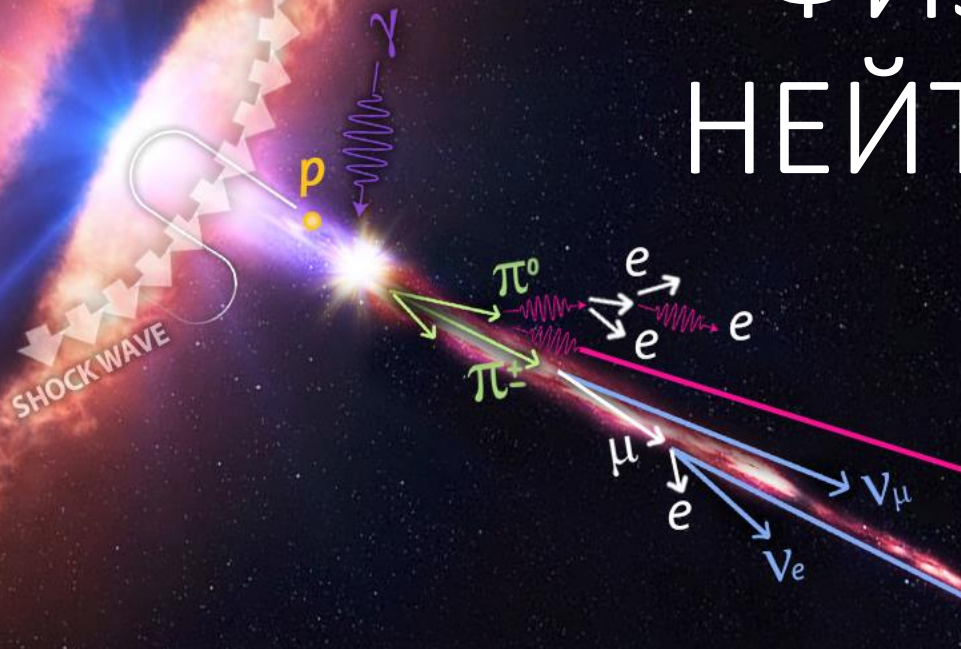


ФИЗИКА НЕЙТРИНО



Марк Ширченко, ОИЯИ

Солвеевский конгресс - 1927



1-й ряд (слева направо): [Ирвинг Ленгмюр](#), [Макс Планк](#), [Мария Кюри](#), [Хенрик Лоренц](#), [Альберт Эйнштейн](#), [Поль Ланжевен](#), [Шарль Гюи](#), [Чарльз Вильсон](#), [Оуэн Ричардсон](#).

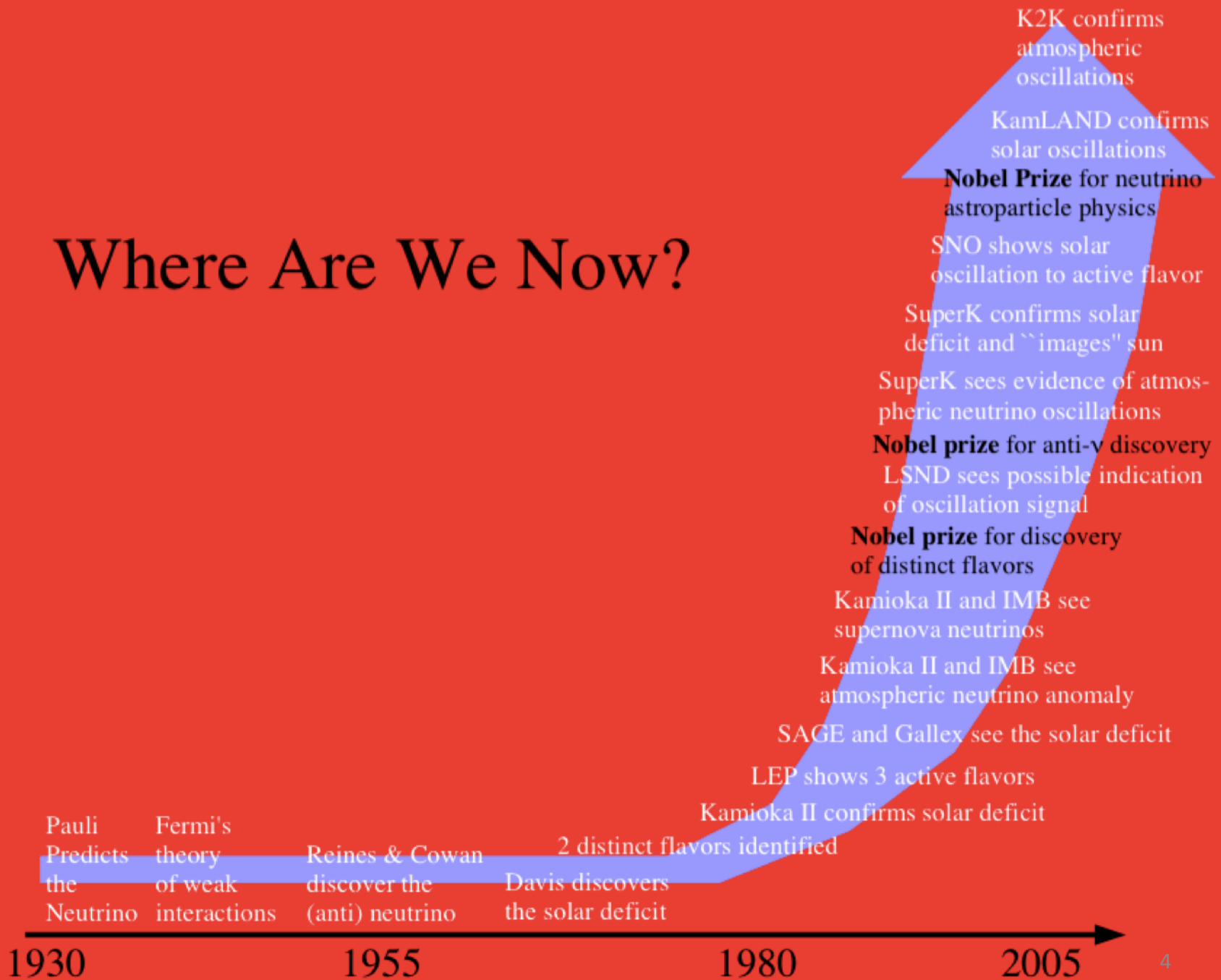
2-й ряд (слева направо): [Петер Дебай](#), [Мартин Кнудсен](#), [Уильям Брэгг](#), [Хендрик Крамерс](#), [Поль Дирак](#), [Артур Комптон](#), [Луи де Бройль](#), [Макс Борн](#), [Нильс Бор](#).


Стоят (слева направо): [Огюст Пикар](#), [Эмиль Анрио](#), [Пауль Эренфест](#), [Эдуард Герцен](#), [Теофил де Дондер](#), [Эрвин Шрёдингер](#), [Жюль Эмиль Вершафельт](#), [Вольфганг Паули](#), [Вернер Гейзенберг](#), [Ральф Фаулер](#), [Леон Бриллюэн](#)

Нейтрино – 2018



Where Are We Now?



The image features three stylized, dark purple, rounded neutrino particles with simple, smiling faces. Each particle is labeled with a Greek letter nu and a subscript: the top one is ν_τ (tau neutrino), the bottom-left one is ν_μ (muon neutrino), and the bottom-right one is ν_e (electron neutrino). The particles are set against a dark, irregularly shaped background that resembles a cloud or a splash of dark purple ink.

*Нейтрино – это, пожалуй, не только самая
распространенная частица во Вселенной,*

но и самая загадочная.

Неуловимая частица

- Во Вселенной
на 1 атом приходится 1 000 000 000 нейтрино
- Через наши тела проходит
100 000 000 000 000 (100 трлн.) нейтрино в сутки
- За всю жизнь с нашим телом взаимодействует
1 нейтрино

Как её изучать?..

По взаимодействию.
с другими частицами

Без нейтрино мы бы
не существовали

Может рассказать нам
о Большом Взрыве

Возможно объясняет
отсутствие
антиматерии во
Вселенной

...и зачем?

История нейтрино – история открытий

- 1988 – Открытие μ -нейтрино
(L.M. Lederman, M. Schwartz, J. Steinberger)
"for the [neutrino](#) beam method and the demonstration of the [doublet](#) structure of the [leptons](#) through the discovery of the [muon neutrino](#)"
- 1995 – Открытие нейтрино
(F. Reines)
"for the detection of the [neutrino](#)" and "for pioneering experimental contributions to [lepton](#) physics"
- 2002 – Изучение космических нейтрино
(R. Davis Jr, M. Koshiba)
"for pioneering contributions to [astrophysics](#), in particular for the detection of cosmic [neutrinos](#)"
- 2015 – Открытие нейтринных осцилляций
(T. Kajita, A.B. McDonald)
"for the discovery of [neutrino oscillations](#), which shows that neutrinos have mass"



«Если во Вселенной происходит что-нибудь по-настоящему интересное, в этом обычно замешаны нейтрино...»

