

A person wearing a white protective suit and hood is kneeling on a white platform in a large, dark tunnel. The tunnel is lined with thousands of gold-colored, spherical detectors arranged in a regular grid. The person is holding a long, thin rod or tool, possibly for maintenance or calibration. The lighting is dramatic, highlighting the person and the texture of the detectors.

Super-Kamiokande

Поиск распада протона

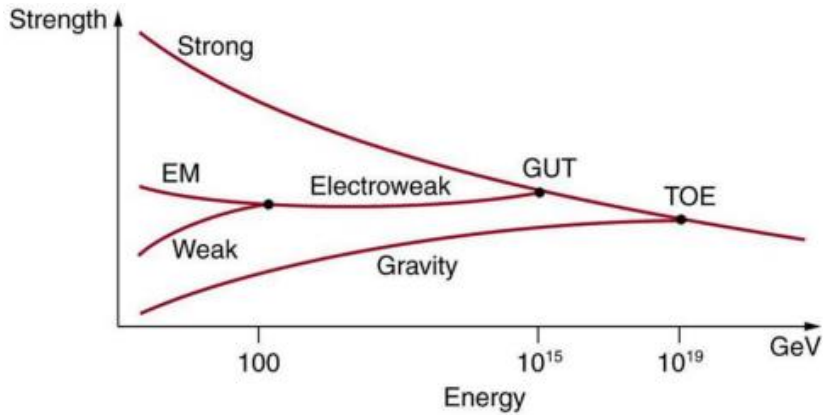
M22-115 Захаров А.М.

Москва, 2023

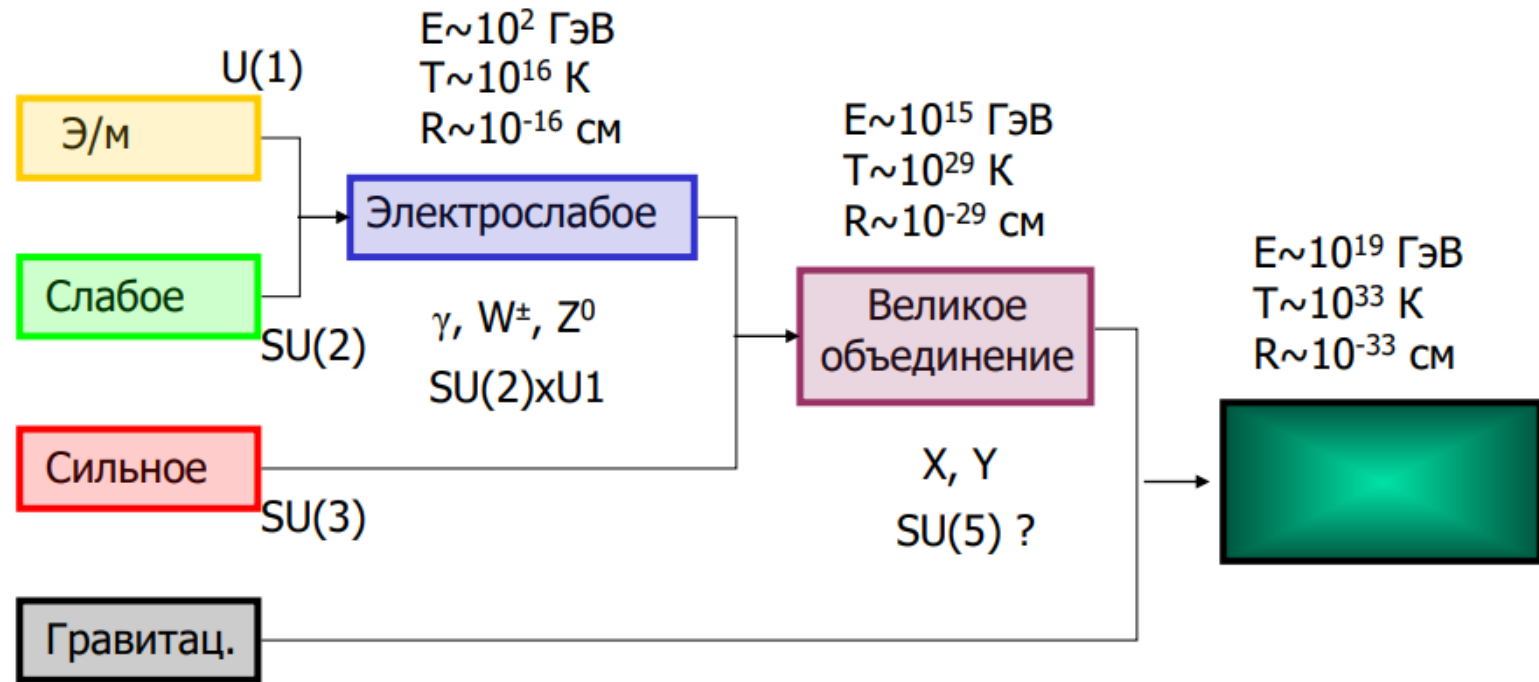
Великое объединение взаимодействий

Группа теоретических моделей, описывающих единым образом сильное, слабое и электромагнитное взаимодействия, называется теорией великого объединения.

В основе идеи объединения заложена зависимость констант связи от энергии. Область энергий $\sim 10^{15}$ ГэВ, где ожидается объединение, сегодня недоступна для эксперимента - физические условия для Великого объединения взаимодействий могли существовать в короткий период после Большого взрыва ($\sim 10^{-40}$ с)



Энергия, ГэВ	α_s	α_e	α_w
0.01	10	1/137	1/26
0.1	1	1/135	1/27
1	0.40	1/133	1/28
100	0.12	1/128	1/30



Возникает симметрия между кварками и лептонами.

