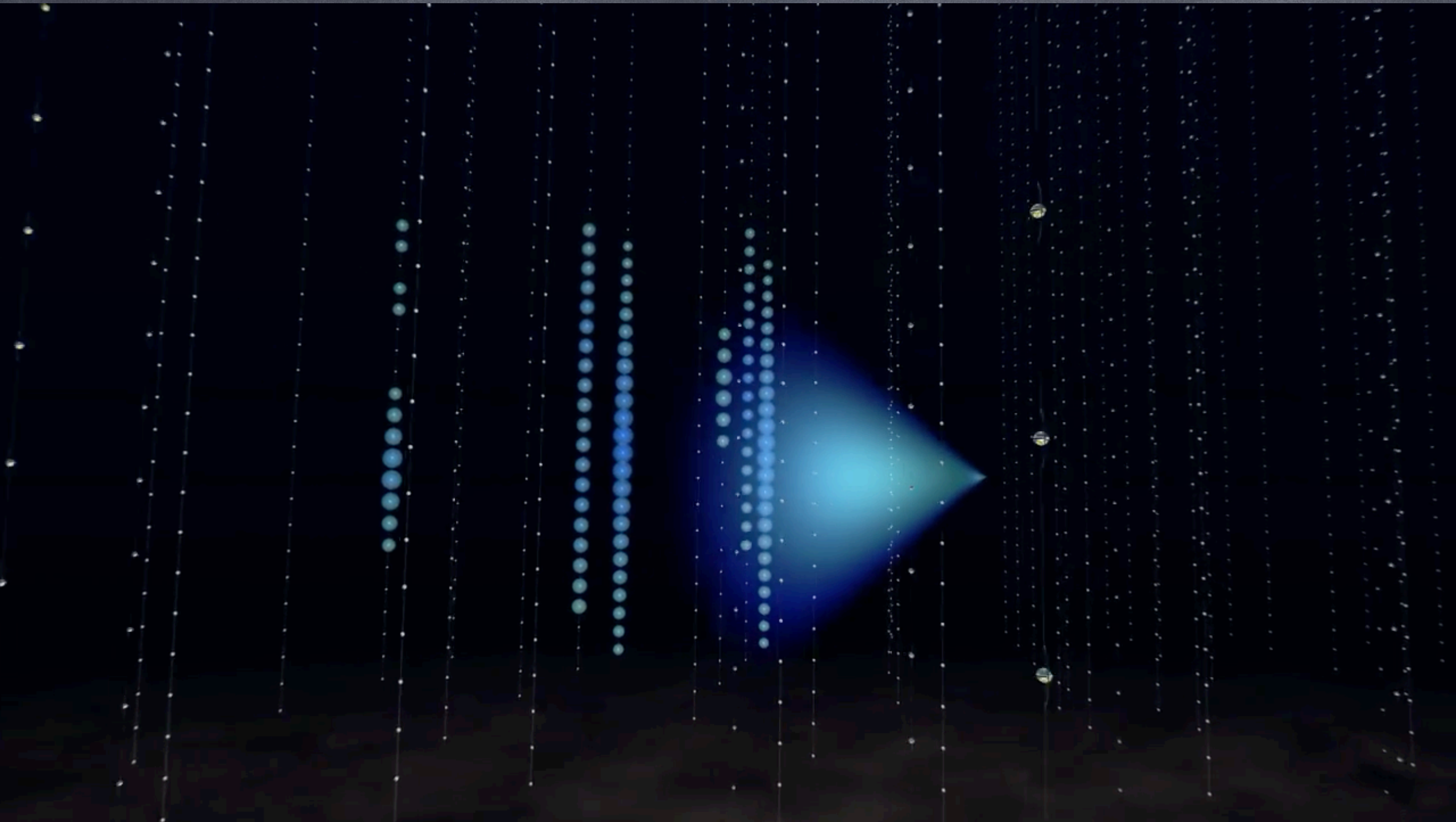
- Bert, Ernie, Big Bird с энергиями 1, 1.1 и 2.2 ПэВ (10^{15} эВ)
- Несколько десятков менее энергичных астрофизических нейтрино
- Нейтринная астрономия родилась



В чем тут загадка?

- Что во Вселенной рождает нейтрино столь высоких энергий (10^{15} эВ)?
- Характерная энергия нейтрино внутри звезд это (10^6 эВ).

Принцип детектирования нейтрино



Почему Байкал?