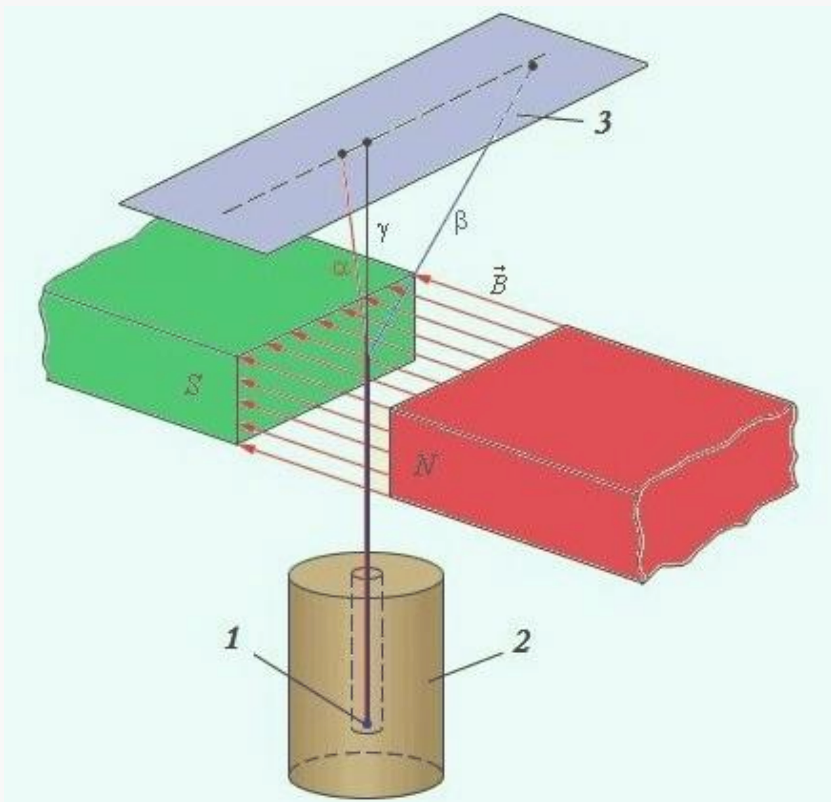
История...



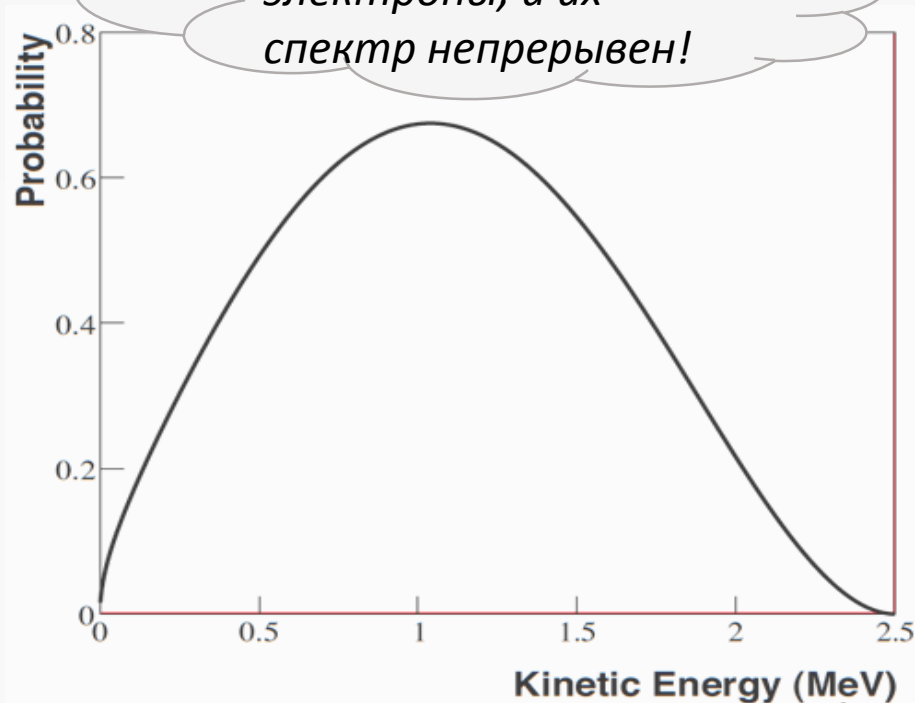
Ernest Rutherford и Paul Villard
 α -, β -, γ - лучи



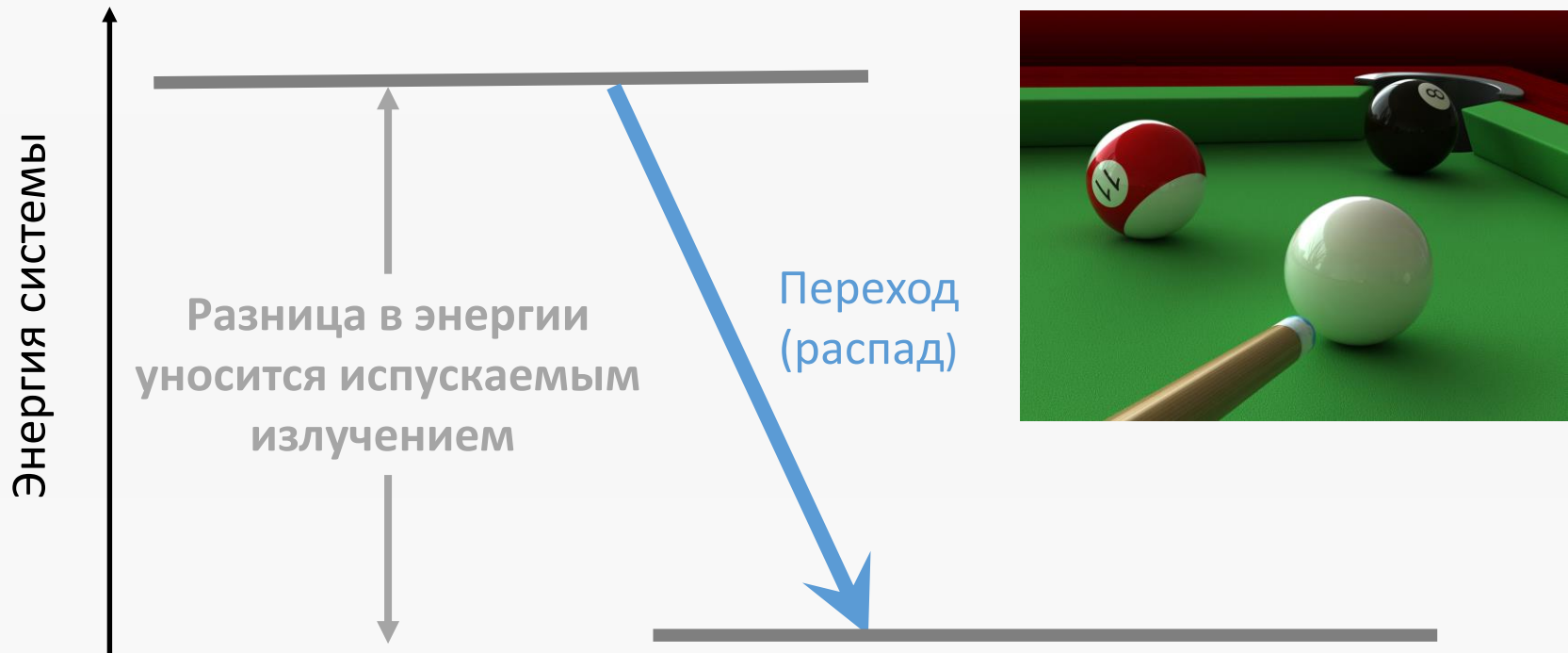
Sir James Chadwick



β -лучи – это электроны, и их спектр непрерывен!



Сохранение энергии – основа основ физики



И это излучение должно иметь вполне определенную фиксированную энергию

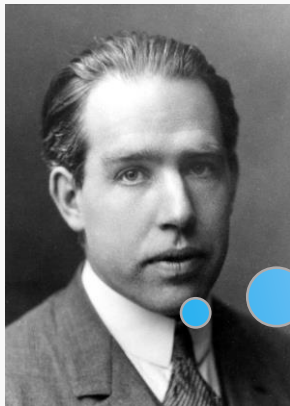
Если β -спектр непрерывен – значит энергия исчезает?..

Кража века!!!
Куда смотрит пр

Начало XX века.

Революция в физике.

Появились новые явления и понятия, которые не укладывались в привычные рамки классической науки.



Можно утверждать, что мы не обладаем никакими аргументами, как теоретическими, так и эмпирическими, в пользу соблюдения закона сохранения энергии и в случае бета-распада; более того, попытки трактовать бета-распад в контексте этого закона вызывают многочисленные осложнения

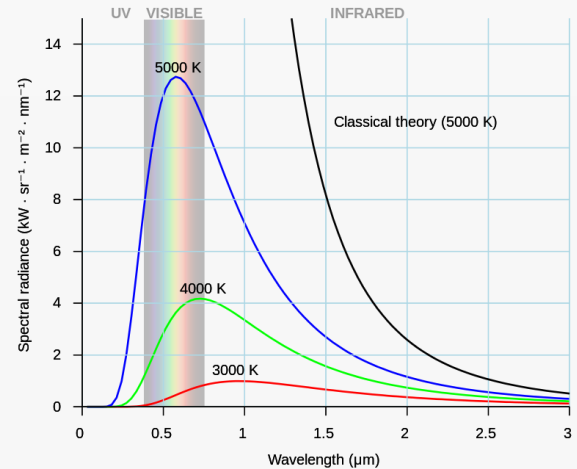
«Маленькие» проблемы классической физики

- Спектр излучения абсолютно чёрного тела

$$r(\nu, T) = \frac{2\pi\nu^2}{c^2} kT$$

- Фотоэффект

максимальная кинетическая энергия вырываемых светом электронов возрастает с частотой света и не зависит от его интенсивности



- Неинвариантность уравнений Максвелла по отношению к преобразованиям Галлилея

Теория относительности

Спец. Теория Относительности (1905)

$$E = mc^2 \quad v < c$$

Сложение скоростей

Релятивистское замедление времени

Относительность одновременности событий

Сокращение размеров

Albert Einstein



Общая Теория Относительности (1921)

Гравитация – это искривление пространства-времени, связанное с присутствием массы-энергии

Гравитационное замедление времени

«То, что рассказал нам профессор Эйнштейн, не так уж глупо, как может показаться на первый взгляд»

Паули

ФОТОНЫ



Max Planck

Электромагнитная энергия
излучается
квантами
 $e = h\nu$

Кванты действия (1900)

Нобелевская премия
1918

Не только
излучение, но и
поглощение света
Происходит
квантами..