Описание взаимодействий

Э/М взаимодействие

- КЭД – абелева калибровочная теория поля, построенная на группе $U(1)$.
- Это простейшая группа преобразований, которые могут быть выполнены над единичным объектом или матрицей 1×1 .
- В этой матрице находится фотон (без массы и заряда), и он не меняет природу частицы (т.е. переводит электрон в электрон).
- Взаимодействие описывается посредством обмена виртуальным фотоном

Слабое взаимодействие

- Слабый заряд зависит от спиральности. Лептоны и кварки – левополяризованные; антилептоны и антикварки – правополяризованные. Правые частицы и левые античастицы не участвуют в слабом взаимодействии.
- Слабые силы действуют на дублеты частиц. Такое взаимодействие описывается теорией $SU(2)$, в рамках которой партнеры по дублету могут переходить друг в друга. Переходы между партнерами по дублету осуществляются массивными бозонами W^\pm и Z^0

Сильное взаимодействие

- КХД строится на группе $SU(3)$, т.е. связь между глюонами и кварками может быть представлена матрицей 3×3
- Переносчиками взаимодействия являются восемь безмассовых глюонов (шесть меняют цвет кварка, два не меняют)
- Цвет кварка определяется комбинацией зарядов (R-G), (G-B) и (B-R), каждый из которых может принимать значения $-1/2$, 0 , $+1/2$, а их сумма должна быть равна нулю

Простейшая ТВО

- Простейшая Теория Великого Объединения (ТВО) описывается группой $SU(5)$ - наименьшей и простейшей из групп, которая включает в себя $SU(3)$ и $SU(2) \times U(1)$. В простейшем представлении группы $SU(5)$ членами семейства являются пять правых компонент частиц: d-кварк во всех цветах, позитрон и антинейтрино. Каждой из этих частиц приписываются четыре независимых заряда: электрический, слабый и два цветовых (R-G) и (G-B).
- Для описания переходов между пятью состояниями материи, количество бозонов увеличивается до 24 – добавляются 12 векторных лептокварков: 3X, 3Y-бозона и их античастицы. Они обеспечивают переход между лептонами и кварками, X-бозоны имеют заряд $\pm 4/3$, а Y-бозоны $\pm 1/3$.
- Таким образом, комбинирование по парам пяти правых частиц дает семейство из десяти левых: Это левые компоненты позитрона (т.е. электрон) и u, d и \bar{u} -кварков (в трех цветах каждый). Принципиального отличия между лептонами и кварками больше нет.

	Эл. заряд	Слабый заряд	Заряд (R-G)	Заряд (G-B)
d-кварк, красный	-1/3	0	+1/2	0
d-кварк, зеленый	-1/3	0	-1/2	+1/2
d-кварк, синий	-1/3	0	0	-1/2
позитрон	+1	+1/2	0	0
антинейтрино	0	-1/2	0	0

	Эл. заряд	Слабый заряд	Заряд (R-G)	Заряд (G-B)
d-кварк правый	-1/3	0	+1/2	0
позитрон	+1	+1/2	0	0
u-кварк левый	+2/3	+1/2	+1/2	0

Теория распада

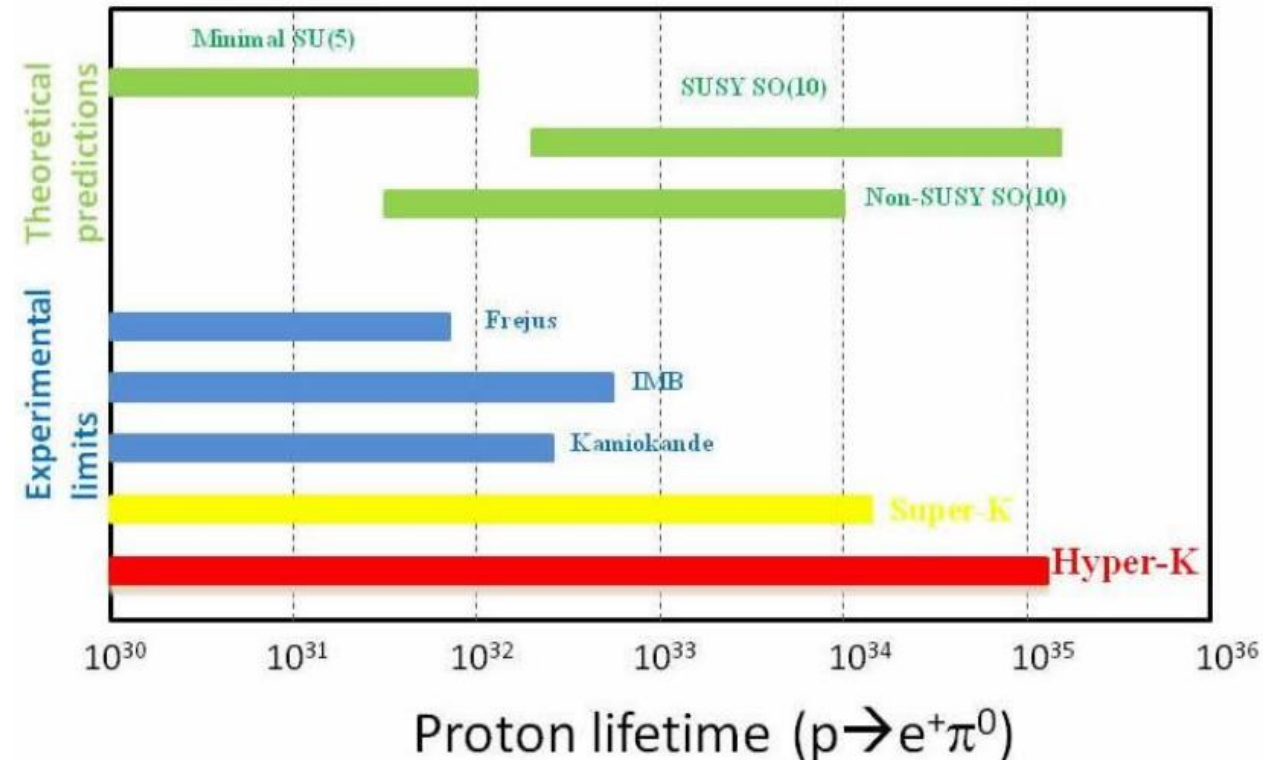
Поскольку стали возможны прямые переходы кварк-лептон и кварк антикварк, то возможны и процессы с нарушением законов сохранения барионного и лептонного чисел.

