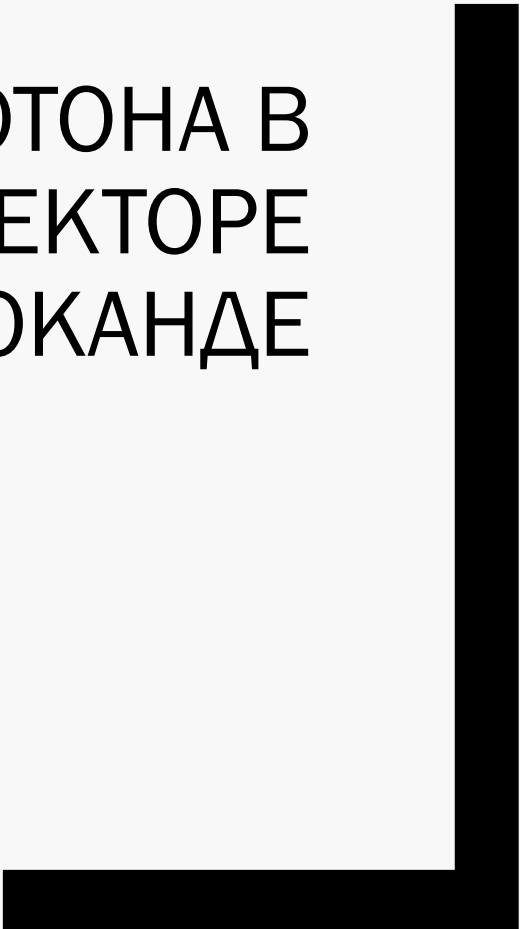




ПОИСК РАСПАДА ПРОТОНА В ДЕТЕКТОРЕ СУПЕР-КАМИОКАНДЕ

Гавва Оксана
НИЯУ МИФИ
Москва 2021

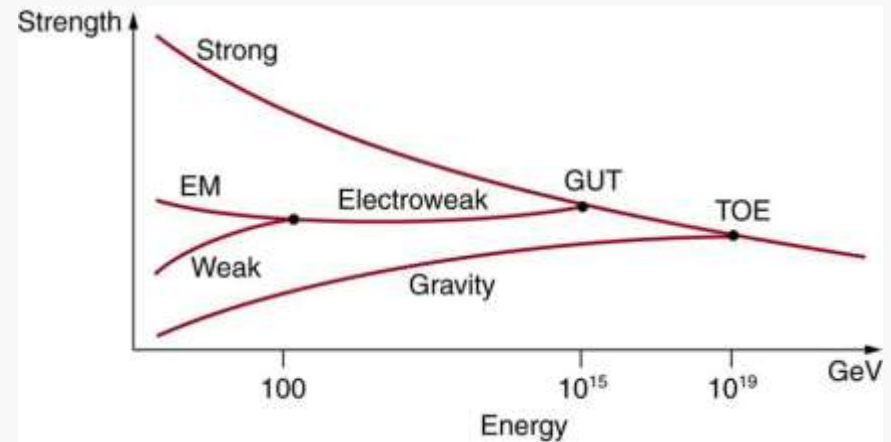


Фундаментальные взаимодействия

	Гравитац.	Слабое	Э/м	Сильное
Заряд	Масса	Лептонный заряд	Электрич. заряд	Цветовой заряд
Переносчики	Гравитон	$W^{\pm}, Z^0$	Фотон	Глюоны
Радиус, м	∞	10^{-18}	∞	10^{-15}
Относит. сила	1	10^{25}	10^{36}	10^{38}