Фотоэффект (1905)



Albert Einstein

Нобелевская премия
1921

Квантовая механика

Квантовая механика (рамки применения - ?)

Квантование углового момента электрона. Модель атома



Erwin Schrödinger
Paul Dirac



Niels Bohr

Всякий, кто не был шокирован квантовой механикой, просто её не понял

Нобелевская премия
1933

Нобелевская премия
1922



Friedrich Hund

Туннельный эффект



George Gamov

Соотношение неопределённости (1927)

$$(\Delta x \Delta p) > h / 4\pi$$

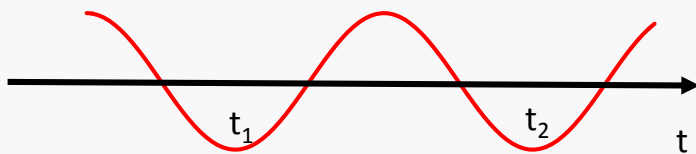
$$p = mv; \quad v = (AB) / t$$

A _____ B

Где – в точке A или в точке B???
то есть, $\Delta x > AB$

$$(\Delta t \Delta E) > h / 4\pi$$

$$E = h\nu; \quad \nu = (\text{число периодов}) / (t_2 - t_1)$$



Когда – в момент t_1 или в момент t_2 ???
то есть, $\Delta t > (t_2 - t_1)$



Werner Karl Heisenberg

Нобелевская премия
1932

Корпускулярно-волновой дуализм

Если свету
(электромагнитной волне)
присущи корпускулярные
свойства ($\epsilon = h\nu$, $p = \epsilon / c$),
то почему бы и частице с
импульсом p не иметь
свойств волны с частотой ν
?...

1927 г.: обнаружена дифракция электронов,
т.е., явление сугубо волновое



Louis-Victor-Pierre-Raymond,
7ème duc de Broglie,
Louis de Broglie

Нобелевская премия
1929

Главное письмо физики нейтрино

Original - Publication of Dec. 1933
Abschrift/15.12.33 **FM**

Offener Brief an die Gruppe der Radioaktiven bei der
Gesellschafts-Tagung zu Tübingen.

Abschrift

Physikalisches Institut
der Eidg. Technischen Hochschule
Zürich

Zürich, 4. Dez. 1930
Gloriastrasse

Liebe Radioaktive Damen und Herren,

Wie der Ueubarbringer dieser Zeilen, den ich halbvollst
anzuhören bitte, Ihnen das näheren auseinandersetzen wird, bin ich
angesichts der "falschen" Statistik der β - und Li-6 Kerne, sowie
des kontinuierlichen β -Spektrums auf einen verwirrenden Ausweg
verfallen um den "Wechselatz" (1) der Statistik und den Energiesatz
zu retten. Nämlich die Möglichkeit, es könnten elektrisch neutrale
Teilchen, die ich Neutronen nennen will, in den Kernen existieren,
welche den Spin $1/2$ haben und das Ausschliessungsprinzip befolgen und
sich von Lichtquanten ausserdem noch dadurch unterscheiden, dass sie
nicht mit Lichtgeschwindigkeit laufen. Die Masse der Neutronen
wäre von derselben Grössenordnung wie die Elektronenmasse sein und
jedenfalls nicht grösser als $0,01$ Protonenmasse. Das kontinuierliche
 β -Spektrum wäre dann verständlich unter der Annahme, dass beim
 β -Zerfall mit dem Elektron jeweils noch ein Neutron emittiert
wird, derart, dass die Summe der Energien von Neutron und Elektron
konstant ist.



Wolfgang Ernst Pauli

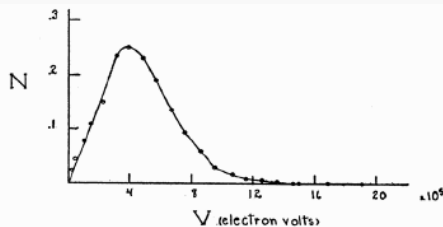
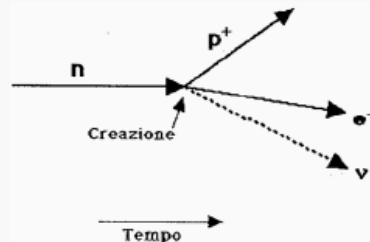
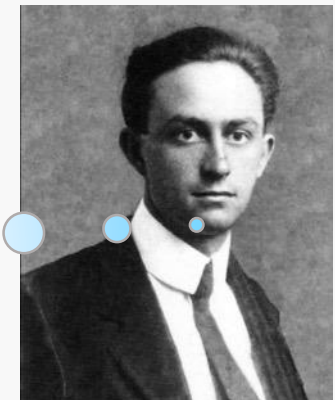


Fig. 5. Energy distribution curve of the beta-rays.



«Нейтрино»
=
«Нейтрончик»



Enrico Fermi

Постулировав существование нейтрино, Паули признался в письме своему другу астроному Вальтеру Бааде:

*Я сделал сегодня что-то ужасное.
Физику-теоретика никогда не
следует делать этого.
Я предложил нечто, что
никогда нельзя будет проверить
экспериментально.*



... и поспорил с ним на бутылку шампанского, что при их жизни такого точно не случится.

Скептицизм

В настоящее время физики-ядерщики много пишут о гипотетических частицах, называемых “нейтрино”, стремясь таким образом объяснить некоторые неясные факты, наблюдаемые при бета-распаде... Я не слишком высокого мнения о теории нейтрино. Можно сказать, я просто не верю в существование этих частиц... Осмелюсь утверждать, что у физиков-экспериментаторов наверняка хватило бы изобретательности, чтобы получить эти нейтрино...



Arthur Eddington

Как поймать нейтрино?

Многие годы нейтрино оставалось лишь сугубо гипотетическим объектом. Затем стало вообще не до него, но после войны появились идеи...



litvinov.net

– Г-голубчики, – сказал Федор Симеонович озадаченно, разобравшись в почерках. – Это же п-проблема Бен Б-бецалеля. К-калиостро же доказал, что она н-не имеет р-решения.

– Мы сами знаем, что она не имеет решения, – сказал Хунта, немедленно ощетиниваясь. – Мы хотим знать, как ее решать.



litvinov.net

Причина «неуловимости» нейтрино –
чрезвычайно малая вероятность
его взаимодействия с веществом.