Предположим, что красный d-кварк, находящийся в составе протона, испускает красный X-бозон, таким образом кварк становится бесцветным и становится позитроном. X-бозон поглощается левым зеленым u-кварком, и становится антисиним \bar{u} -антикварком, который в комбинации с оставшимся u-кварком образуют π^0 -мезон. Таким образом мы получили процесс $p \rightarrow e^+ + \pi^0$. В минимальной SU(5)-модели время жизни протона при распаде по этому каналу $\sim 10^{31}$ лет

Оценка времени жизни проводится по формуле:

$$\frac{\tau}{B} = \frac{N_0 \Delta t \epsilon}{n_{\text{obs}}}, \text{ где}$$

B - вероятность распада в искомый канал (branching ratio), N_0 -число протонов в момент времени $t = 0$, Δt – время экспозиции, ϵ – эффективность регистрации, а n_{obs} – число зарегистрированных событий распада



Super Kamiokande

Эксперимент представляет из себя 50 кт очищенной воды в стальном цилиндрическом баке ($d=39.3$ м, $h=41.4$ м) в шахте Камиока (Япония) на глубине 1000 м (2700 м.в.э.)

Внутренний детектор – мишень для нейтрино:

- 32 кт H₂O
- 11146 20-дюймовых ФЭУ

Внешний детектор – защита от γ квантов и нейтронов извне:

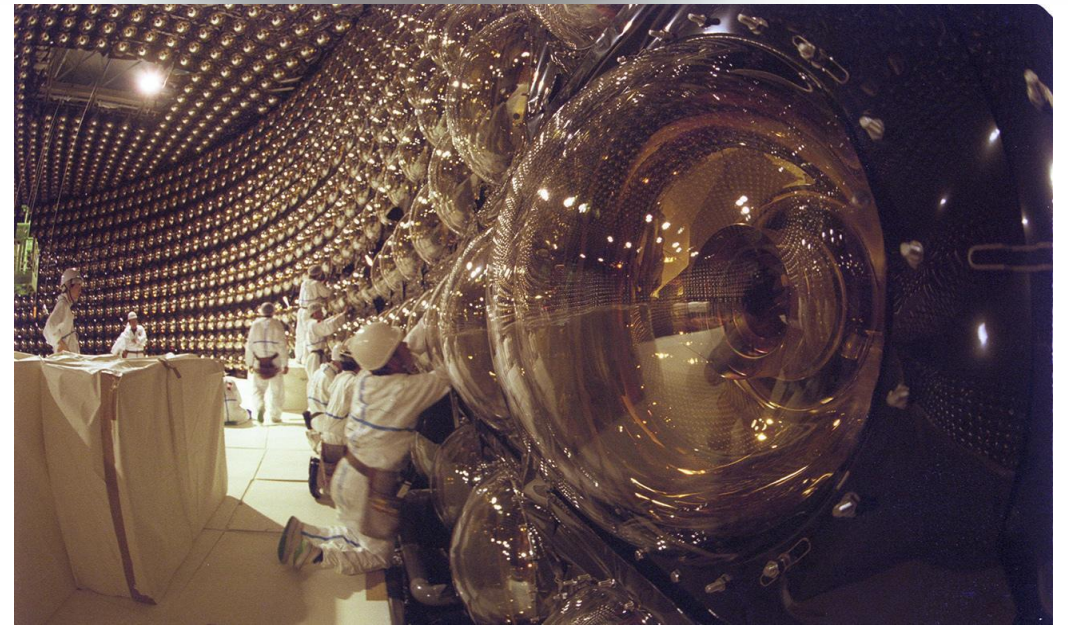
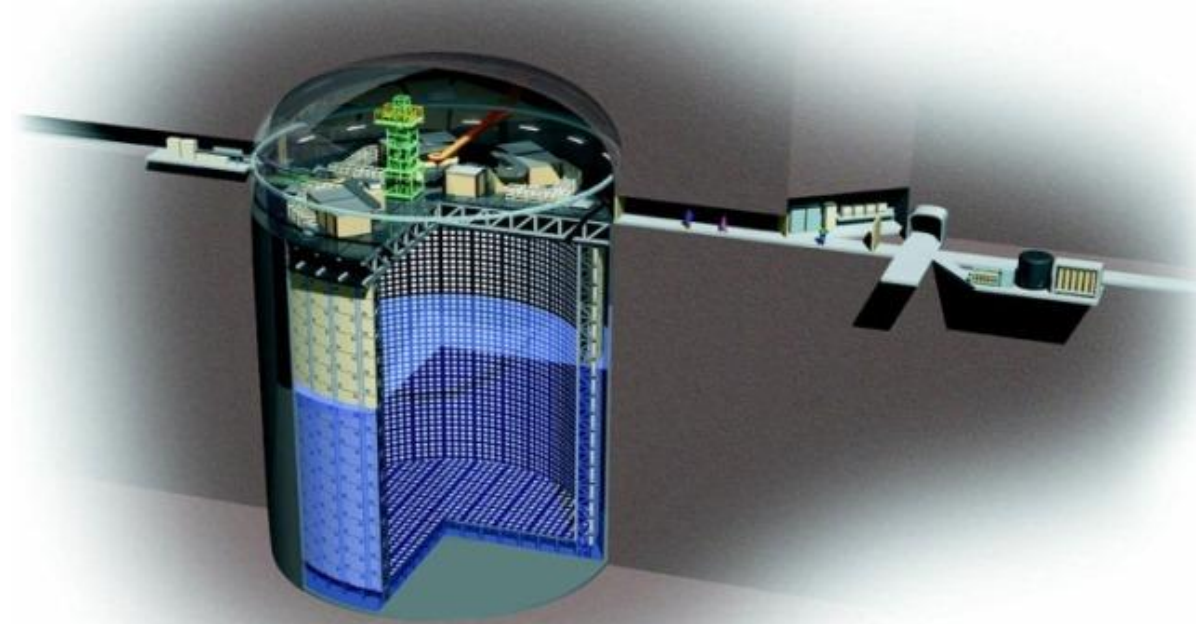
- 18 кт H₂O
- 1885 8-дюймовых ФЭУ