- Во льду свет сильно рассеивается
- Трудно определить источник света



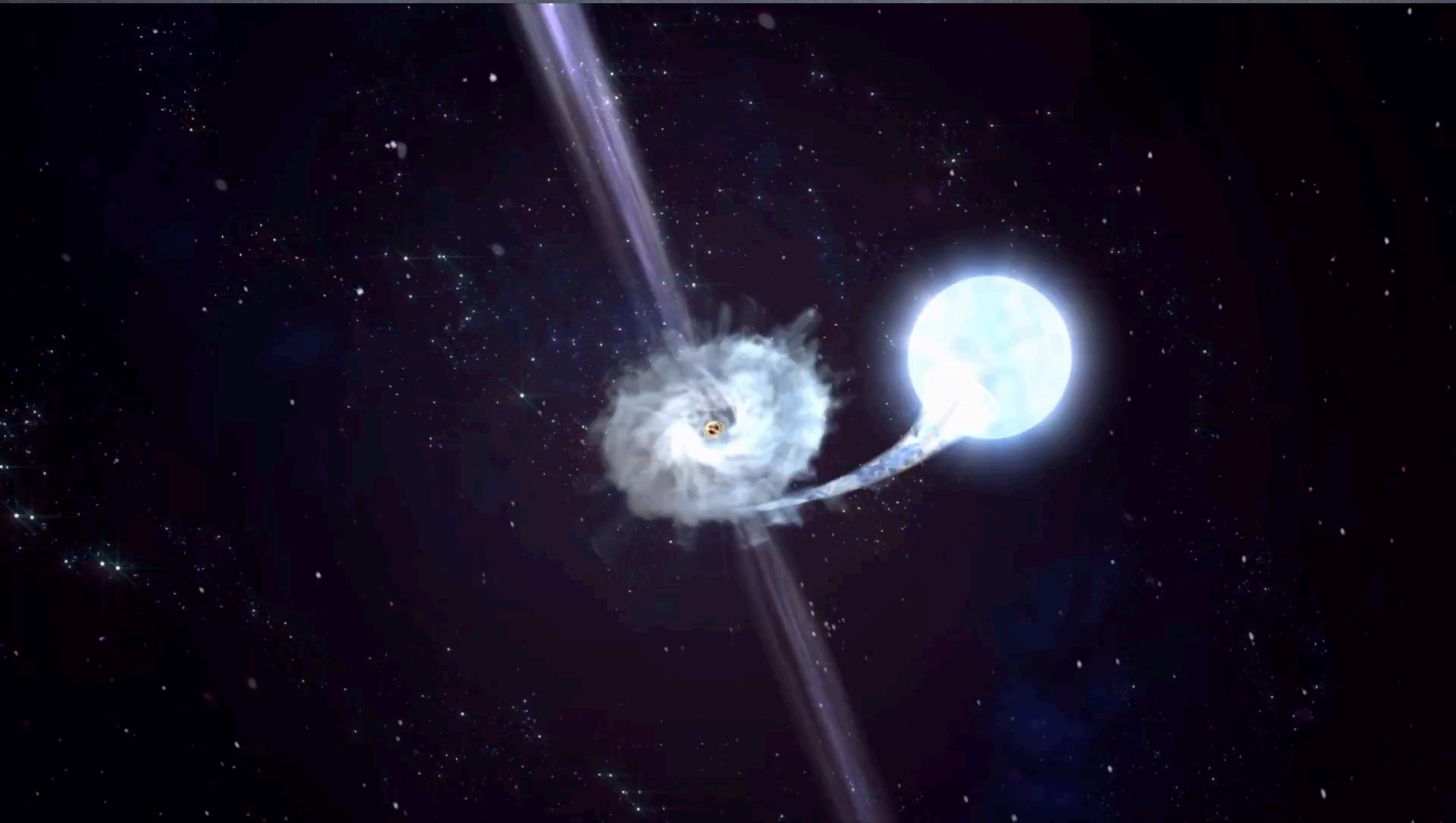
Байкальская вода прозрачна

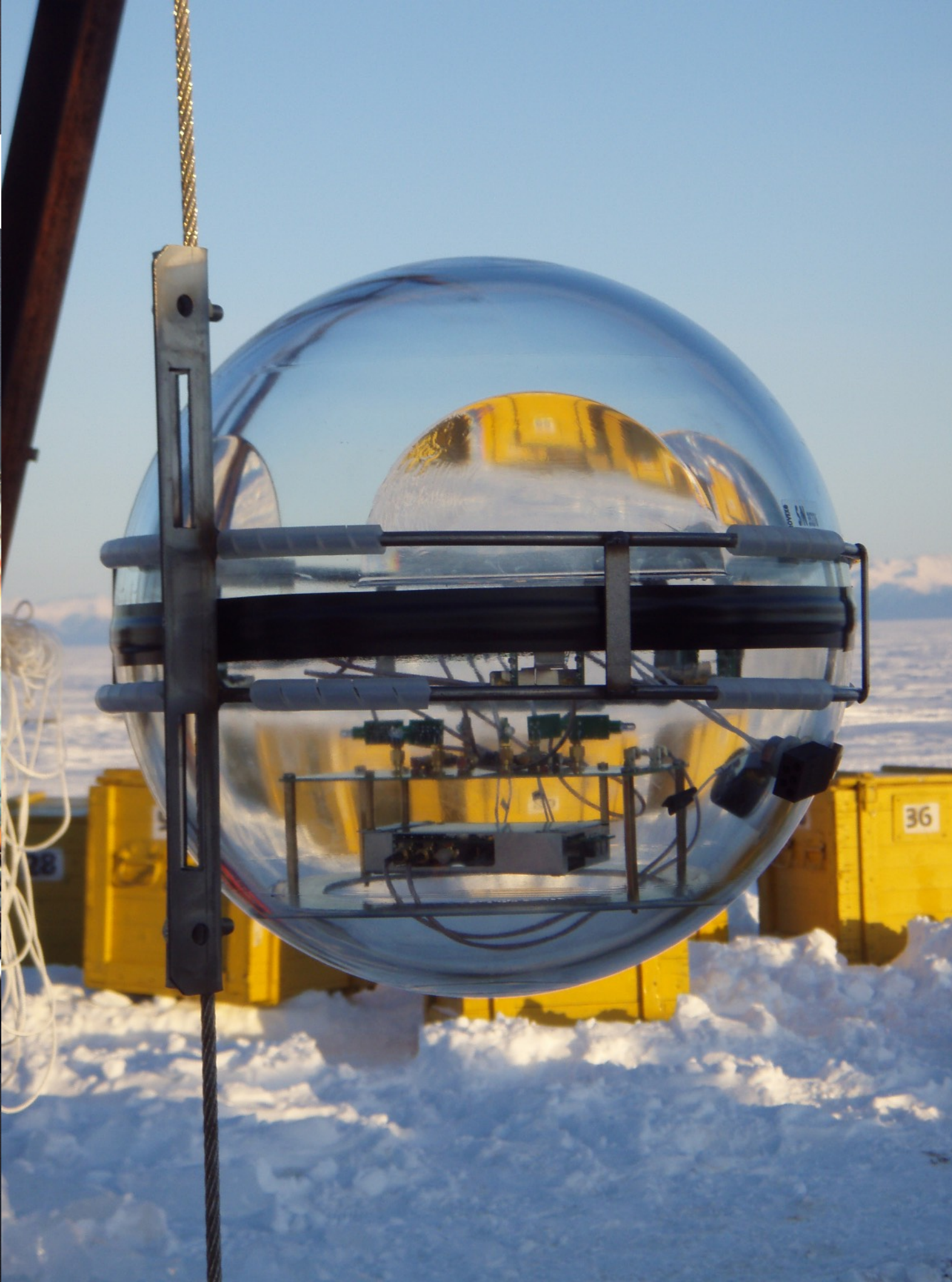


Почему Байкал?

- Нейтрино сверхвысоких энергий существуют.
- Их источники неизвестны. Угловое разрешение IceCube недостаточно
- Точность определения направления в Байкале лучше в 5-7 раз, чем в IceCube