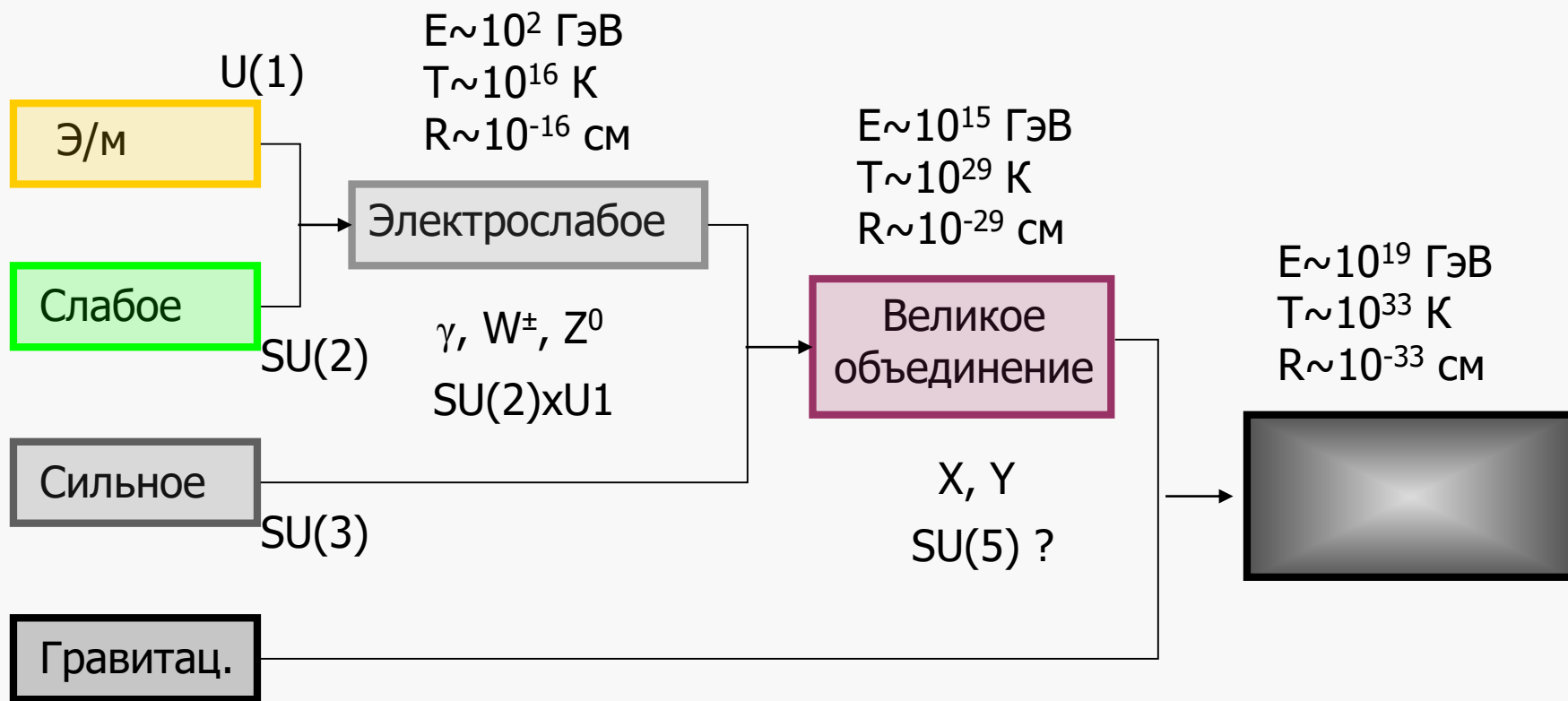
Великое объединение взаимодействий

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



- в основе идеи объединения заложена зависимость констант связи от энергии (расстояния, температуры)
- константы взаимодействия – экспериментально измеряемая величина (см. таблицу)
- 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)

Великое объединение взаимодействий



Возникает симметрия между кварками и лептонами.

Простейшая ТВО: минимальная SU(5)-модель

Глэшоу и Джорджи (1974 г)

- Барионное и лептонное числа не сохраняются по отдельности, но сохраняется ($B - L$)

SU(5) – это наименьшая и простейшая из групп, которая включает в себя SU(3) и SU(2)×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)

	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
антинейтр ино	0	-1/2	0	0

Для каждого заряда сумма зарядов по частицам равна 0.

Х. Джорджи, УФН 136, 287 (1982)

Простейшая ТВО: минимальная $SU(5)$ -модель

- Все возможные переходы между этими пятью состояниями материи обеспечиваются 24-мя промежуточными бозонами:
 - *Нейтральные γ, Z^0, G_1, G_2*
 - Переводят частицу саму в себя.
 - *Заряженные $W^\pm$ и еще шесть глюонов $G_3, \dots, G_8$.*
 - *12 векторных лептокварков (3 X- и 3 Y-бозона и их античастицы) осуществляют переходы между лептонами и кварками*
 - Каждый из этих бозонов обладает слабым, цветовым и электрическим зарядом:
 - $\pm 4/3$ у X-бозонов
 - $\pm 1/3$ у Y-бозонов

Простейшая ТВО: минимальная SU(5)-модель

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)

Аналогично можно «сконструировать» еще два семейства частиц (5 левых + 10 правых), плюс распространить на высшие поколения кварков и лептонов:

- c, s, μ, ν_μ
- t, b, τ, ν_τ

Таким образом, принципиального отличия между лептонами и кварками больше нет: они все стали членами одного семейства.