Внутренний и внешний детекторы разделены между собой двумя слоями пленки из полиэтилентерефталата

- Порог 5 МэВ (4.5 в SK-III)
- Оптическое покрытие 40%

В Супер-Камиоканде (22.5 кт FV) 7.5×10^{33} протонов и 6×10^{33} нейтронов. Особенности экспериментов по поиску распада протона зависят от нескольких факторов:

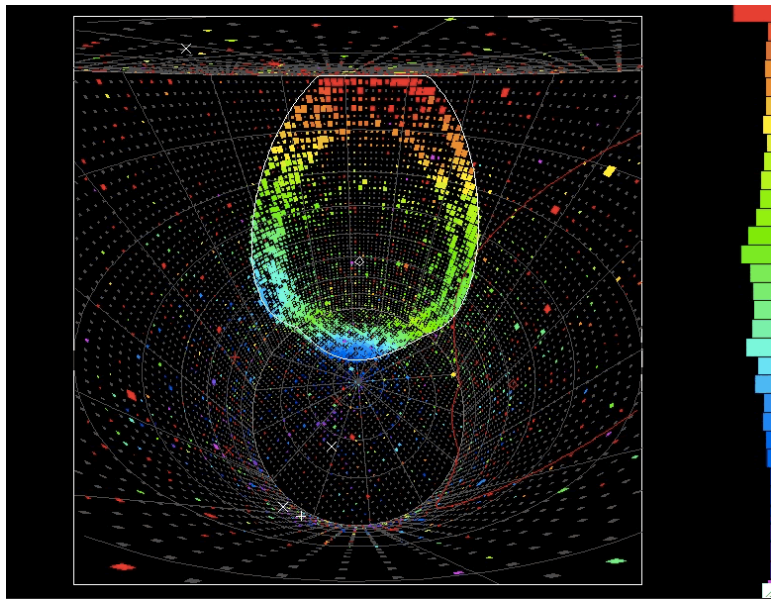
- Оценка времени жизни по данному каналу распада
- Канал распада и распределение по энергиям вторичных (искомых) частиц
- Специфический к данному каналу распада фон



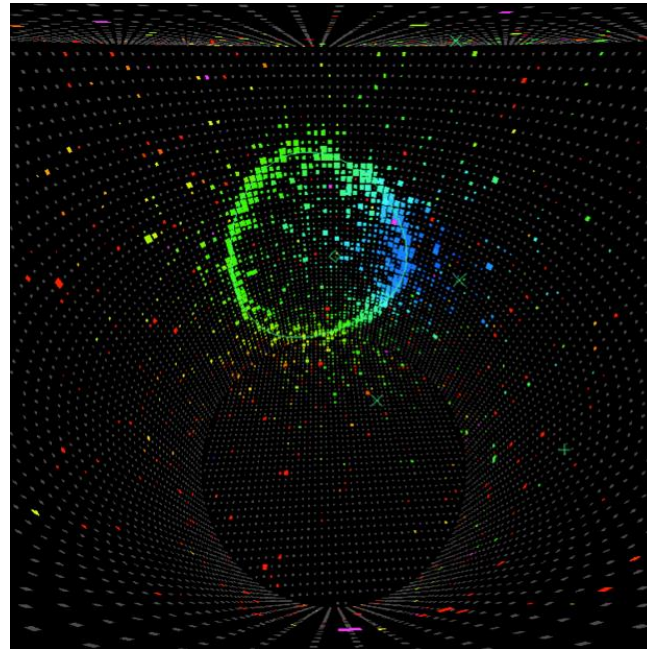
Идентификация частиц

Отношение v_μ/v_e должно быть ~ 2 . Для получения этого результата в Супер-К потребовалось разработать алгоритмы μ/e -дискриминации по форме черенковских колец. Они играют важную роль и в задачах поиска распада протона.

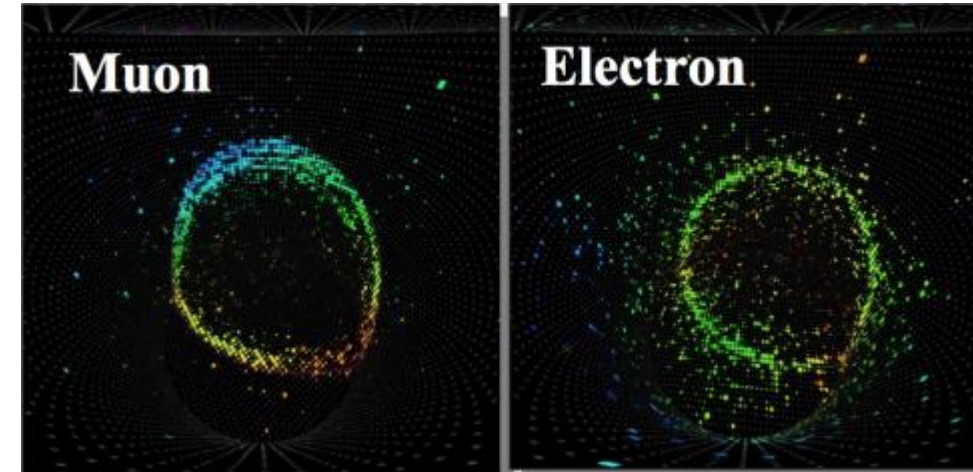
Электроны, позитроны и γ -кванты в Супер-К приводят к образованию э/м ливней. Мюоны, пионы, протоны - не приводят. На этом основан алгоритм определения типа частицы. Наблюдается разница в схеме событий: электрон инициирует э/м ливень, многократное кулоновское рассеяние, а мюон распространяются почти прямо, теряя энергию за счет ионизационных потерь. Электроны будут многократно рассеиваться на материале детектора, а мюоны - нет. Поэтому черенковские кольца электронов более "размыты", чем кольца мюонов.