Байкальский нейтринный телескоп

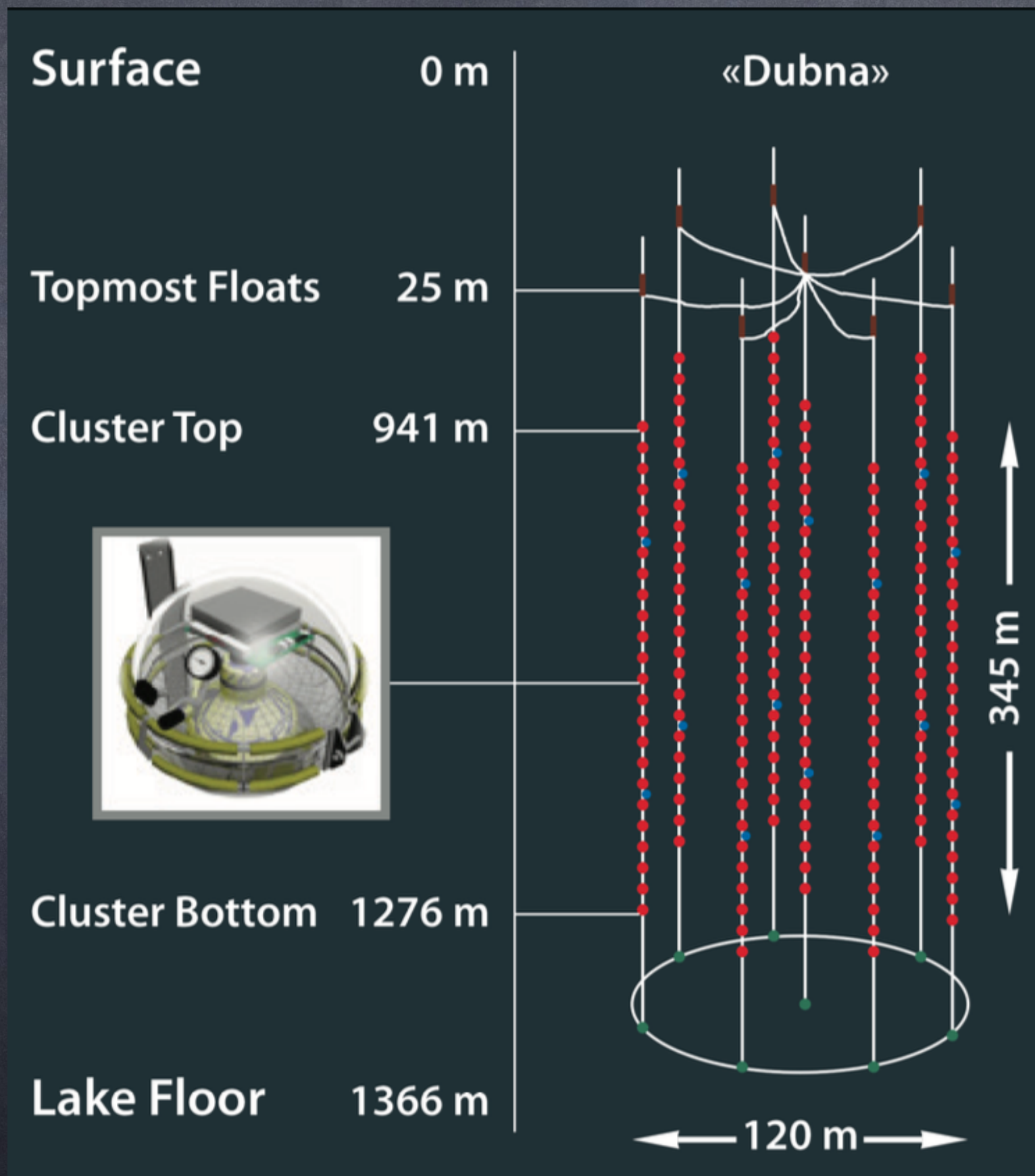




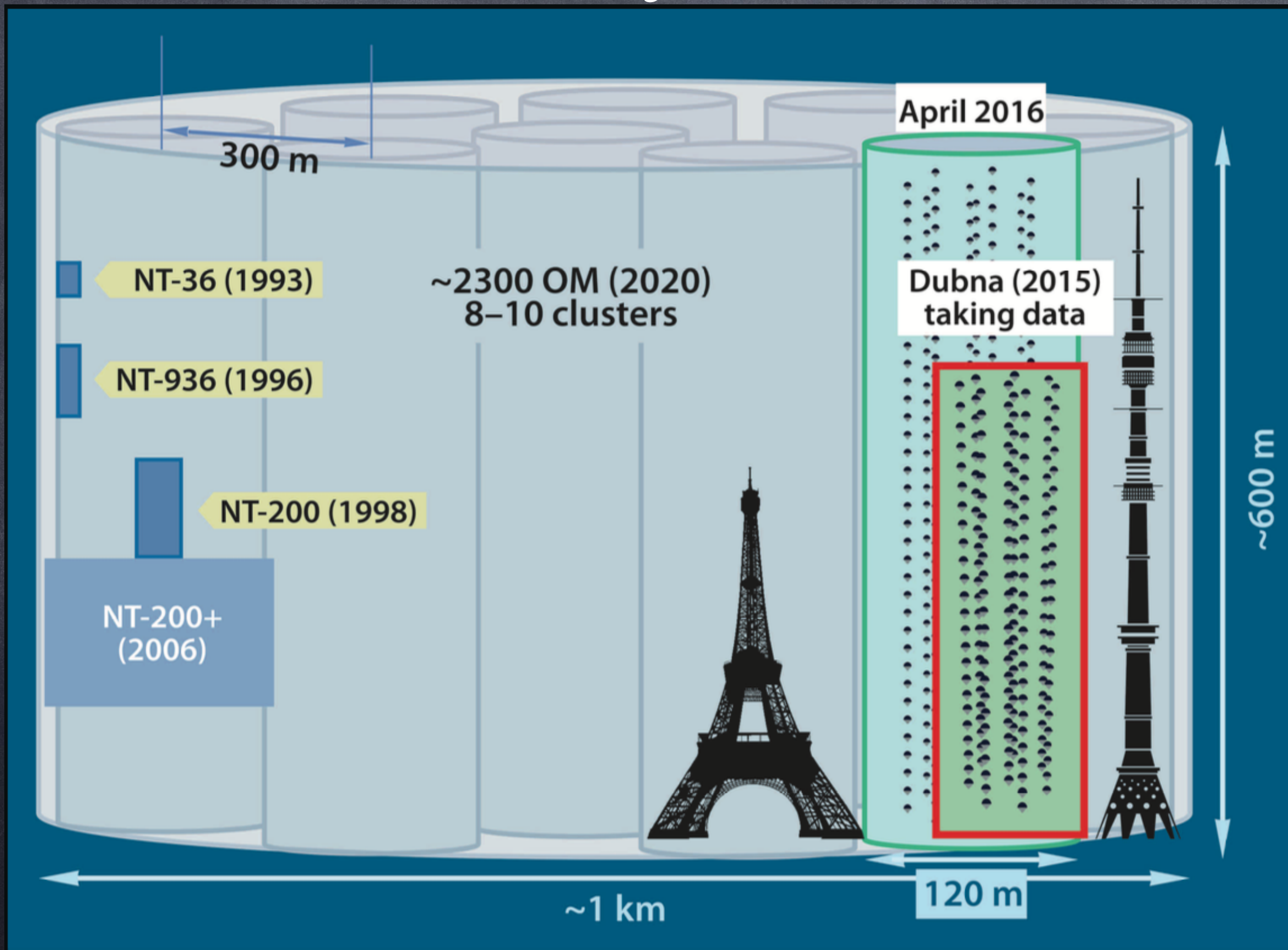
Зал сборки оптических модулей



Класстер



11 кластеров к 2021





ARUCANARI

SHORT FILMS

<https://youtu.be/mofwhUgGsJk>

Нерешенные загадки

- Загадка астрофизических нейтрино сверхвысоких энергий,
- Геонейтрино,
- Иерархия масс нейтрино,
- Нарушение CP-симметрии,
- Дирак или Майорана?

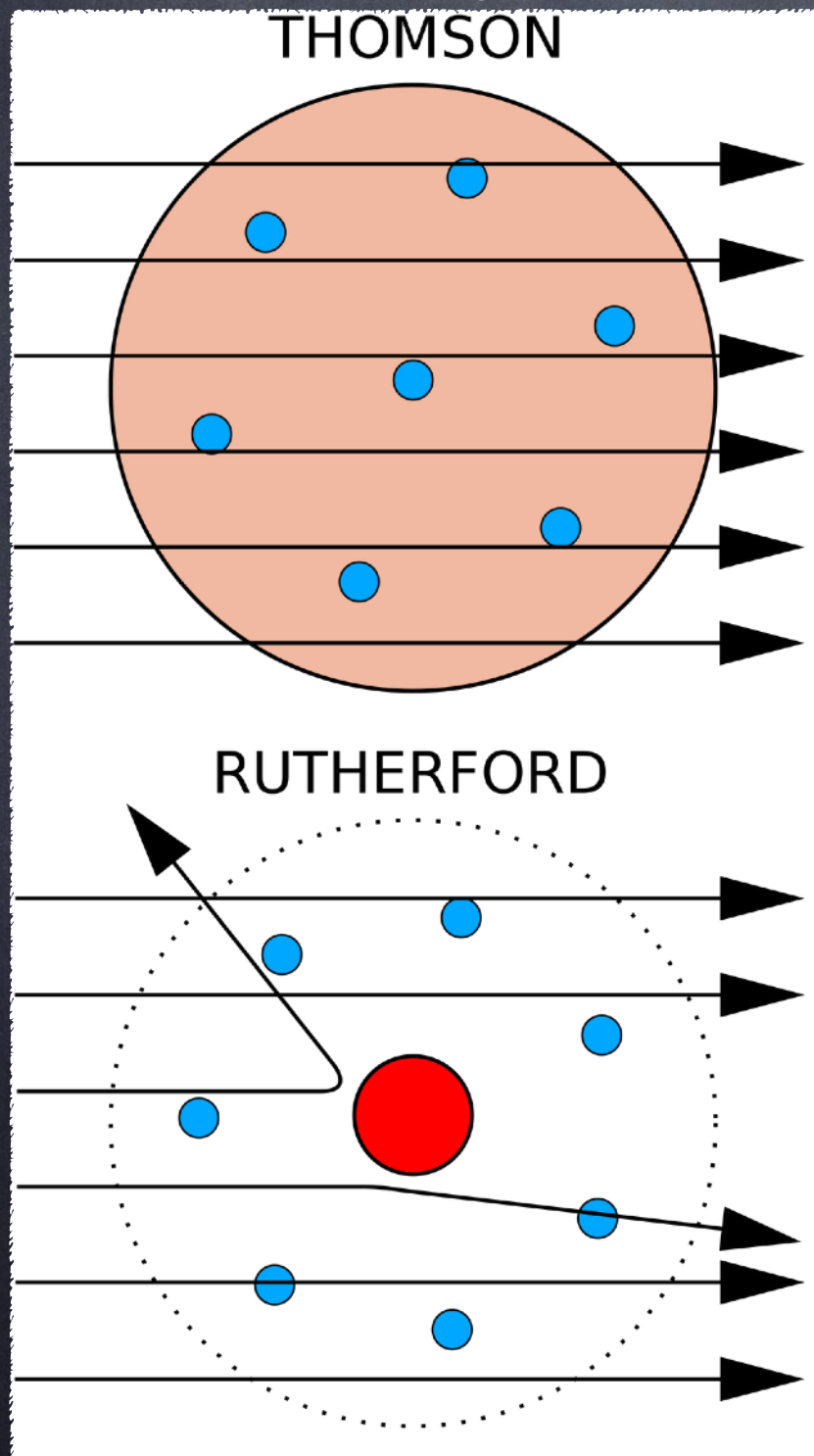
Мы работаем над разгадками

Благодарю Елену и Андрея Наумовых
за помощь в работе над этой лекцией

Подробности

Атом

- Положительно заряженное ядро в центре
- Электроны вокруг



- 1897. Томсон открыл электрон
- Томсон представлял атом как пудинг («+») с изюмом («-»)
- 1909. Резерфорд открыл, что положительный заряд находится в центре атома
- 1898. Вьен открыл протон
- 1920. Резерфорд постулировал, что ядро водорода — протон

Почему протоны держатся вместе в ядре?

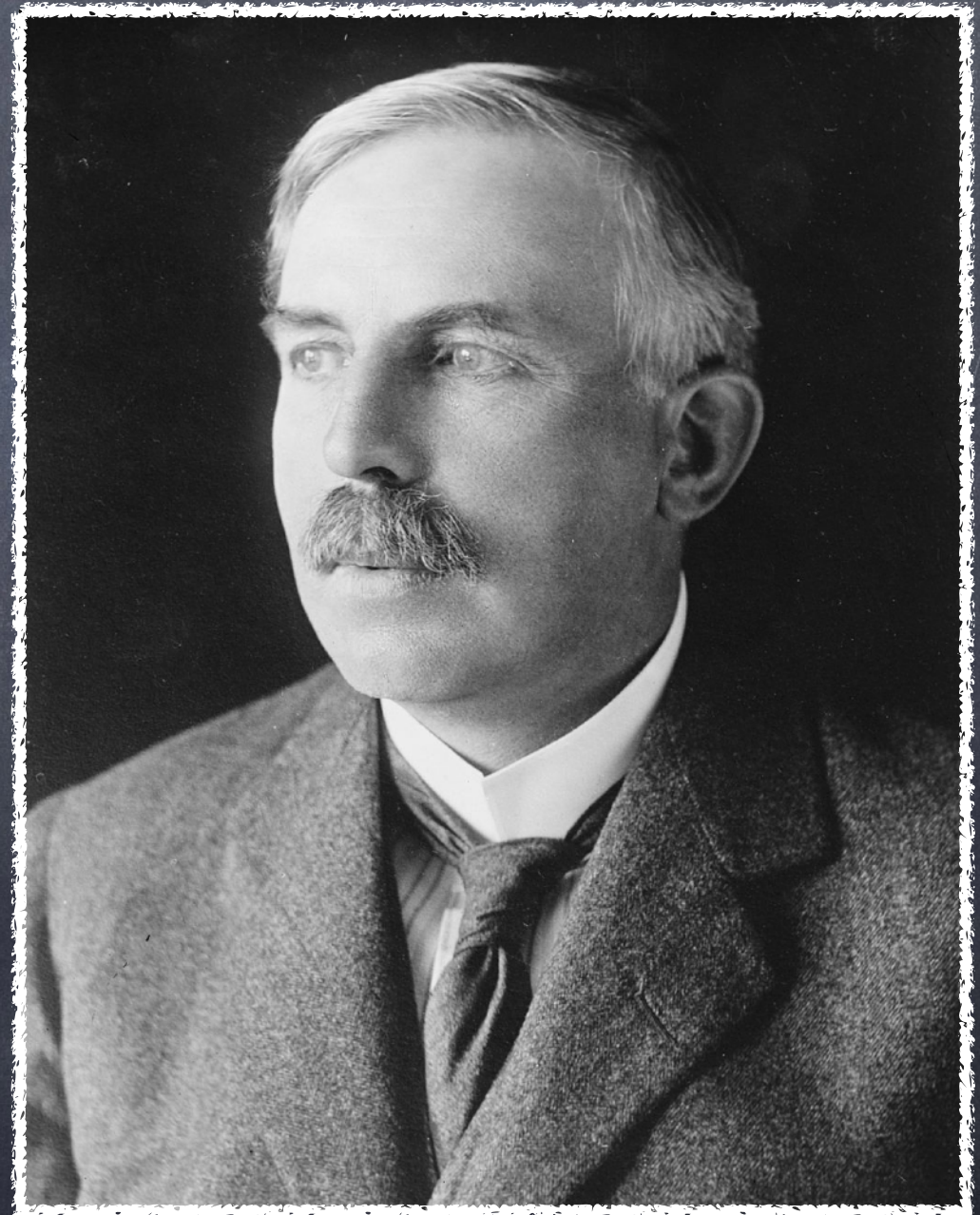
- Должны существовать взаимодействия, более сильные, чем отталкивание.
 - Это сильные взаимодействия.
- 1921. Резерфорд предположил существование в ядре нейтронов, для смягчения отталкивания протонов.