	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



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

и т.д.

Как получить распад протона?

- Поскольку стали возможны прямые переходы кварк-лептон и кварк-антикварк, то возможны и процессы с нарушением законов сохранения барионного и лептонного чисел.
- Кварковый состав протона: uud
- Допустим, что два из трех кварков оказались на расстоянии $\sim 10^{-29}$ см друг от друга. Тогда между ними может произойти обмен X -бозоном:
 - Например, правый красный d -кварк ($q=-1/3$) испускает X -бозон с эл. зарядом $-4/3$ и красным цветовым зарядом
 - Таким образом, этот d -кварк лишается цветового заряда и приобретает эл. заряд $-1/3 - (-4/3) = +1$, т.е. становится позитроном
 - В свою очередь, X -бозон может поглотиться левополяризованным зеленым u -кварком ($q=+2/3$), который тогда перейдет в левый антикварк $\bar{u}$ антисинего цвета ($q = 2/3 + (-4/3) = -2/3$)
 - Этот $\bar{u}$ в комбинации с оставшимся u -кварком дают 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

Как искать?

Скорость распадов:

$$\Gamma = \frac{n_{obs}}{N_0} \frac{1}{\Delta t \epsilon B} = \frac{1}{\tau}$$

n_{obs} – число зарегистрированных событий распада

N_0 – число протонов в момент времени $t = 0$

Δt – время экспозиции

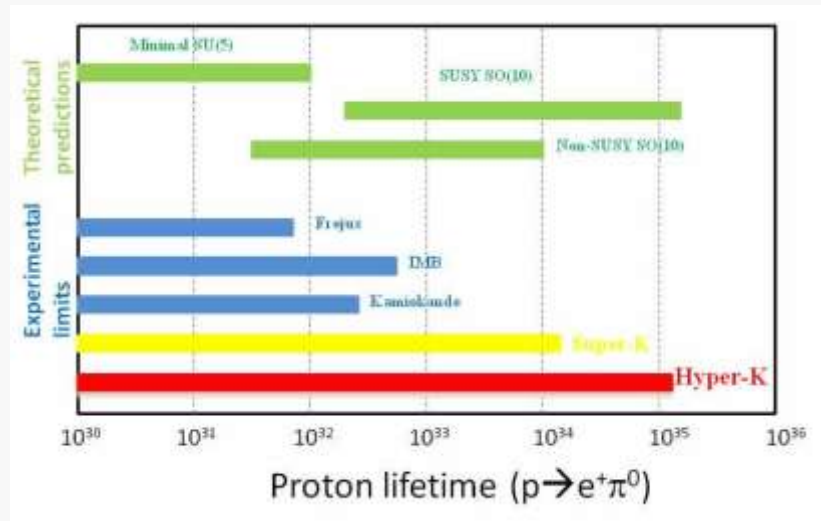
ϵ – эффективность регистрации

B – вероятность распада в искомый канал (branching ratio)

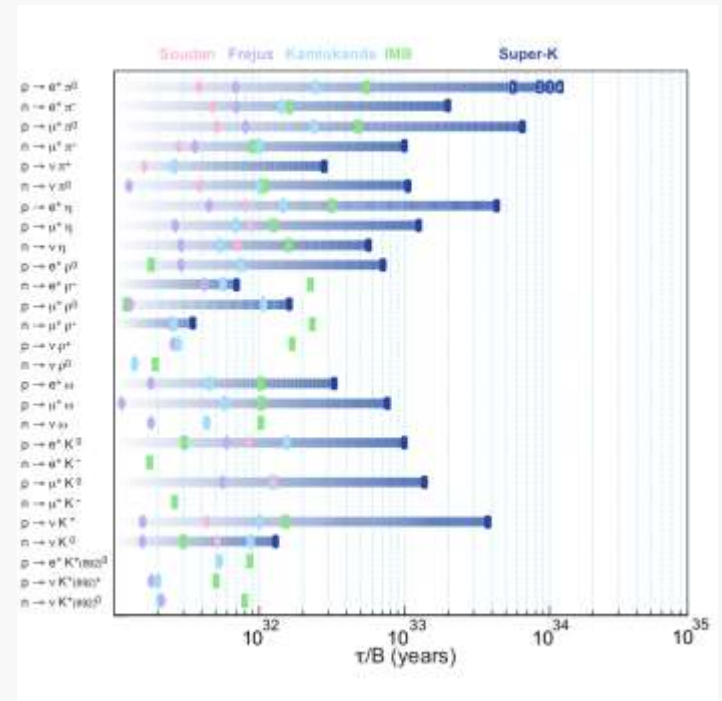
Таким образом, время жизни: $\frac{\tau}{B} = \frac{N_0 \Delta t \epsilon}{n_{obs}}$