μ -like ring



e-like ring



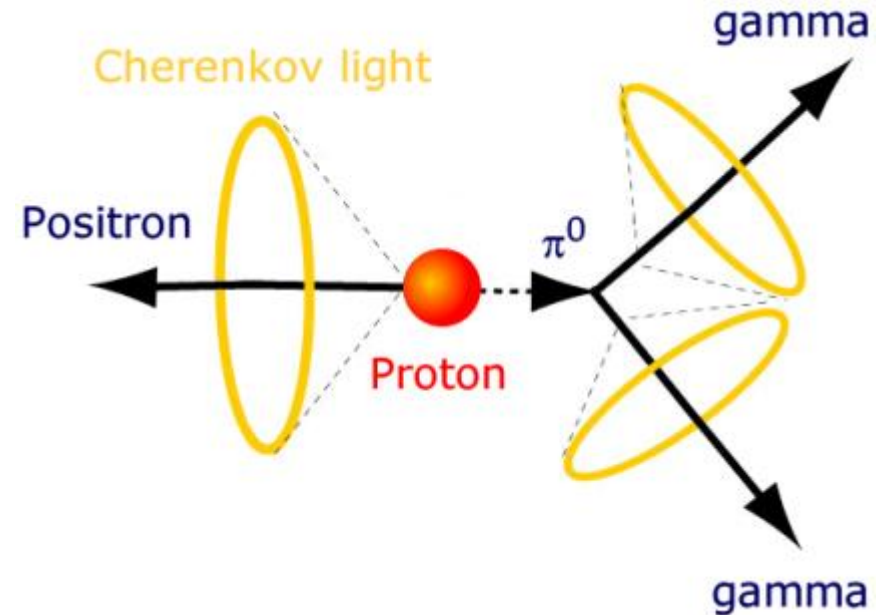
Распад по каналу $p \rightarrow e^+ \pi^0$

Идеальный случай: позитрон ($p = 469$ МэВ/с) инициирует э/м каскад, результатом которого будет одно e-like черенковское «кольцо». Гамма-кванты от распада нейтрального пиона ($\pi^0 \rightarrow 2\gamma$) будут приводить к рождению электрон-позитронных пар, которые, в свою очередь, приведут к развитию э/м каскада и двум зарегистрированным e-like кольцам черенковского излучения.

Трудности: если распад протона произойдет в ядре ^{16}O , тогда вероятность нейтральному пиону покинуть ядро без взаимодействия – всего лишь 0.43. При анализе данных действительно наблюдались эффекты, которые сильно искажали ожидаемую сигнатуру распада протона: Пион может рассеяться или поглотиться в ядре до того, как успеет вылететь из него; Распад пиона может быть асимметричным по энергиям γ -квантов. Это может привести к тому, что одно из двух черенковских колец, отвечающих распаду π^0 -мезона, будет слабым или его не будет вообще.

Критерии отбора:

- 2 или 3 e-like черенковских кольца
Три – идеальный, неискаженный случай распада протона, два – т.к. энергия одного из фотонов может оказаться ниже черенковского порога
- $85 < M\pi < 185$ МэВ/с² (в двух кольцах при трех зарегистрированных)
- $800 < M_p < 1050$ МэВ/с²
- Полный импульс < 250 МэВ/с (импульс Ферми для ядра ^{16}O)

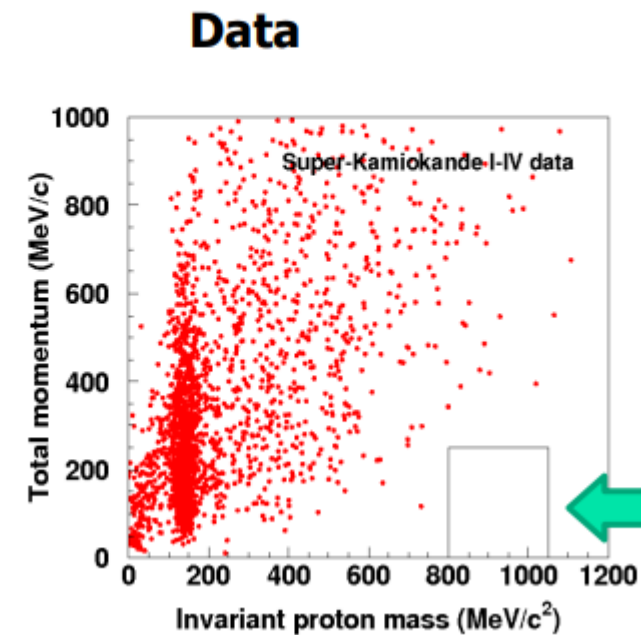
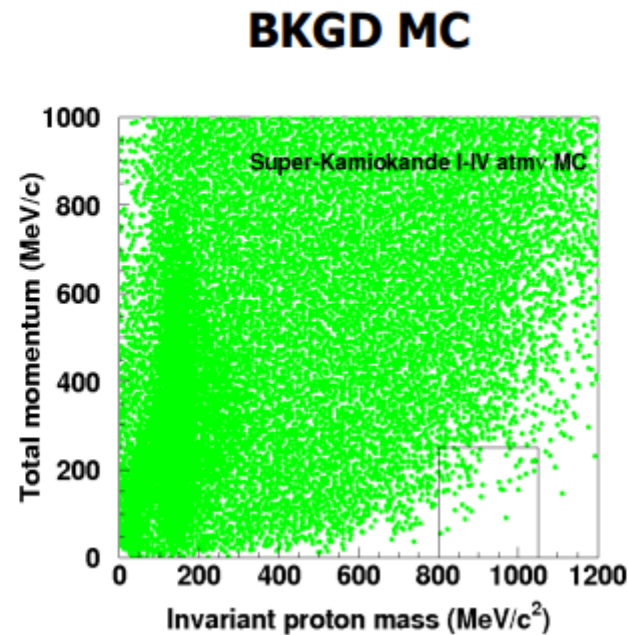
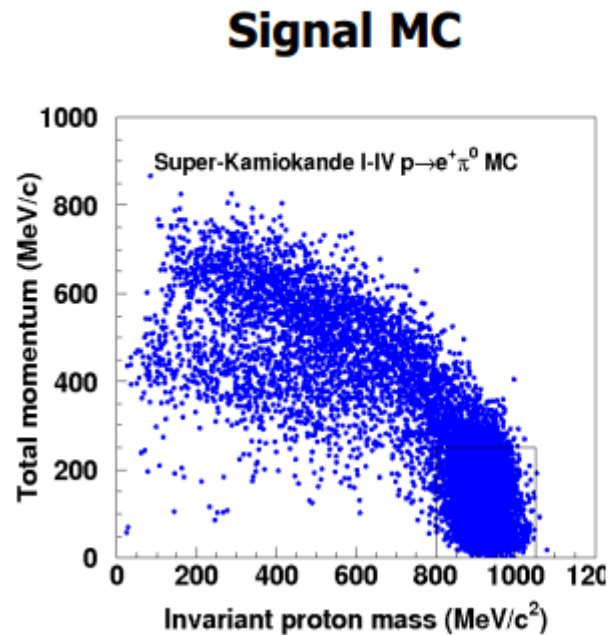