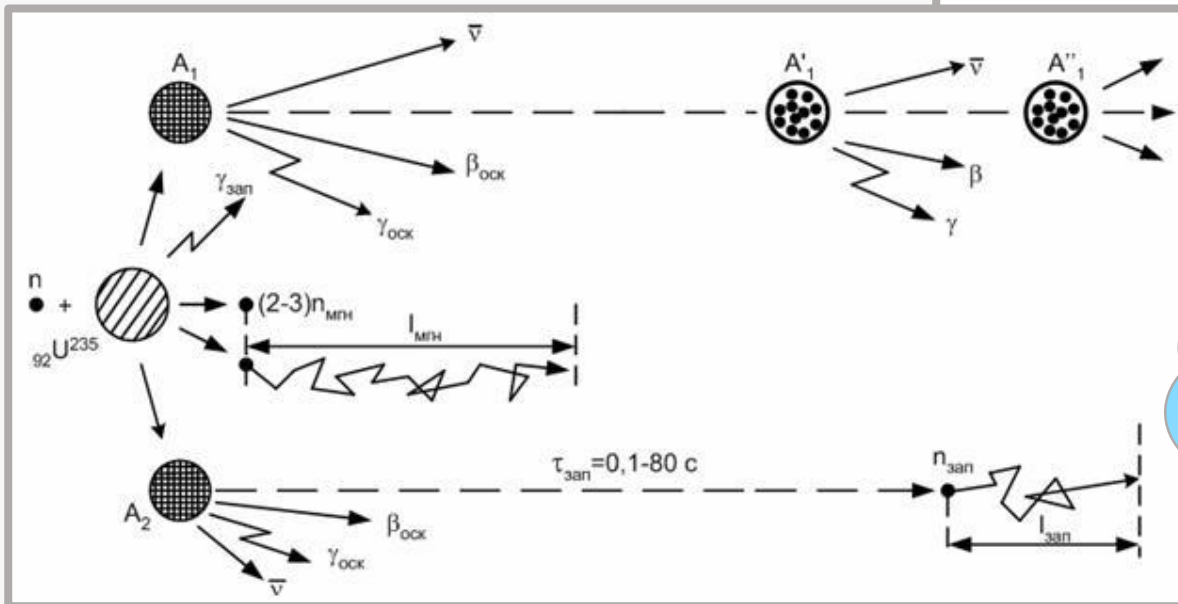
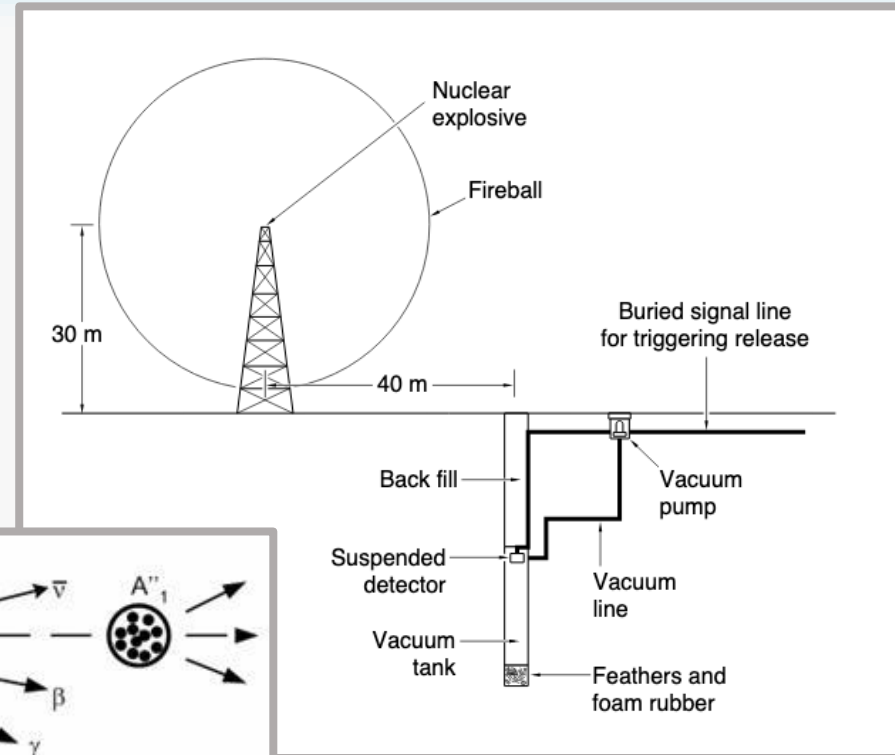
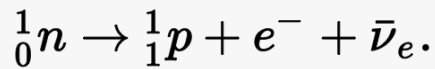
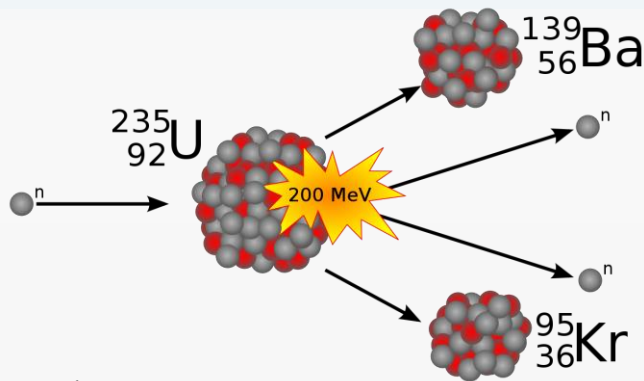
Пробег **α -частиц** в веществе – это микроны,
 β -частиц – миллиметры,
 γ -лучей – сантиметры и десятки сантиметров.

Каков, по-вашему, пробег нейтрино с типичной энергией 1 МэВ в воде?

100 световых лет!!!

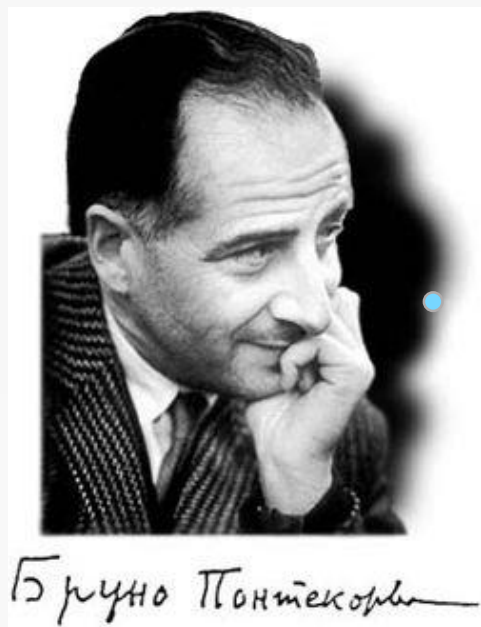
Нужны очень интенсивные источники
и очень большие низкофоновые
детекторы

Ядерный взрыв как источник нейтрино

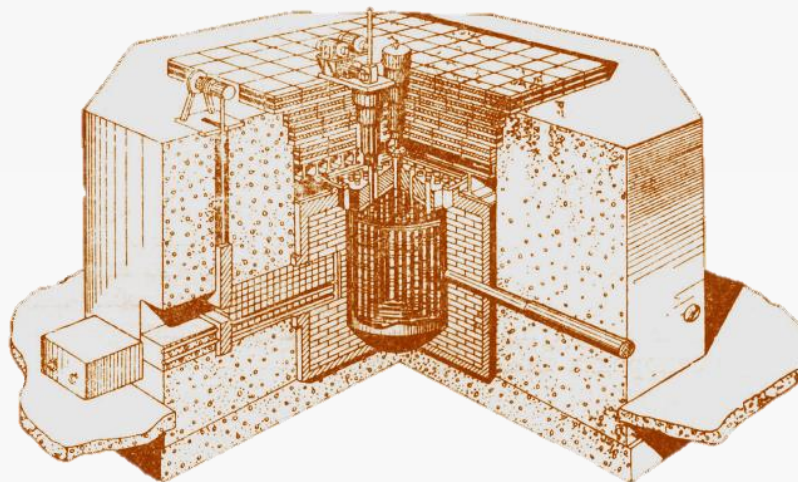


“Life was much simpler in those days—no lengthy proposals or complex review committees.”

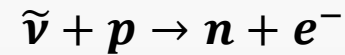
Ядерный реактор



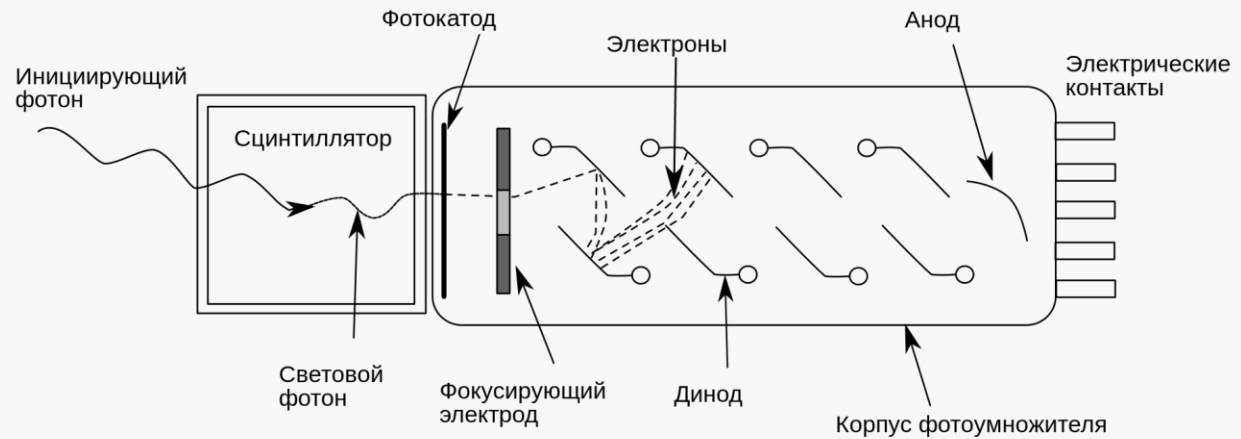
ядерный реактор – хороший
источник антинейтрино
(ON / OFF) => эффект / фон
(1950)



Райнес и Коуэн



Почему мы так хотели зарегистрировать нейтрино?
Потому что нас убеждали, что это невозможно!





THE UNIVERSITY OF CHICAGO
CHICAGO 37 · ILLINOIS
INSTITUTE FOR NUCLEAR STUDIES

October 8, 1952

Dr. Fred Reines
Los Alamos Scientific Laboratory
P.O. Box 1663
Los Alamos, New Mexico

Dear Fred:

Thank you for your letter of October 4th by Clyde Cowan and yourself. I was very much interested in your new plan for the detection of the neutrino. Certainly your new method should be much simpler to carry out and have the great advantage that the measurement can be repeated any number of times. I shall be very interested in seeing how your 10 cubic foot scintillation counter is going to work, but I do not know of any reason why it should not.

Good luck.