Нестабильно в мире...

- Древние философы считали атомы неделимыми и стабильными. Им так казалось правильно.
- На самом деле, некоторые ядра атомов оказались нестабильными
- 1896. А. Беккерель открыл радиоактивность урана.
- 1898. Пьер и Мария Кюри нашли еще два радиоактивных ядра - полоний и радий.
- 1903. А. Беккерель, Пьер и Мария Кюри награждены Нобелевской Премией.
- Атомистическая идея о неделимости атомов не выдержала экспериментальной проверки.

Эрнсти Резерфорд

- 1908. Нобелевская Премия по химии.
- Открыл радон.
- Сформулировал концепцию периода полураспада в радиоактивности.
- Открыл ядро в атоме
- Три его ученика стали нобелевскими лауреатами (Чэдвик, Кокрофт, Вольтон)



Ситуация на 1927 год: Энергия не сохраняется в бета- распадах ядер?!

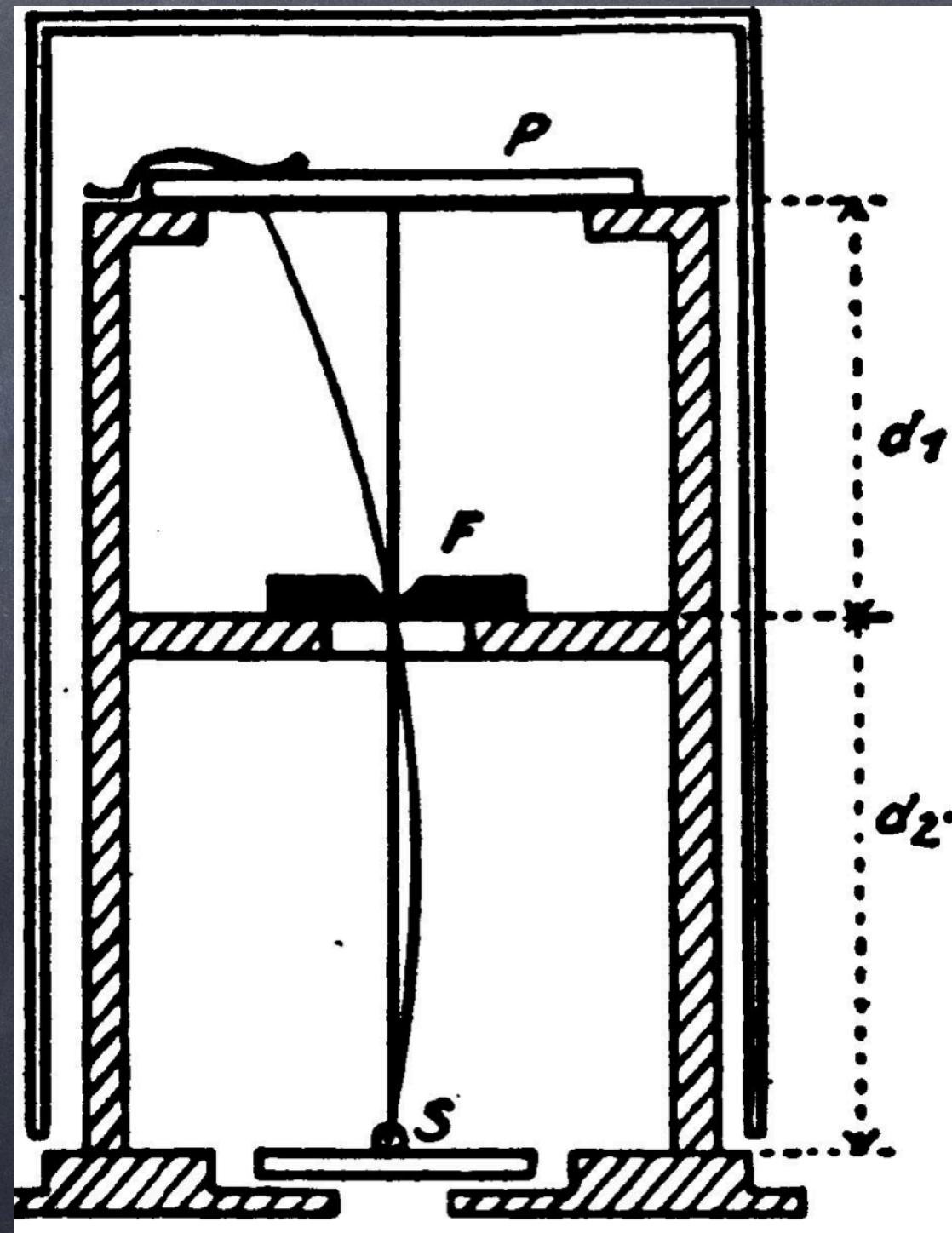
В бета-распадах, энергия бета-частицы варьировалась от нуля до миллионов эВ (МэВ).

- Но это признали не сразу.
- Когда признали - это был кризис. Энергия не сохраняется...

эВ = энергия, приобретаемая электроном, ускоренным напряжением 1 В.

Крайняя история несохранения энергии в бета-распадах ядер

- В 1911 Нани, Meitner, von Baeyer использовали радиоактивный источник (S), помещенный в магнитное поле.
- Бета-частицы той же энергии попадали в то же место на фотопластинке (P), проходя через окошко (F).
- Авторы заключили, что все бета-частицы из распада обладают одинаковой энергией, аналогично альфа и гамма-распадам.



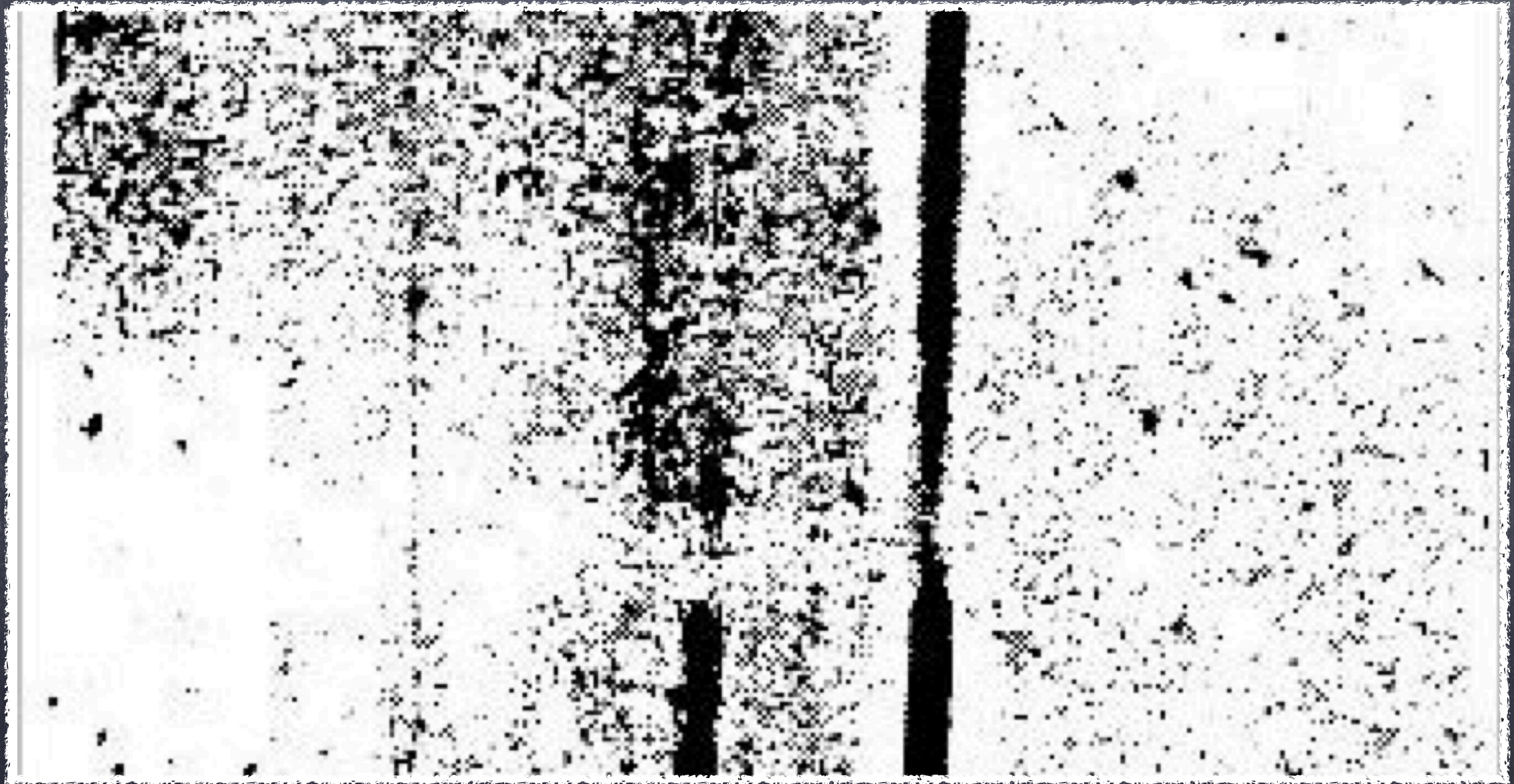
Крайняя история несохранения энергии в бета-распадах ядер