Распад по каналу $p \rightarrow e^+ \pi^0$. Результаты

Статистика - 205.7 кт·год

Ни одного события не найдено

$\tau > 1.21 \cdot 10^{34}$ лет (90% C.L.)



Здесь мог быть распад протона

Распад по каналу $p \rightarrow \tilde{\nu} K^+$

Анализ основан на поиске продуктов распада K^+ (Minimal SUSY SU(5) $\leq 10^{30}$, SUSY SO(10) $10^{32} - 10^{34}$)

Нейтрино уносит часть энергии протона, так что уже нельзя восстановить его массу по продуктам распада

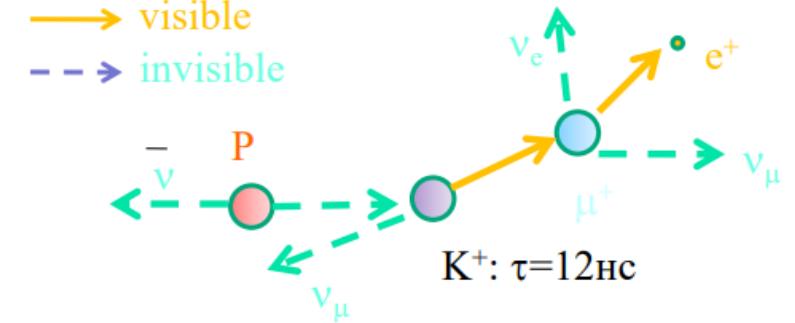
Сценарий А: $K \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$ (вероятность 64%)

Сценарий А1: свободный протон

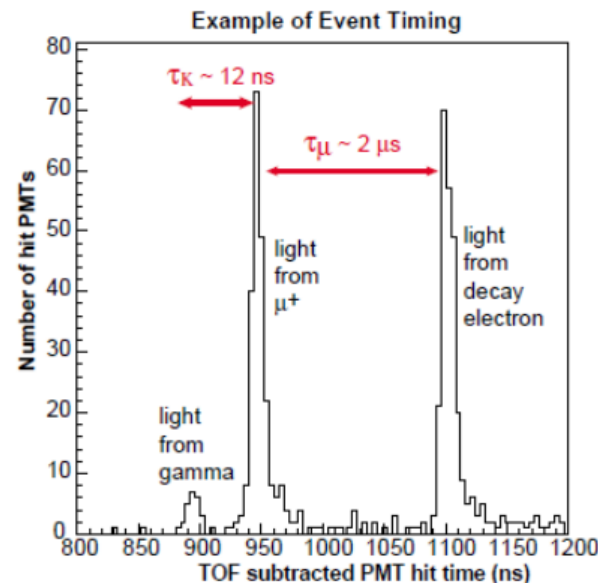
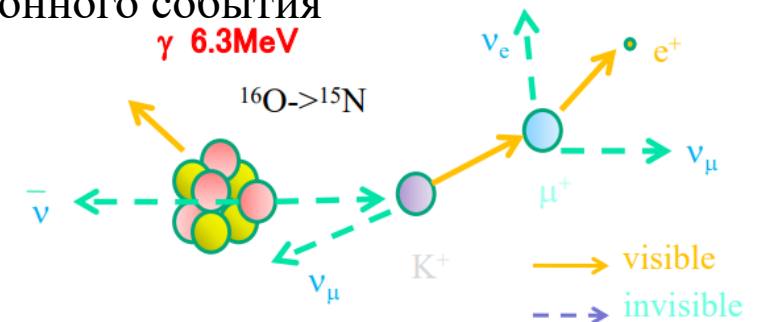
Сценарий А2: связанный в ^{16}O протон

Сценарий Б: $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0$ (вероятность 21%)

A1: K^+ нерелятивистский (импульс ниже черенковского порога). K^+ останавливается и распадается на μ^+ ($P = 236 \text{ МэВ/с}$) и ν_μ . В данных ищем 1 μ -like кольцо + распадный электрон от распада мюона, $215 < P_\mu < 260 \text{ МэВ/с}$



A2: В результате распада протона в ядре ^{16}O образуется ^{15}N в возбужденном состоянии ($E_\gamma = 6.3 \text{ МэВ}$, вероятность 41%). В данных ищем e-like кольцо от гамма-кванта, 1 μ -like кольцо и электрон от распада мюона. НФЭУ для первого события < 60 , $12 < t_{\text{ФЭУ}} < 120 \text{ нс}$ до мюонного события



Распад по каналу $p \rightarrow \tilde{\nu} K^+$

Анализ основан на поиске продуктов распада K^+ (Minimal SUSY SU(5) $\leq 10^{30}$, SUSY SO(10) $10^{32} - 10^{34}$)

Нейтрино уносит часть энергии протона, так что уже нельзя восстановить его массу по продуктам распада

Сценарий А: $K \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$ (вероятность 64%)