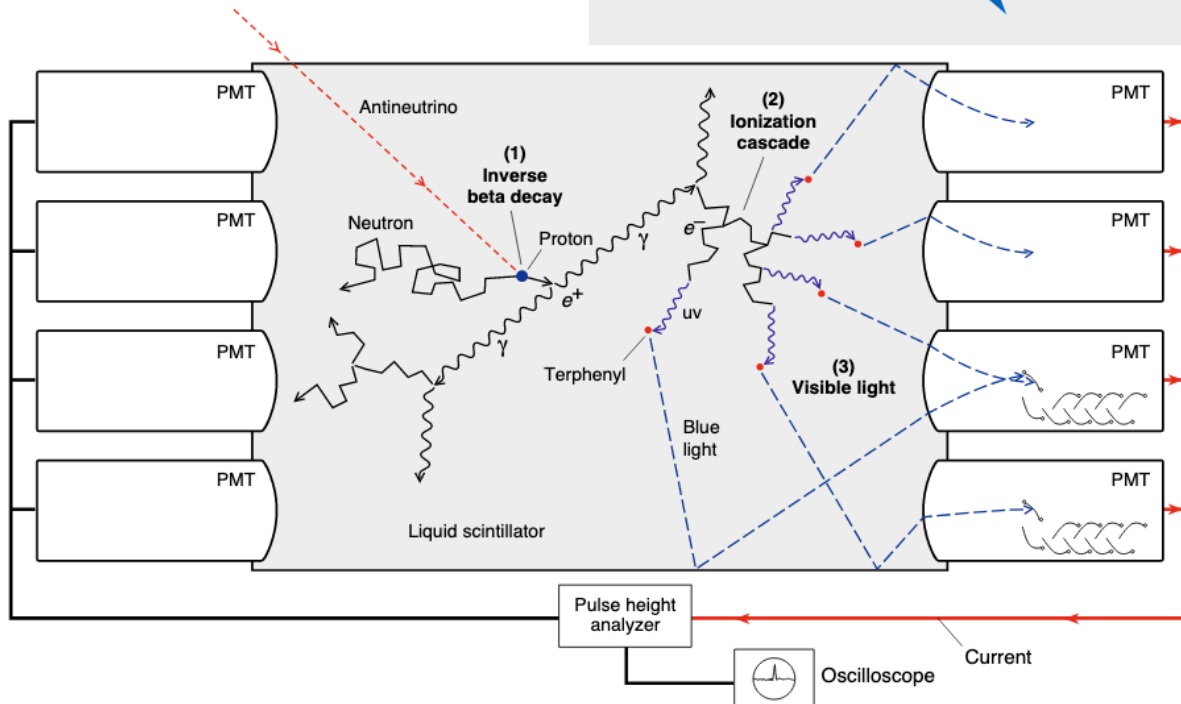
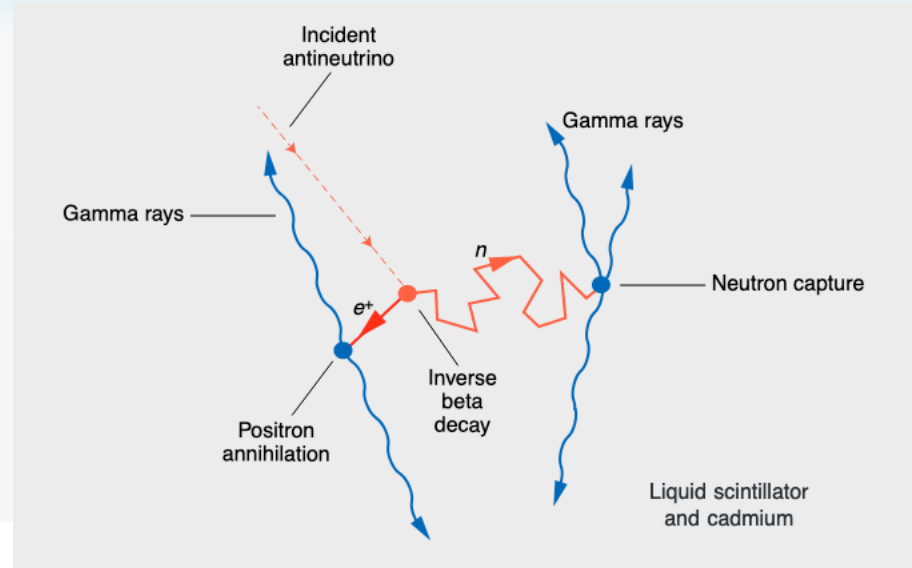
Sincerely yours,

A handwritten signature of Enrico Fermi in cursive script, written in dark ink.

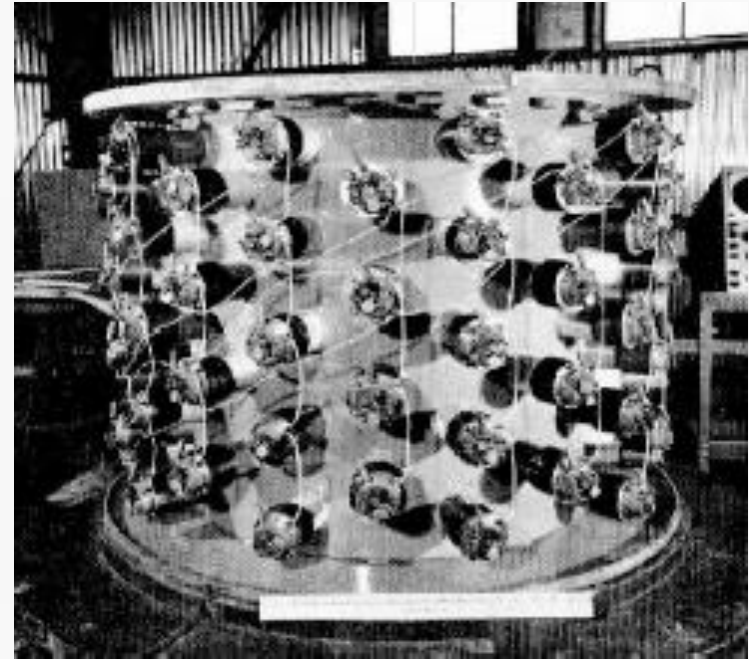
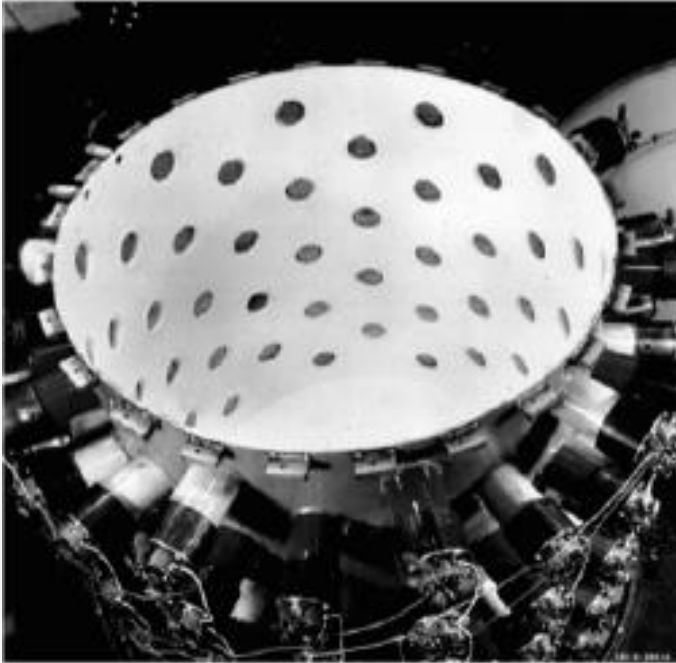
Enrico Fermi

EF:vr

Проект Poltergeist (1953)



Хэнфордский эксперимент

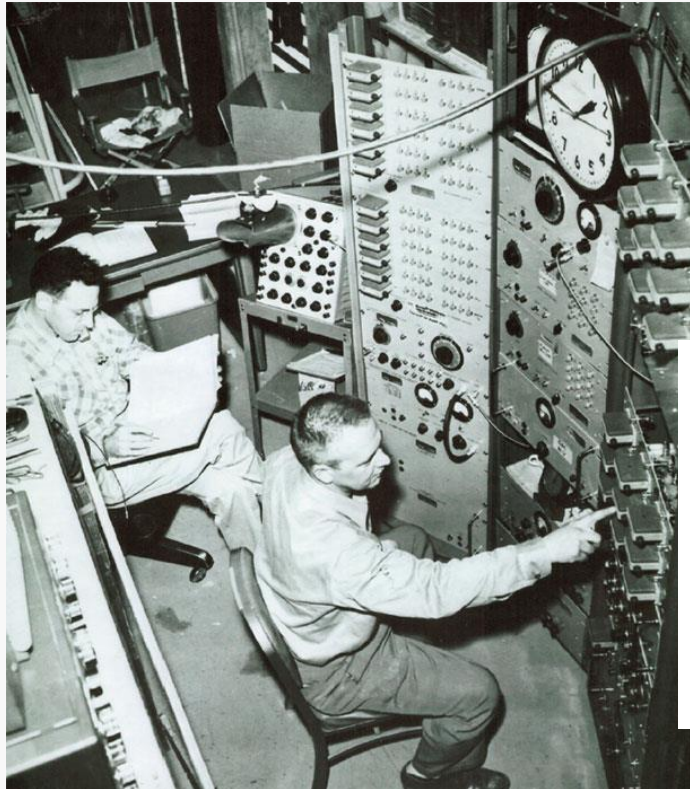


- Военный реактор в Хэнфорде, который нарабатывал плутоний для первой бомбы
- 300 литровая бочка жидкого сцинтиллятора с добавкой кадмия
- 90 ФЭУ

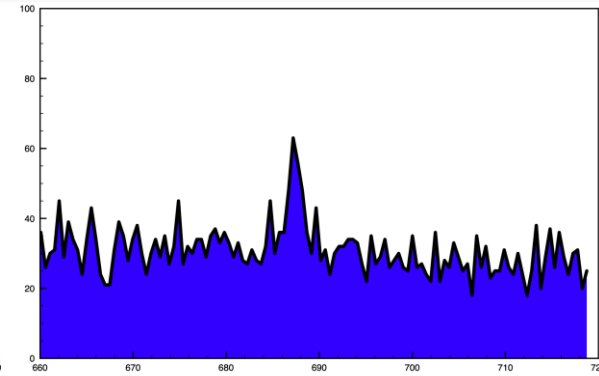
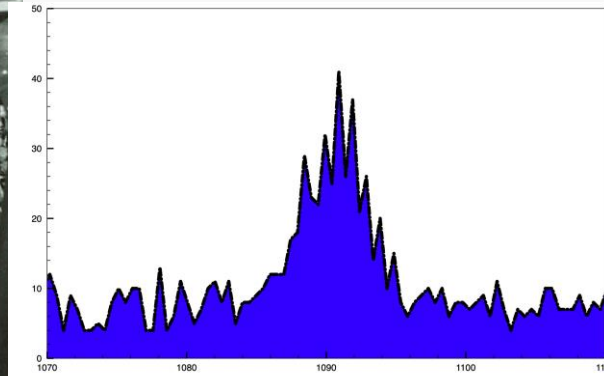
Первые намёки