- Хапи и Meitner были очень авторитетными учеными
- В 1944 Хапи получил Нобелевскую Премию по химии «за его открытие развала тяжелых ядер».
- Meitner не получила НП в силу «...дисциплинарной предвзятости, политической тупости, невежества и поспешности» членов нобелевского комитета // Sime, Crawford, Walker (1997)



Хан и Мейтнер

Краткая история несохранения энергии в бета-распадах ядер



Фотография линии спектра бета-частиц, опубликованная Нии, Meitner, von Baeyer.

Краткая история несохранения энергии в бета-распадах ядер

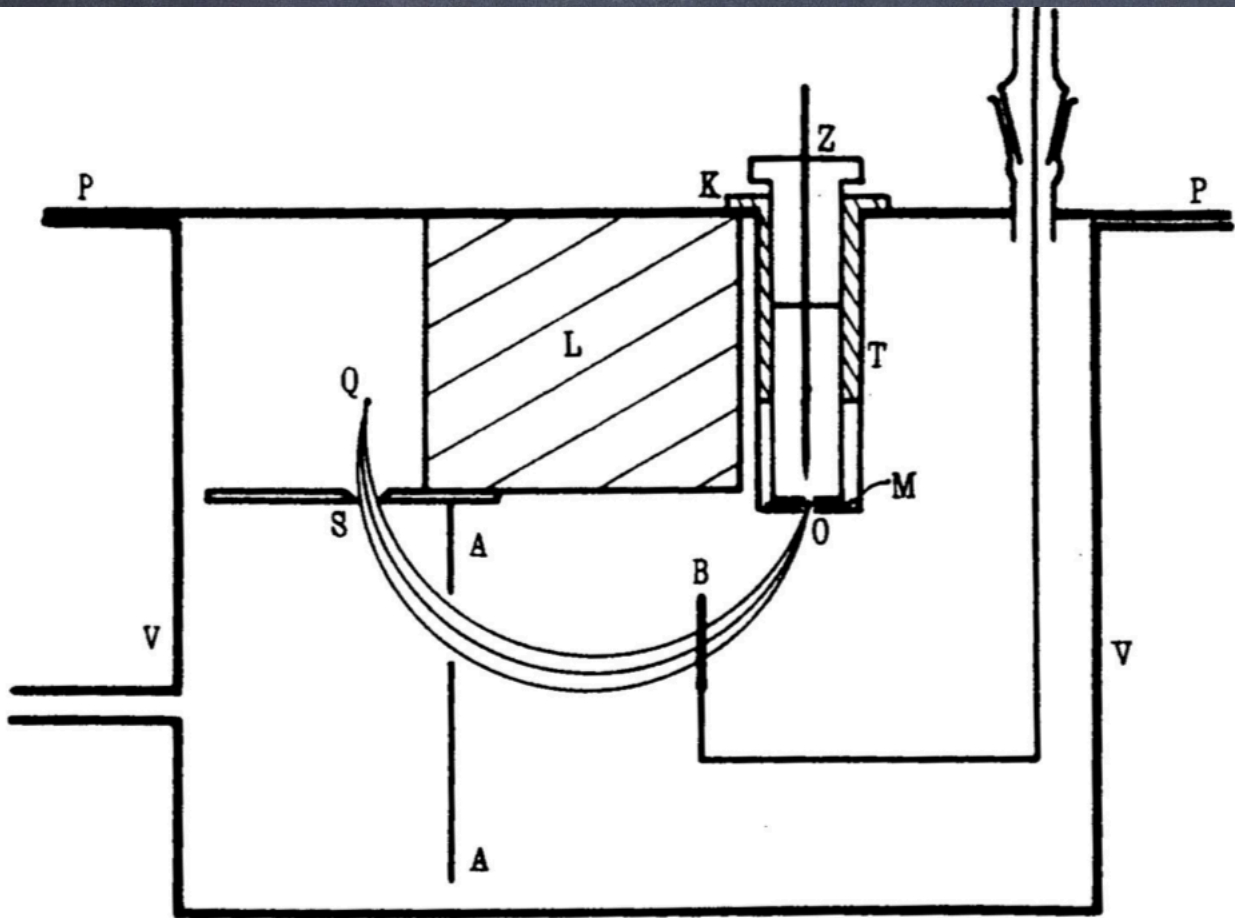


Джеймс Чэдвик
решил
измерить бета-
спектр

- 1911: Получил образование в Манчестере
- 1913: MSc под руководством Резерфорда
- 1913: Открыл непрерывность бета-спектра
- 1932: Открыл нейтрон
- 1935: Нобелевская Премия по физике
- 1941: MAUD Report
- 1943: Manhattan Project

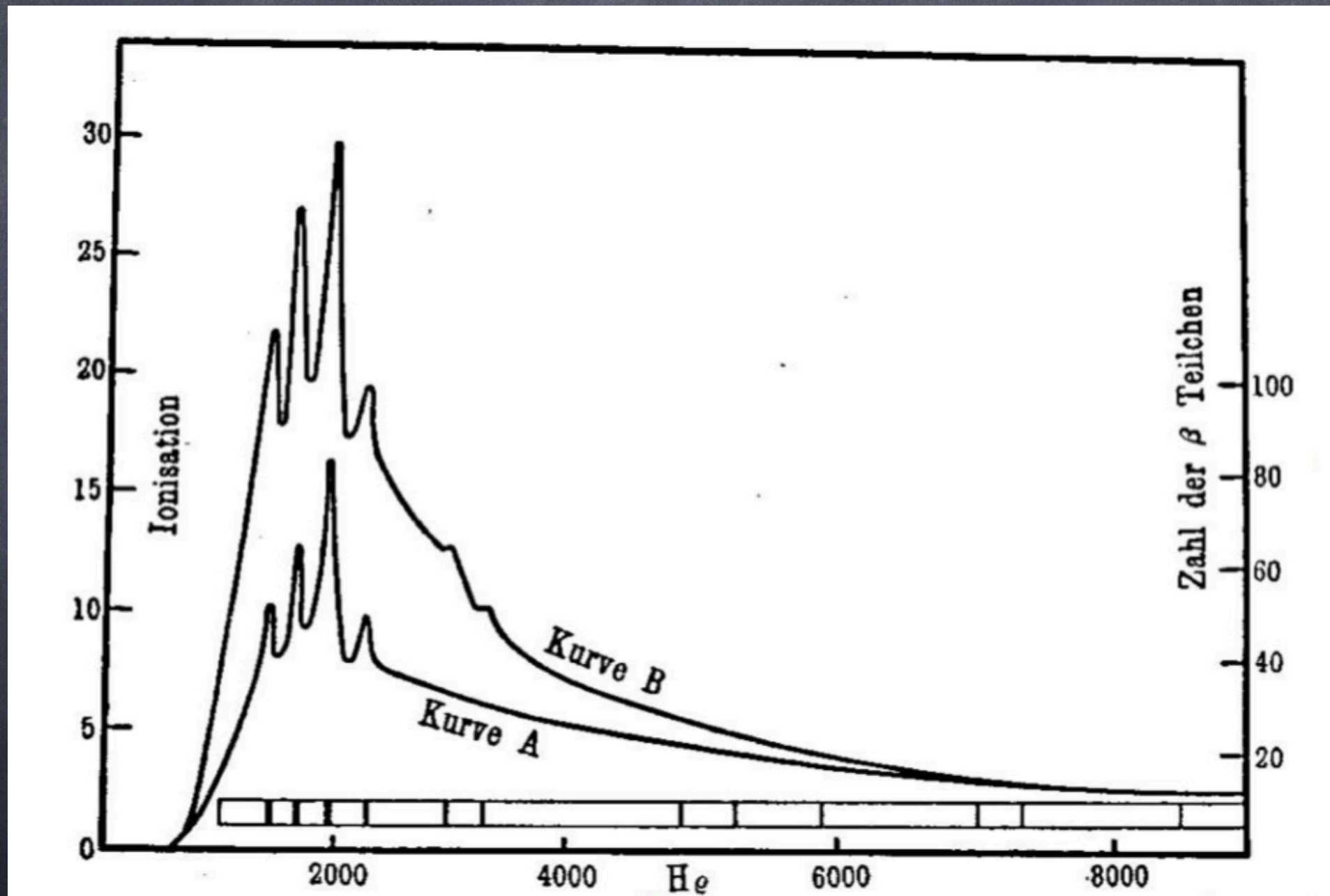
Крайняя история несохранения энергии в бета-распадах ядер