Сценарий А1: свободный протон

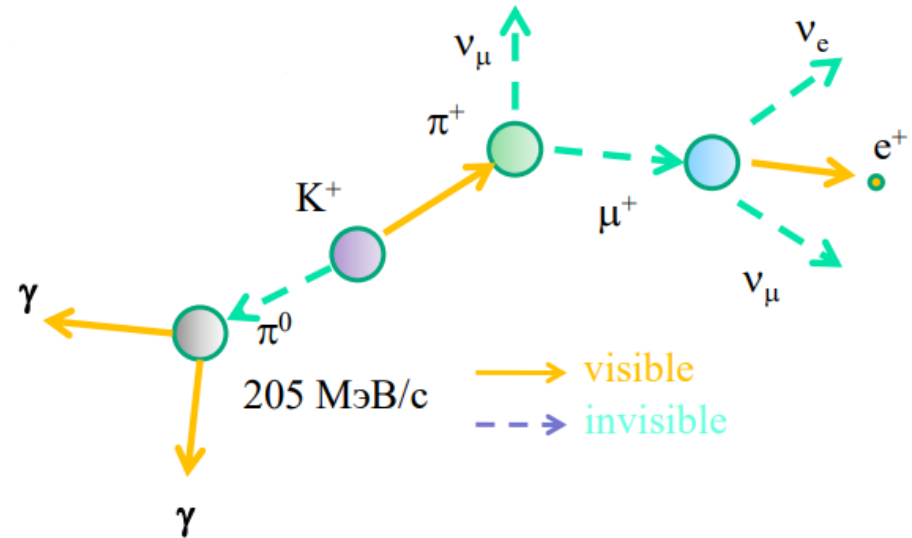
Сценарий А2: связанный в ^{16}O протон

Сценарий Б: $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0$ (вероятность 21%)

Условия отбора:

- 2 e-like черенковских кольца (π^0)
- 1 e-like кольцо от распада мюона (e^+)
- $85 < M_{\pi^0} < 185 \text{ МэВ}/c^2$
- $175 < P_{\pi^0} < 250 \text{ МэВ}/c$

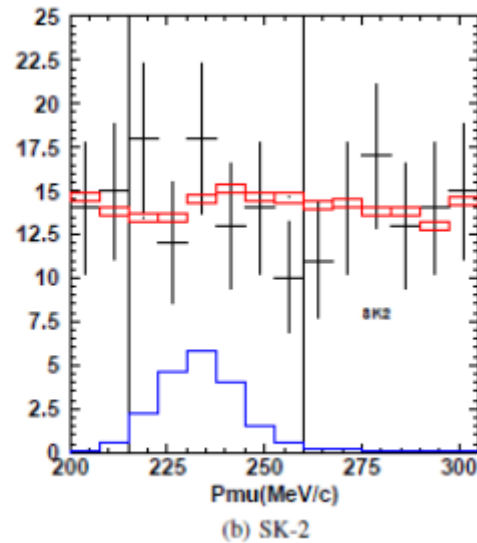
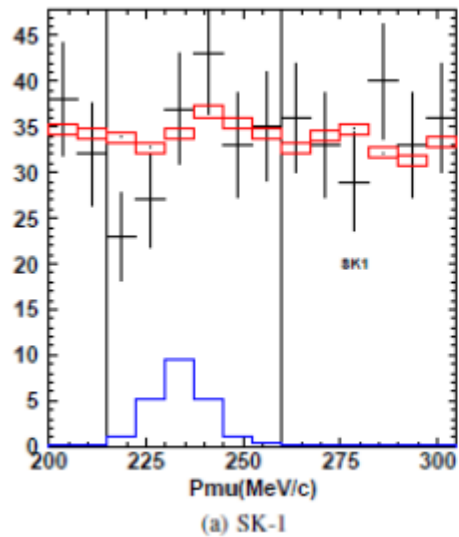
Б: Вероятность этого канала распада: 21%. π^+ и π^0 вылетают в противоположных направлениях с импульсами 205 МэВ/с. Импульс π^+ на уровне черенковского порога



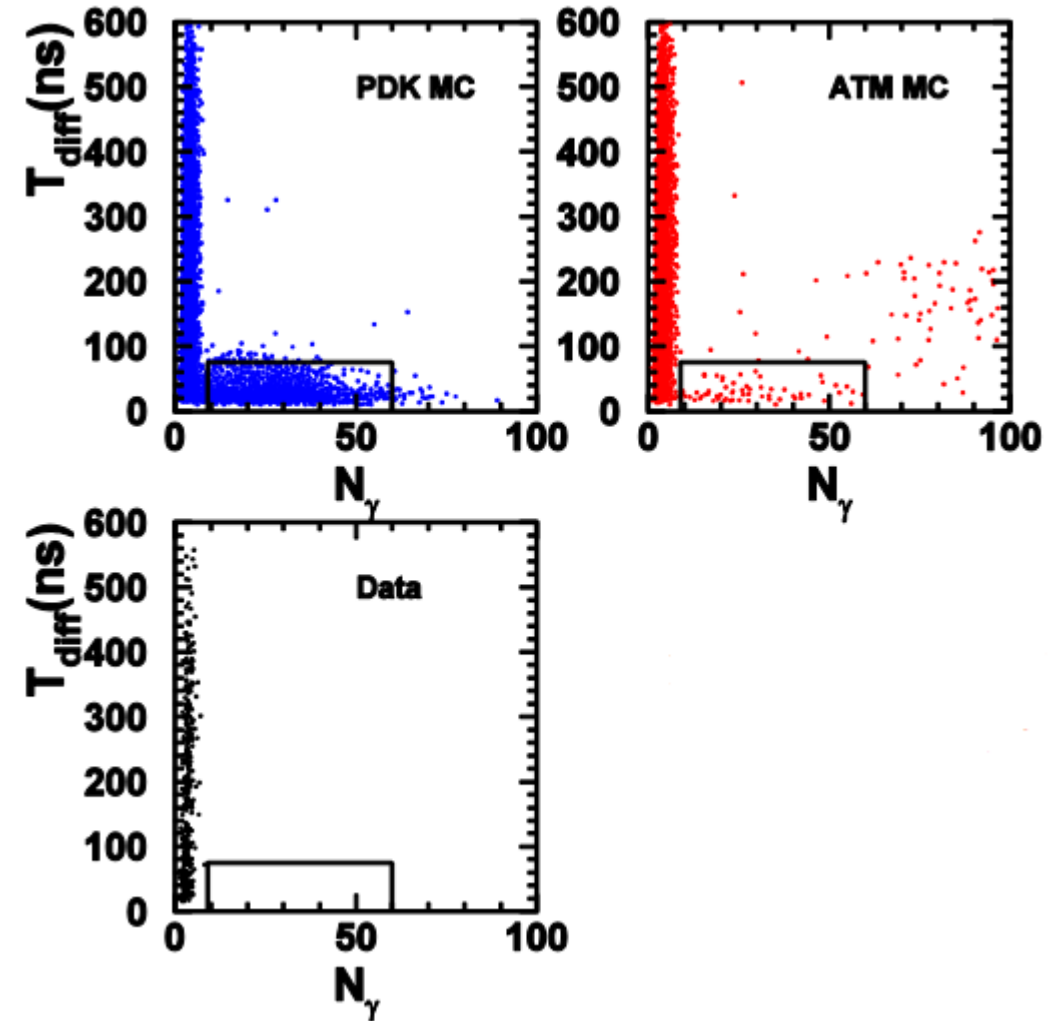
В данных ищем моноэнергетический π^0 плюс какое-либо количество света, зарегистрированное в противоположном от него направлении