- 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

Оценки и измерения времени жизни протона

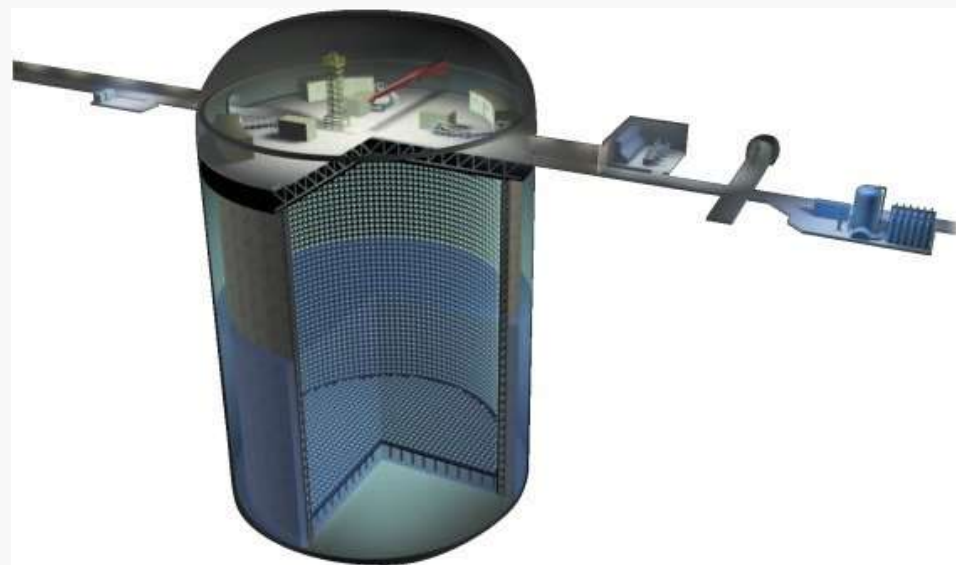


Каналы распада и современные ограничения

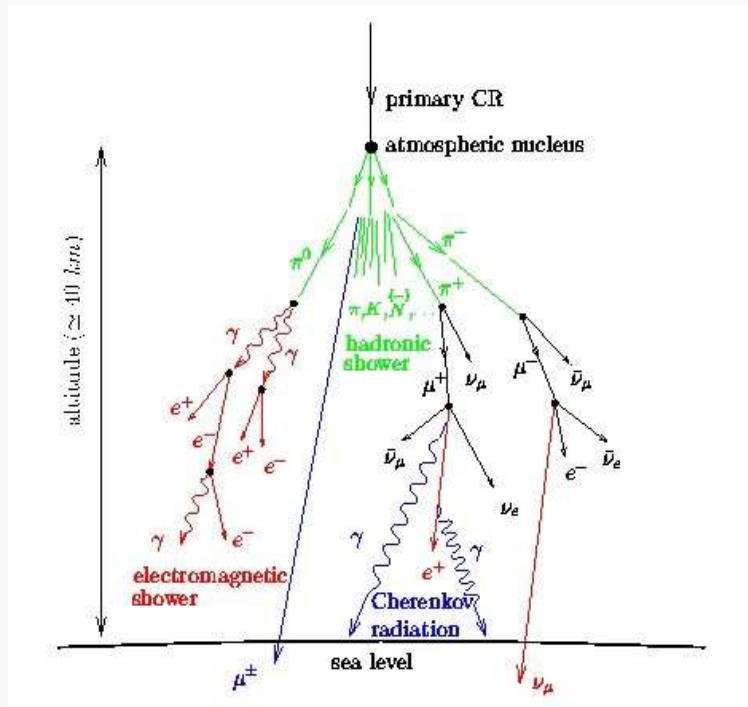


Super-KamiokaNDE

- Резервуар из нержавеющей стали в форме цилиндра;
- Высота 41,4 м, диаметр 39,3 м на глубине 1 км
- 50 кт очищенной воды
- Внутренний детектор – мишень для нейтрино:
 - 32 кт H_2O
 - 11146 20-дюймовых ФЭУ
- Внешний детектор – защита от γ -квантов и нейтронов извне:
 - 18 кт H_2O
 - 1885 8-дюймовых ФЭУ
- Внутренний и внешний детекторы разделены между собой двумя слоями пленки из полиэтилентерефталата
- Порог 5 МэВ
- Оптическое покрытие 40%