Poltergeist:

кажется, что-то увидели, но
сигнал : фон = 1 : 20



Мы чувствовали,
что вот-вот ухватим
нейтрино за хвост

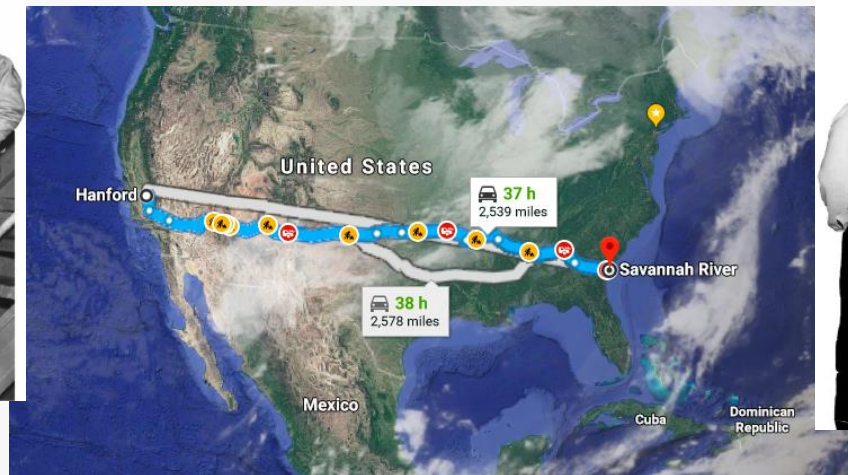


Работа над ошибками

Hanford Site

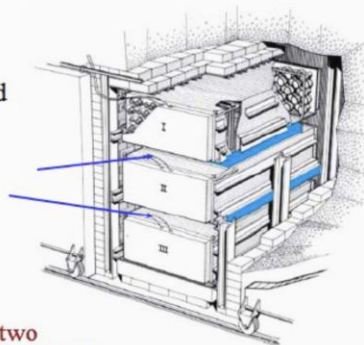


Savannah River Site



Tanks I, II, and III were filled with liquid scintillator and instrumented with 5" PMTs.

Target tanks (blue) were filled with water+cadmium chloride.



Inverse β decay would produce two signals in neighboring tanks (I,II or II,III):

- prompt signal from e^+ annihilation producing two 0.511 MeV γ s
- delayed signal from n capture on cadmium producing 9 MeV in γ s

- 3 детекторных объёма
- 4200 литров
- 330 ФЭУ

63 года назад

RADIO-SCHWEIZ S.A. **RADIOGRAMM - RADIOGRAMME** RADIO-SUISSE S.A.

SBZ1311 ZHW DW1844 FM BZJ116 MH CHICAGOILL 56 14 1310
PLC 00253

Erhalten - Rece **VIA RADIOSUISSE** Bellinlet - Transmis

von - de	Stunde / heure	NAMM - NOM	von - de	Stunde / heure	NAMM - NOM
NEWYORK					

Brieftelegramm 74 15.11.56 -1 73

LT

NACHLASS
PROF. W. PAULI

PROFESSOR W PAULI *Per Post*
ZURICH UNIVERSITY ZURICH ①

NACHLASS
PROF. W. PAULI

WE ARE HAPPY TO INFORM YOU THAT WE HAVE DEFINITELY DETECTED
NEUTRINOS FROM FISSION FRAGMENTS BY OBSERVING INVERSE BETA DECAY
OF PROTONS OBSERVED CROSS SECTION AGREES WELL WITH EXPECTED SIX
TIMES TEN TO MINUS FORTY FOUR/SQUARE CENTIMETERS
FREDERICK REINES AND CLYDE COHN
BOX 1663 LOS ALAMOS NEW MEXICO

No. 31 400 X 100 5/74

Фред Райнес в своих воспоминаниях так описывал реакцию Паули на это сообщение:

...The message was forwarded to him [Pauli] at CERN, where he interrupted the meeting he was attending to read the telegram to the conferees and then made some impromptu remarks regarding the discovery. We learned later that Pauli and some friends consumed a case of champagne in celebration...





2 44

THE DETECTION OF THE NEUTRINO, 1956

On August 27, 1956, at the Savannah River Plant (now Savannah River Site), Drs. Clyde L. Cowan, Jr. (1919-1974) and Frederick Reines (1918-1998) used P Reactor to detect the neutrino, a sub-atomic particle hypothesized in 1930 but unconfirmed until their experiment, one of the most significant in modern physics.

(Continued on other side)

DESIGNED BY THE SAVANNAH RIVER HISTORICAL FOUNDATION, 1998

Экспериментальное открытие нейтрино

Нобелевская премия 1995



Clyde Cowan Jr.



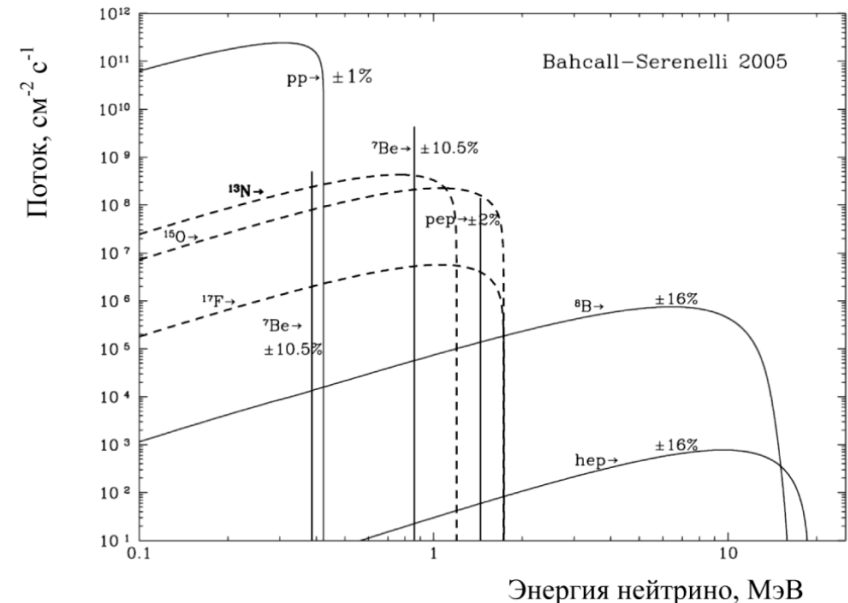
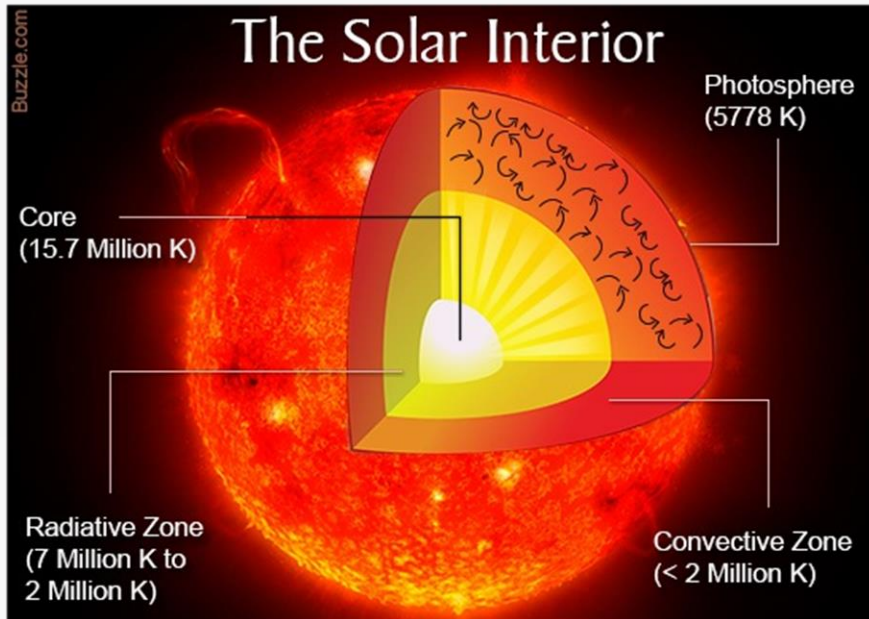
Frederick Reines



«...for the detection of the [neutrino](#)" and "for pioneering experimental contributions to [lepton](#) physics..."