В 1914 Чэдвик, работающий в Берлине с Гейгером, пишет Резерфорду «Я получил фотографии довольно быстро и легко, но со счеичиком я не смог найти и намека на линию. Наверное, где-то глупая ошибка»



Прибор, использованный
Чэдвиком и Гейгером.
 Q = источник бета-
частиц
 O = детектор
(ионизационная камера
или счетчик Гейгера)

Краткая история несохранения энергии в бета-распадах ядер



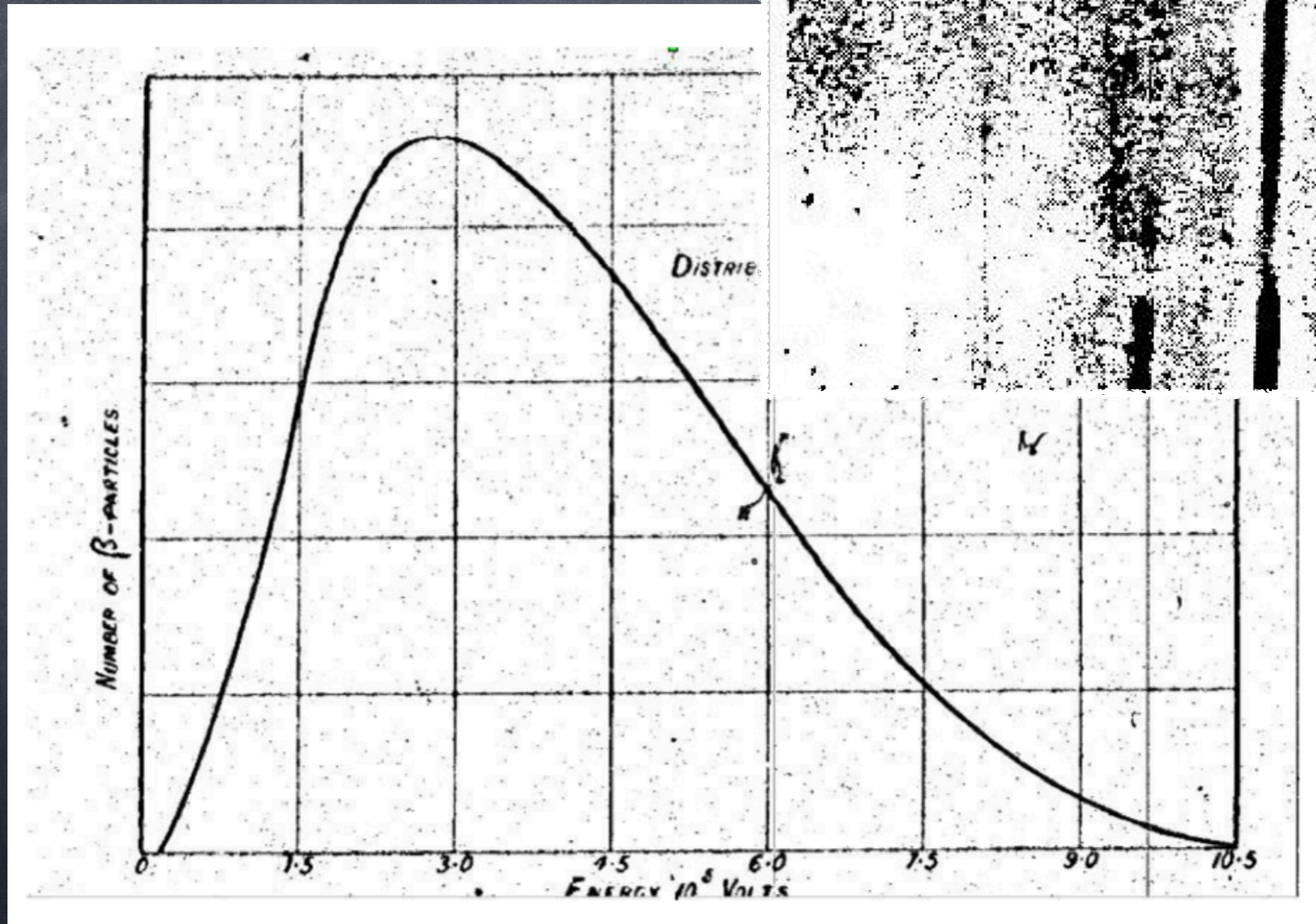
Измеренный спектр (1914)

Краткая история несохранения энергии в бета-распадах ядер

- Мейтнер привела возражения против результатов этого эксперимента.
- Чедвик с соавторами методично опровергал все возражения, ставя новые эксперименты.
- 15 лет спустя в 1929 Мейтнер согласилась

“Мы полностью воспроизвели ваши результаты. Сейчас мне кажется, что нет сомнений в том, что Вы были абсолютно правы.... Но я совершенно не понимаю этого результата”

Краткая история несохранения энергии в бета-распадах ядер



Измеренный спектр (1927)

Вольфганг Паули (1900-1958)

- Открыл новое квантовое число - спин (Крониг, Уленбек, Гудсмит). На его основе сформулировал принцип запрета Паули. Нобелевская Премия (1945).
- В письме 1930 года он предположил существование «нейтрона» для объяснения наблюдаемого бета-спектра.
- Один из создателей квантовой механики и квантовой теории поля.
- Был совестью физики.
- «Ах, Ландау, подумайте сами...»



Гипотеза из письма Паули решала две проблемы. I

- Спин ядра ^{14}N . Ядра считались состоящими из протонов и электронов. Ядро азота считалось состоящим из 14 протонов и 7 электронов, т.е. нечетного числа частиц со спином $1/2$ каждая, что предсказывало полуцелый спин ядра азота.
- Экспериментально спин ядра оказался целым числом.
- Паули предположил, что «нейтрон» тоже обладает полуцелым спином. Тогда ядро состояло бы только из протонов и нейтронов, без электронов. Проблема целого спина решалась бы так: 7 протонов и 7 «нейтронов».

Гипотеза из письма Паули решала две проблемы. II

- Непрерывный бета-спектр объяснялся тем, что «нейтрон» улетал при распаде невидимым, без взаимодействия.
- Масса «нейтрона» должна была бы не превышать 1% массы протона.
- Сумма энергий нейтрона и бета-частицы равняется разности энергий родительского и дочернего ядер.

Атомная катастрофа решается.
Закон сохранения энергии спасен.

Овации и фейерверки?

- Из гипотезы Паули следовало, что

$$E_e + E_n = E_0 = \text{const}$$

- следовательно,

$$E_e \leq E_0$$

- В то время, как несохранение энергии не предсказывало существования максимально возможной энергии электрона (бета-частицы)
- Эксперименты четко видели «обрезание» спектра

Овации и фейерверки? Ошнюдь...

- Тем не менее, гипотеза Паули не была популярной и общепризнанной.
- Нильс Бор на конференции в Риме предположил несохранение энергии на микро-уровне как наиболее естественное объяснение непрерывности бета-спектра.
- В заключительной речи, Дебай даже не упомянул гипотезу Паули.

Нужно открыть «нейтрон» Паули

В 1932 Чедвик открывает настоящий нейтрон, который тяжелее протона (Нобелевская Премия).

- Bothe & Becker бомбардируют бериллий альфа-частицами от распада полония и получают новую форму радиации. Чедвик понимает, что это его нейтрон, в существование которого он и Резерфорд всегда верили.
- Фредерик и Ирен Жолио-Кюри сумели выбить протоны из парафиновой вазы при помощи полония и бериллия как гамма-источника, как они считали.
- Резерфорд и Чедвик не согласны. Протон слишком тяжелый для этого.
- Э.Майорана пришел к тому же выводу: Жолио-Кюри открыли нейтрон, но не поняли этого. Э.Майорана не стал ничего публиковать.