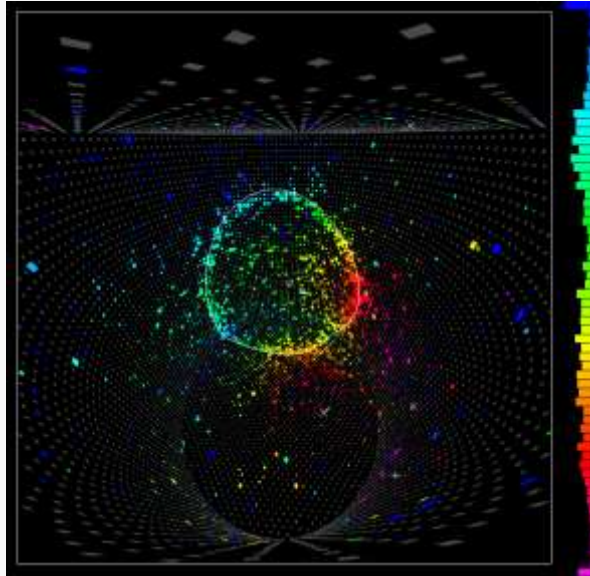
Фон от атмосферных нейтрино в поиске распада p



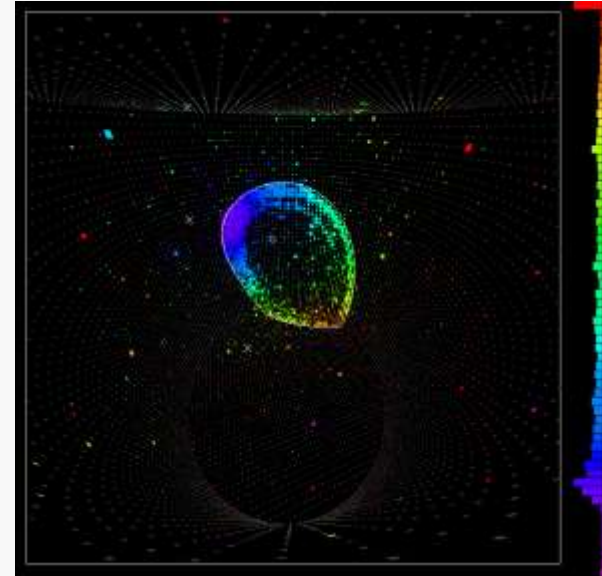
- Отношение ν_μ/ν_e должно быть ~ 2
 - $(\mu/e)_{\text{эксп.}}/(\mu/e)_{\text{теор.}} = 0.64$
- Для получения этого результата в Супер-К потребовалось разработать алгоритмы μ/e -дискриминации по форме черенковских колец
 - Они играют важную роль и в задачах поиска распада протона.
- Атмосферные нейтрино являются фоном по отношению к распаду протона:
 - для распадов $p \rightarrow e^+ \pi^0$:
 - $\nu_{e,\mu} + N \rightarrow N' + l^- + \pi^+ \text{'s}$
 - для распадов $p \rightarrow \tilde{\nu} K^+$:
 - $\nu_\mu + N \rightarrow N' + \mu^-$
 - $\nu_{e,\mu} + n(p) \rightarrow l^- (\nu_{e,\mu}) + \Lambda + K^+$
 - ...и др. процессы