Солнечные нейтрино

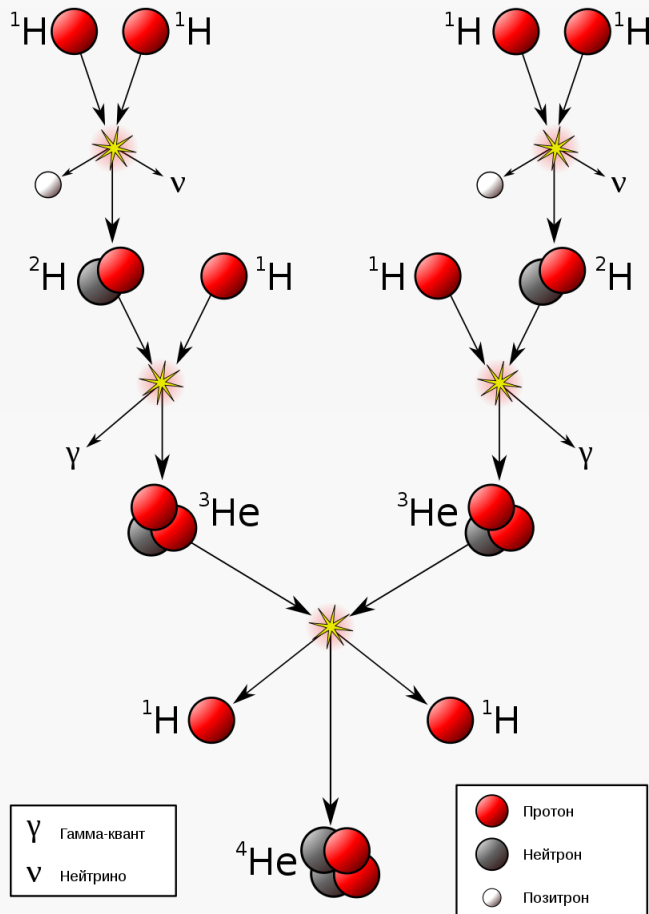
Солнце состоит из [водорода](#) ($\approx 73\%$ от массы и $\approx 92\%$ от объёма), [гелия](#) ($\approx 25\%$ от массы и $\approx 7\%$ от объёма) и других элементов.



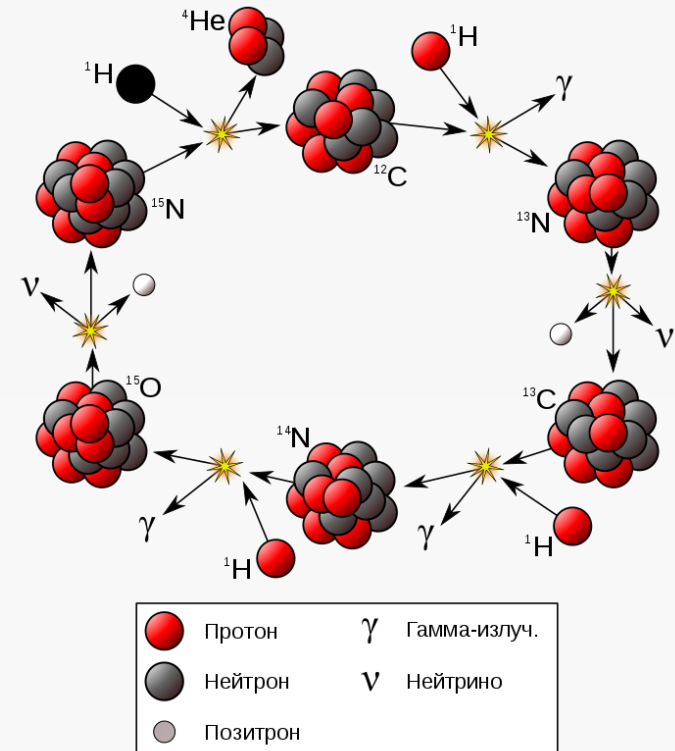
Над видимой поверхностью Солнца ([фотосферой](#)), имеющей температуру около 6000 K, находится [солнечная корона](#) с температурой более 1 000 000 K

Основные ядерные реакции на Солнце

PP – цикл
Бете-Критчфилд

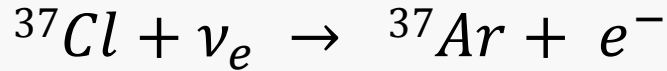


CNO – цикл
Бете



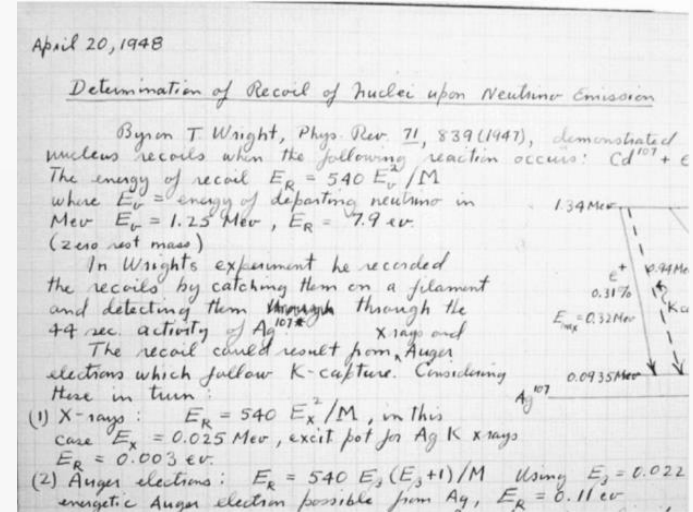
Фотоны $\sim 100\,000$ лет \rightarrow свет
Нейтрино – 8 минут

Идея обнаружения

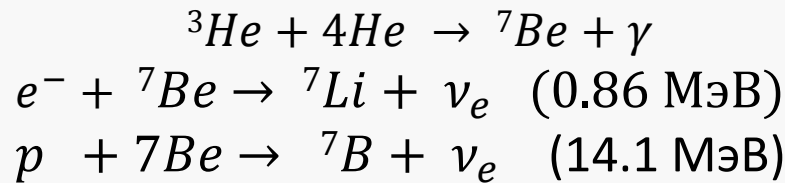


Проблемы:

1. CNO – цикл не идёт на Солнце
2. энергия нейтрино в PP – цикле слишком мала для регистрации в хлор-аргоновой реакции. (0.42 МэВ)
3. Слишком большой фон от космических лучей

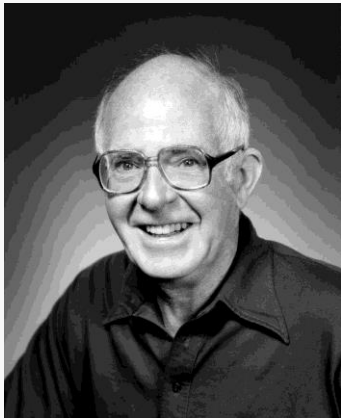


Решение



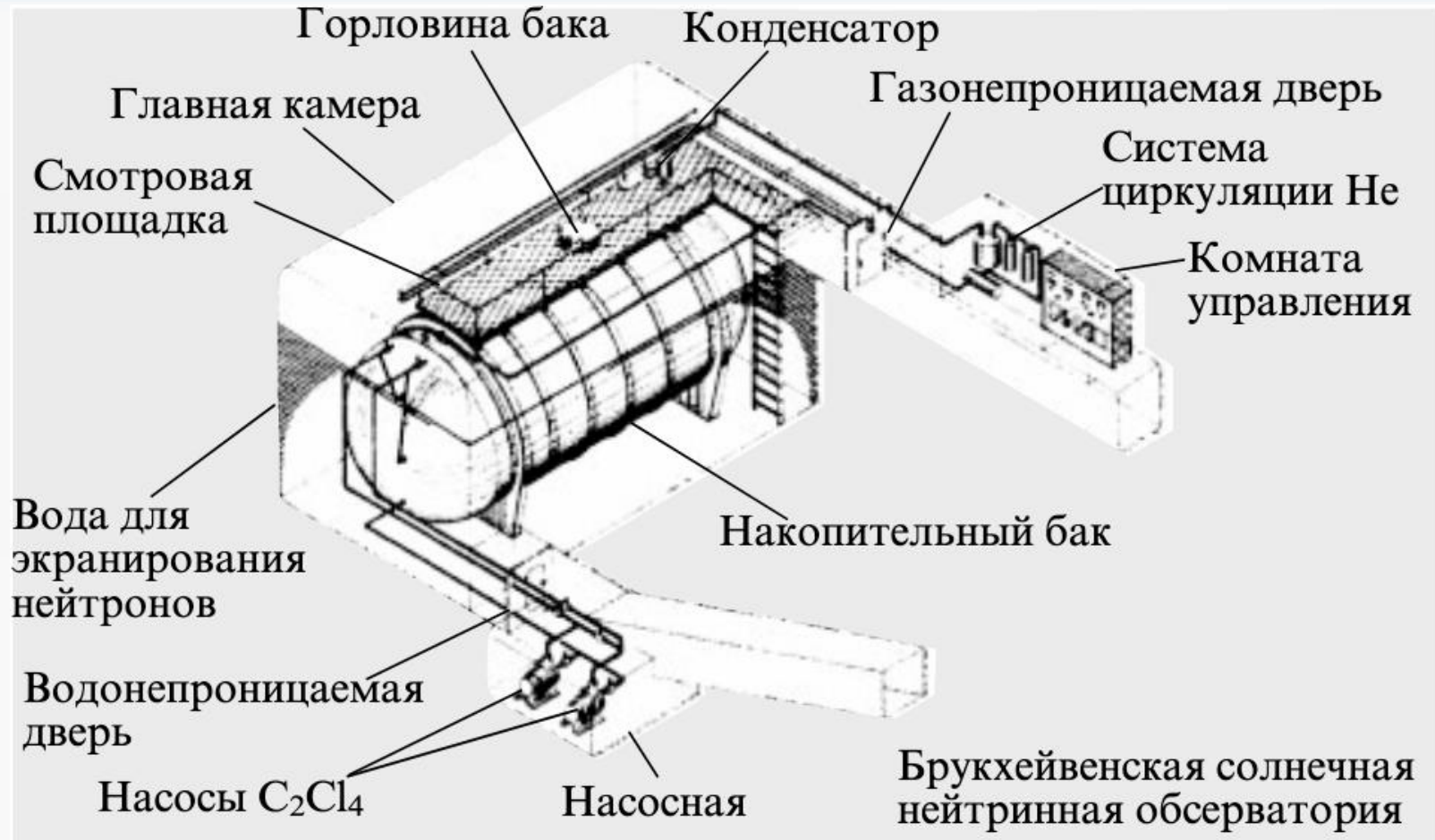
Хольмгрен
 Джонсон
 Фаулер
 Бакол

+ Подземная лаборатория!