Нужно открыть «нейтрон» Паули

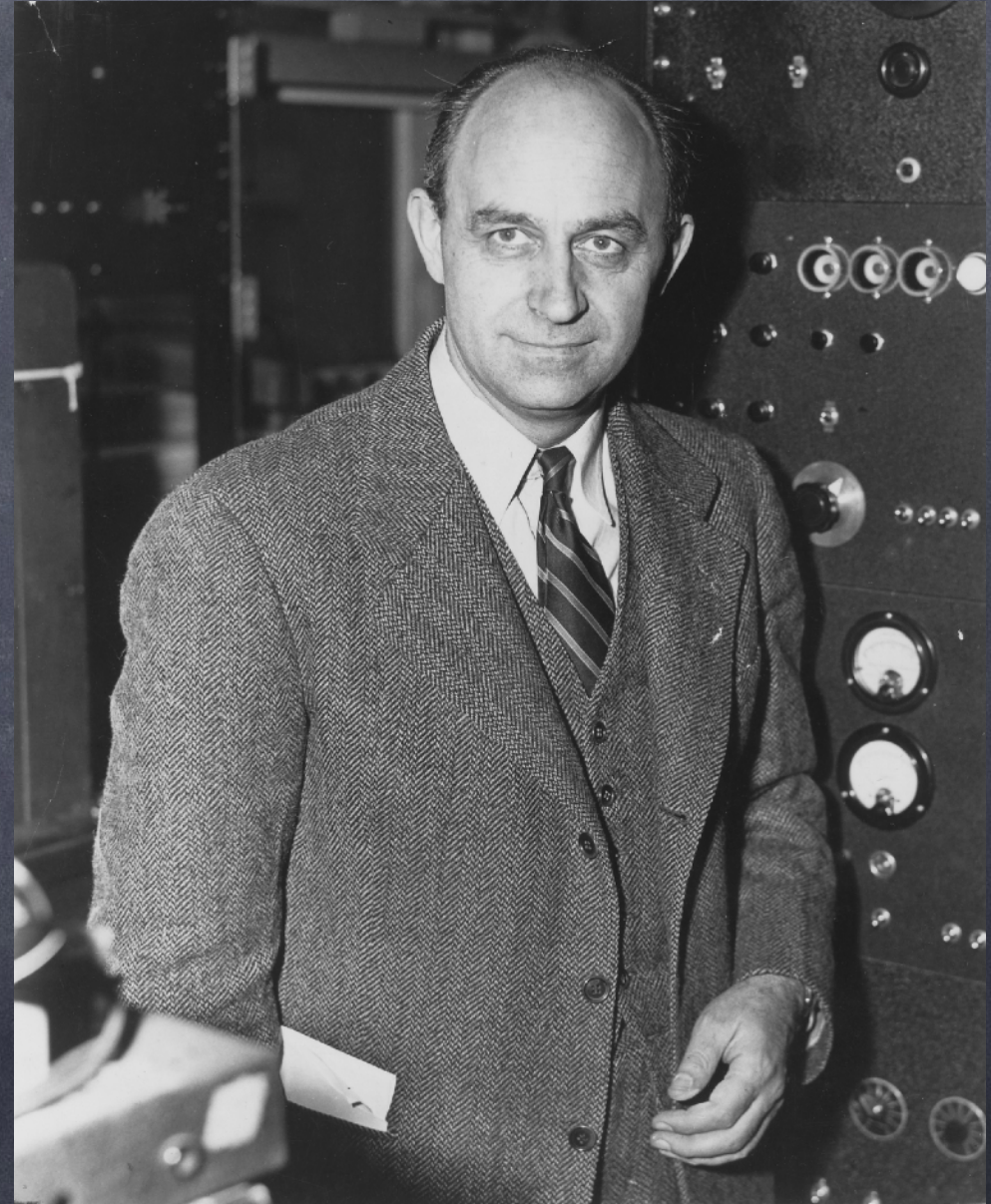
- Чедвик бросает все дела и за две недели экспериментов доказывает, что новая радиация это нейтрон (Nature, 1932).
- Нейтрон решает азотную катастрофу, но не сохранение энергии в бета-распаде.
- Нейтрон помогает понять структуру ядра и ядерных сил, открывая дорогу управлению ядерной энергией.

Где же нейтрино?!

- Энрико Ферми предлагает считать «нейтрон» Паули «маленьким нейтроном» или нейтрино (итал.)
- Он создает теорию бета-распада и отправляет статью в Nature.
- Ответ редакции, отклонившей статью как «абстрактные предположения, слишком далекие от реальности, чтобы быть интересными читателям» поверг его в шок и заставил бросить теоретическую физику.

Энрико Ферми

- Один из редких случаев великого теоретика и экспериментатора (14 патентов)
- Статистика Ферми-Дирака
- Золотое правило Ферми
- Теория слабых взаимодействий
- Нобелевская Премия за демонстрацию развалов ядер медленными нейтронами
- Манхэттенский Проект
- Само-поддерживающаяся ядерная реакция



Итак,

- Азотная катастрофа объясняется тем, что внутри ядра протоны и нейтроны
- Непрерывный бета-спектр объясняется тем, что нейтрон в ядре распадается на протон, электрон и (анти)нейтрино:

$$n \rightarrow p + e^{-} + \bar{\nu}_e$$

Сумма
энергий
постоянна

- Нужно доказать, что нейтрино существует.

В погоне за призраком

- «Я сделал ужасную вещь. Я предсказал частицу, которую будем невозможно обнаружить.»
В.Паули
- 1934: Пайерлс и Бете вычислили вероятность взаимодействия нейтрино с ядром.
- Они оценили, что нейтрино может с легкостью пройти сквозь Землю и заключили, что «не существует практического способа обнаружить нейтрино»