Распад по каналу $\mu \rightarrow \tilde{\nu} K^+$. Результаты A1 и A2

- A1:**
- 33 кт·год (535 дней сбора данных)
 - Эффективность: 4.4% (определена из Монте-Карло)
 - Нет превышения сигнала над уровнем фона

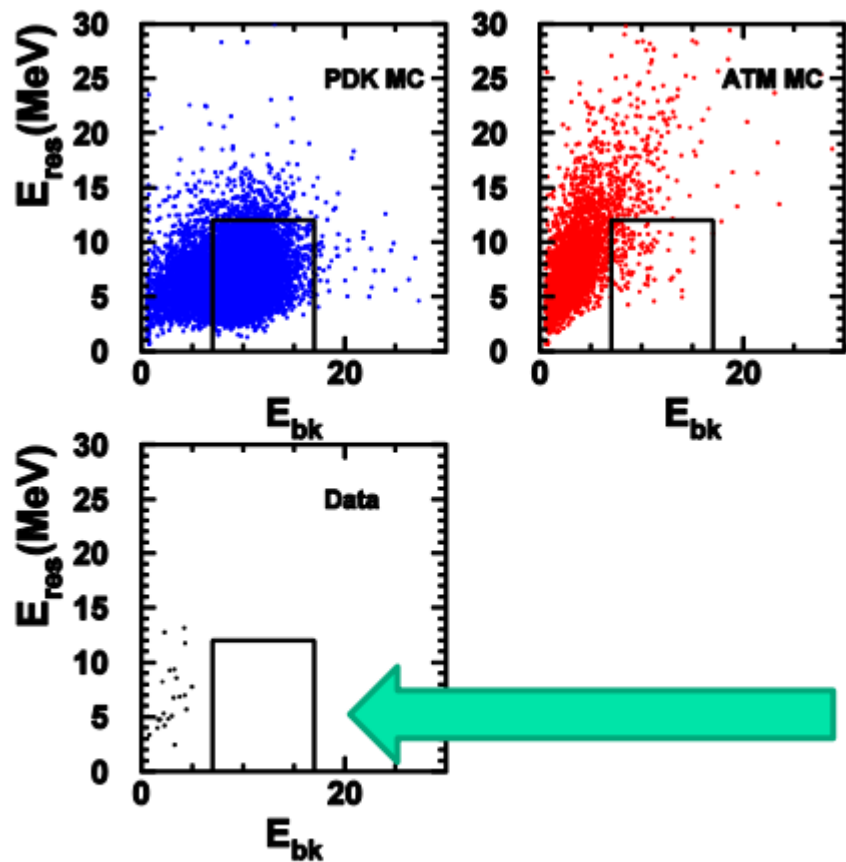


- A2:** Ни одного события-кандидата не найдено

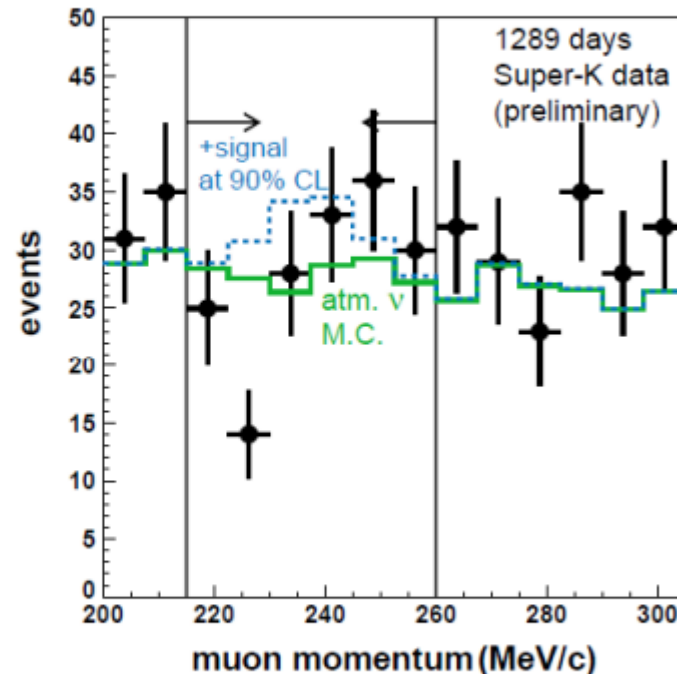


Распад по каналу $p \rightarrow \tilde{\nu} K^+$. Результаты Б

Ни одного события не найдено
 $\tau > 4.4 \cdot 10^{32}$ лет (90% C.L.)



Здесь мог бы
быть распад
протона



from joint fit to background + signal:
 $\tau/B(p \rightarrow \nu K^+) > 4.4 \times 10^{32}$ yr

No significant event excess above the atmospheric neutrino backgrounds has been found for either mode

Спасибо за внимание!