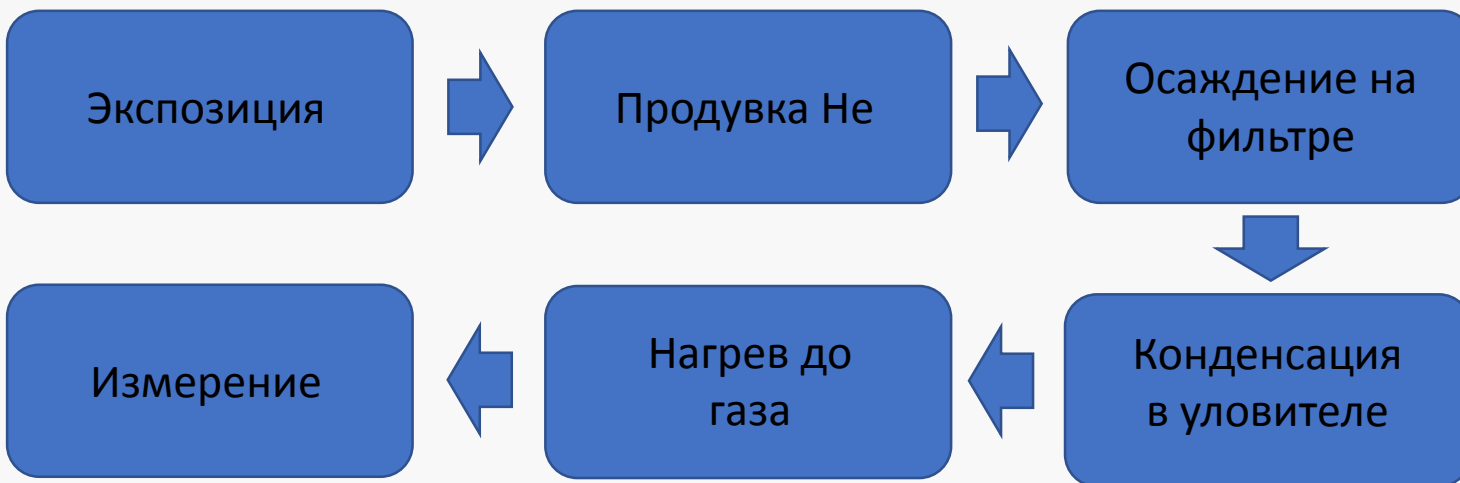
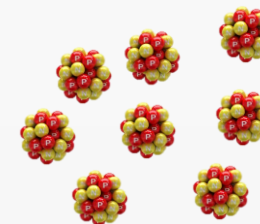
R. Davis Jr

Эксперимент Дэвиса (Хоумстейк-1968)

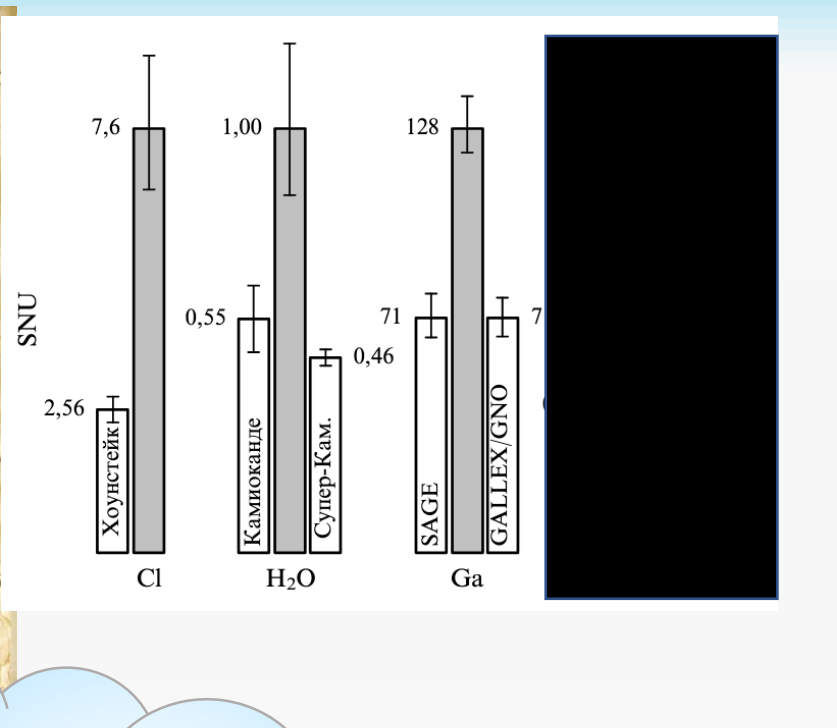


Несколько атомов(!) аргона из почти 400 000 л жидкости

Извлечение

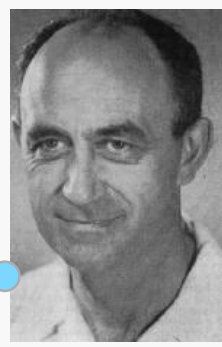
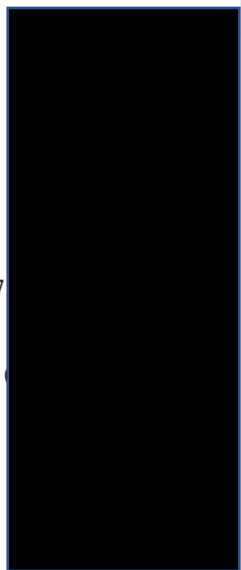


Результаты



- Плохо проведён эксперимент?
- Неверна модель?

Поверьте, вы напрасно расстраиваетесь... Может быть, вы совершили что-то очень важное, мы просто еще не знаем этого наверняка



Разгадки? Магнитный момент нейтрино

Солнце уже выгорело,
а мы об этом не
знаем?

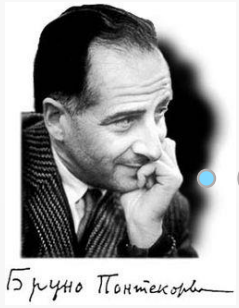
В Солнце больше
тяжёлых элементов, чем
мы думаем?
Или вообще внутри
только тяжелые
элементы, а водород
снаружи?

Нейтрино
нестабильны?

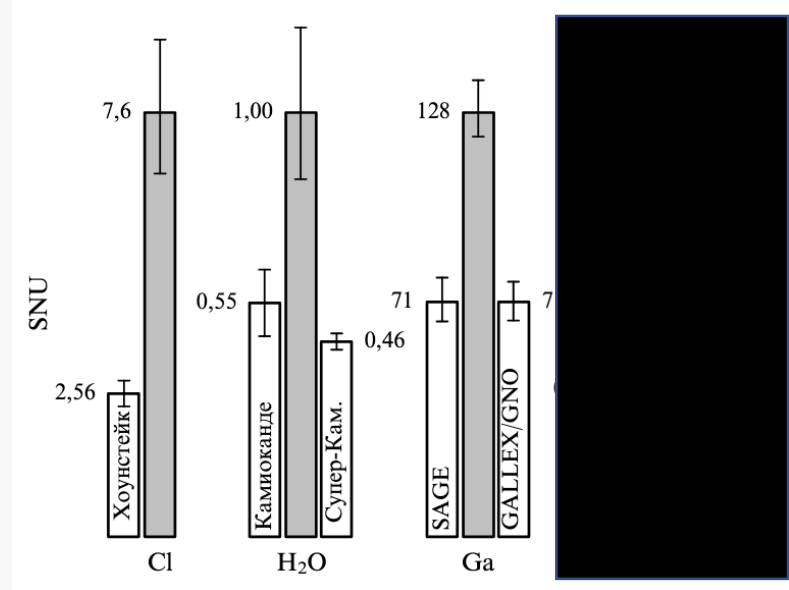
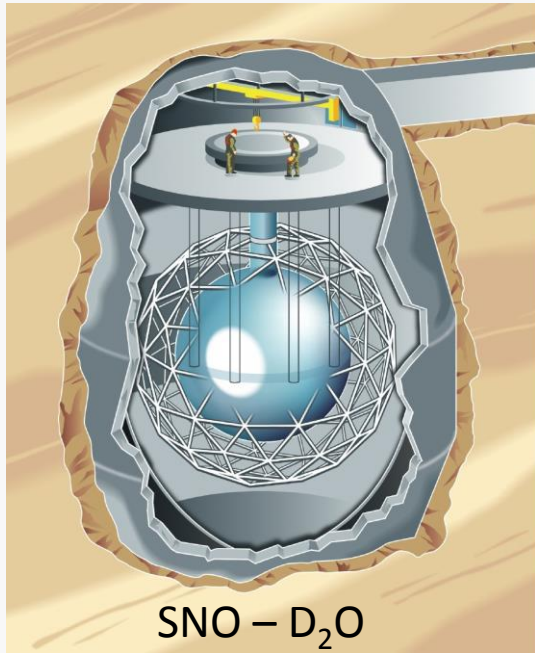
Массивное?
Стерильное?



Нейтринные осцилляции



А что если нейтрино просто переходят из одного типа в другой?



Кто хочет ~~стать миллионером~~ получить Нобелевскую премию?



Что мы знаем о нейтрино?

♦ A: Масса

♦ B: Кол-во типов

♦ C: Йерархия

♦ D: Тип частицы?