За дело берутся



Frederick Reines



Clyde Cowan

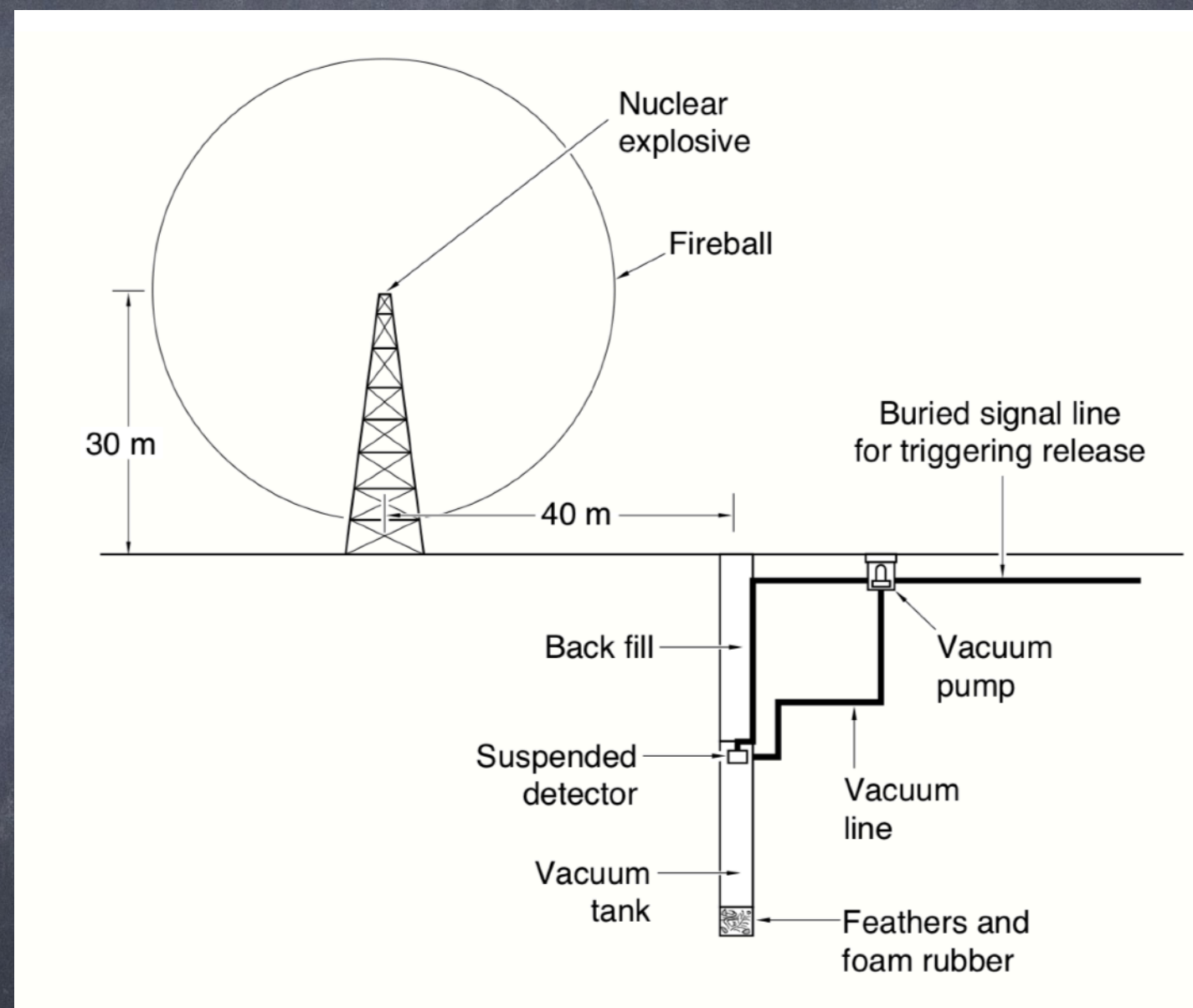
Идея дешифрирования нейтрино

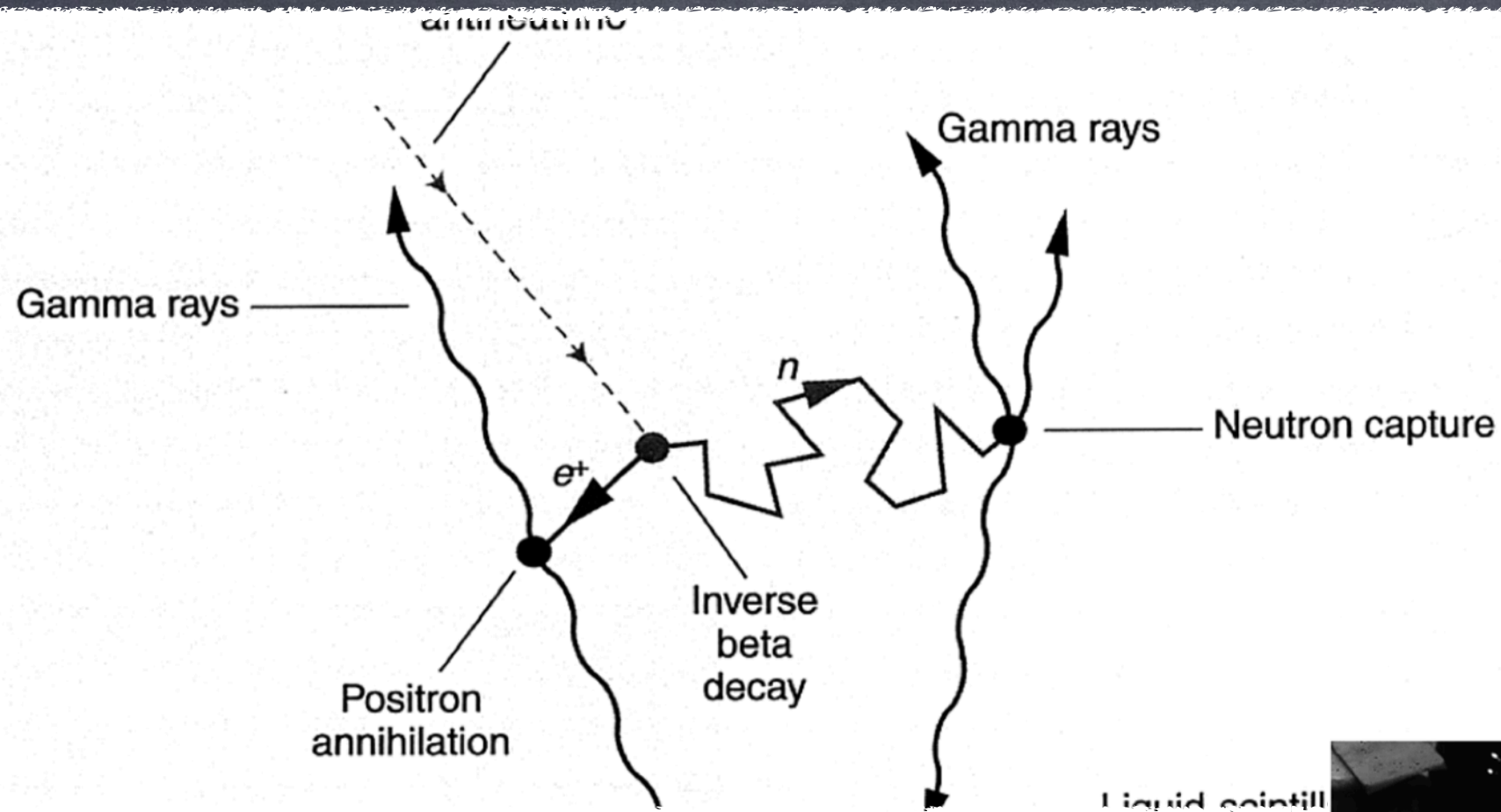
- Малую вероятность взаимодействия можно компенсировать огромным числом нейтрино от интенсивного источника.
- Какие источники нейтрино имели в виду Райнс и Коэн?
 - Взрыв атомной бомбы.
 - 20 кт бомба на высоте 30 метров взрывается
 - Детектор падает в момент взрыва и мягко приземляется на глубине 40 м от места взрыва
 - Масса детектора около тонны.

- Они получили разрешение на взрыв (!) и начали работы по копанию шахты

- В ходе работы они поняли, что можно вместо атомной бомбы использовать ядерный реактор.

- Другой инновационной идеей было использование сцинтилляционного детектора и регистрации сигнала от позитрона и нейтрона

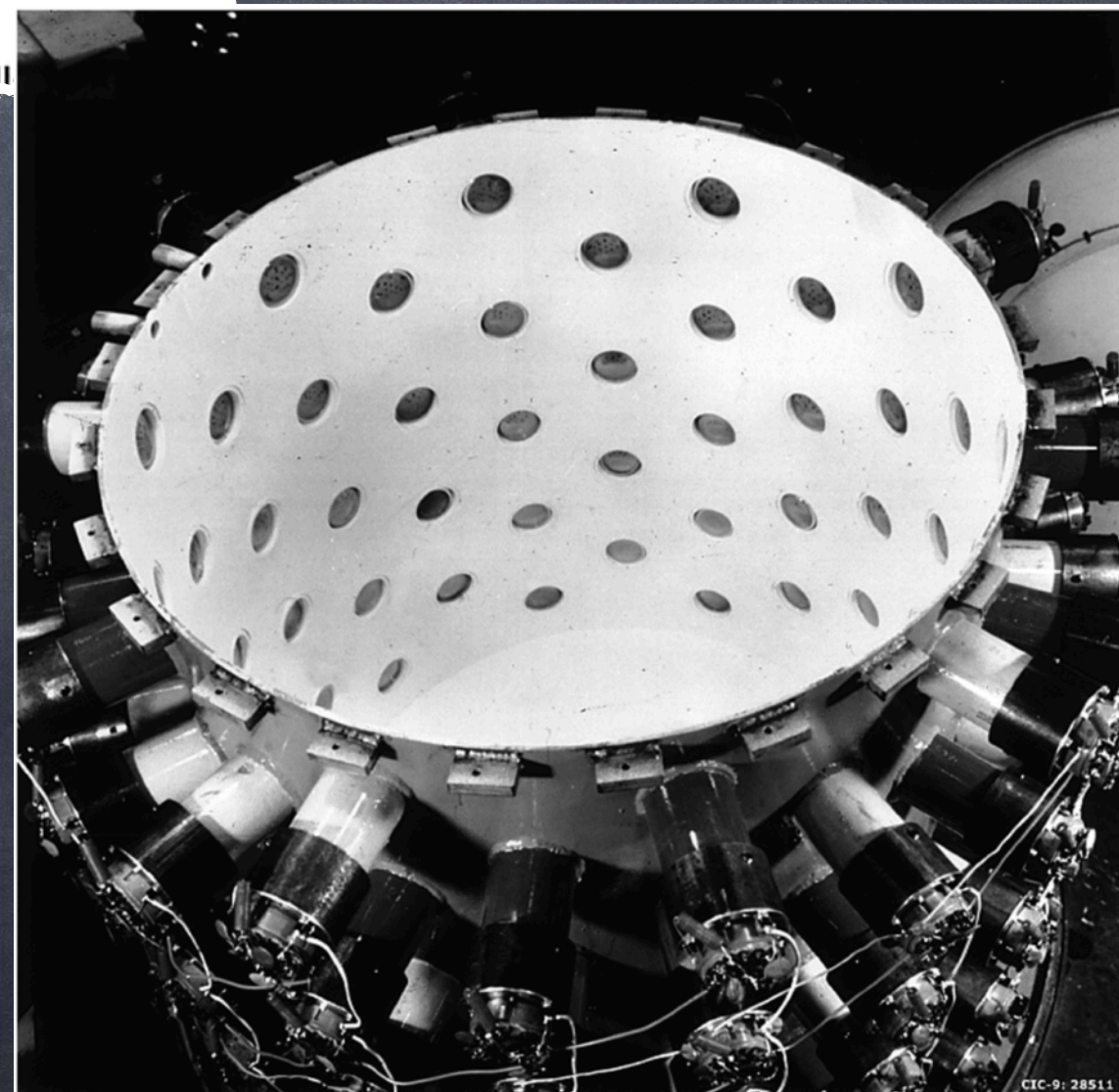




Hanford



- 1953: Измерена скорость счета 25 ± 12 событий в час
- Пресса возбуждена
- Райнс и Коэн считают, что результаты пока не убедительны



14 июня 1956 Reines & Cowan телеграфируют
Паули:

«Мы счастливы проинформировать Вас, что мы
определенно обнаружили нейтринно от развалов
ядер, наблюдая обратные бета-распады
протонов.»

Известны четыре вида взаимодействия:

Гравитационное

(1)

Слабое

(10^{25})

Электромагнитное

(10^{36})

Сильное

(10^{38})

} Оценка для
взаимодействий
протонов

Нейтрино - нейтральная частица, участвующая в слабых и гравитационных взаимодействиях

Нейтрино обладает массой, примерно в 10^5 меньше массы электрона

Существует три типа нейтрино ν_e, ν_μ, ν_τ