е-подобные и μ-подобные черенковские кольца

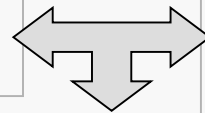
electron-like
event



muon-
like event



е: э/м ливень, многократное
кулоновское рассеяние



μ: распространяются почти
прямо, теряя энергию за счет
ионизационных потерь

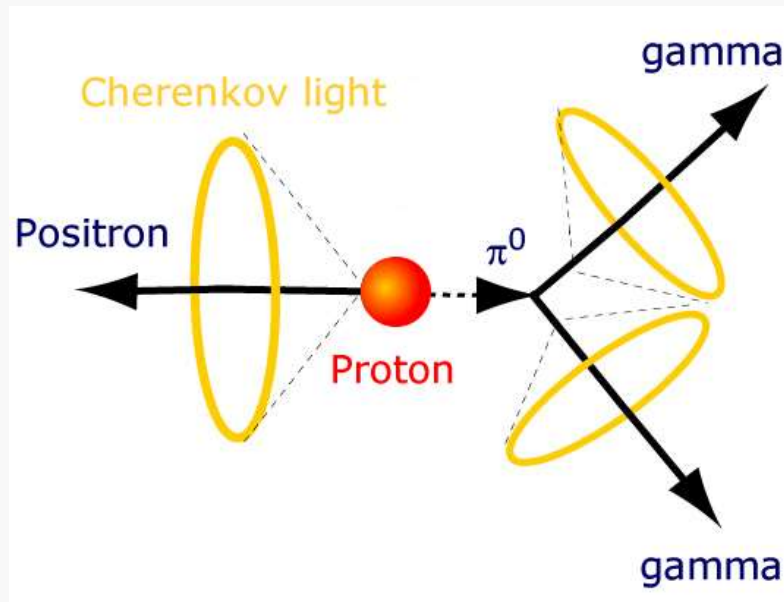
Particle ID

Разница в схеме событий

$$\chi^2 = \sum_{\theta < 70 \text{deg}} \left(\frac{p.e.(obs'd) - p.e._{e \text{ or } \mu}(expected)}{\sigma_{p.e.}} \right)^2$$

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

В системе покоя протона:



$$E_{\pi^0} = \frac{m_p^2 + m_{\pi^0}^2 - m_e^2}{2m_p}$$

$$E^2 = p^2 + m^2$$

$$m_p = 938 \text{ МэВ}$$

$$m_e = 0.5 \text{ МэВ}$$

$$m_{\pi^0} = 135 \text{ МэВ}$$

$$p_\pi = p_e = 469 \text{ МэВ/с}$$

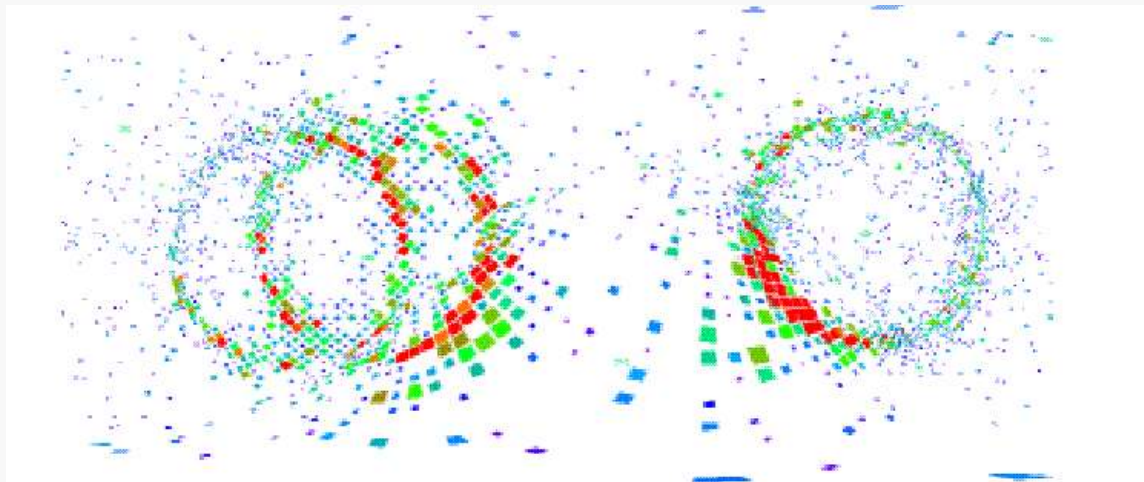
Распад по каналу $p \rightarrow e^+ \pi^0$

$$p \rightarrow e^+ + \pi^0$$

$$\pi^0 \rightarrow 2\gamma$$

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 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.

MC:



Анализ экспериментальных данных

- 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 и приводили к нарушению баланса восстановленных импульсов:
 - *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
 - *Протон в ядре обладает определенным импульсом*

Условия отбора событий

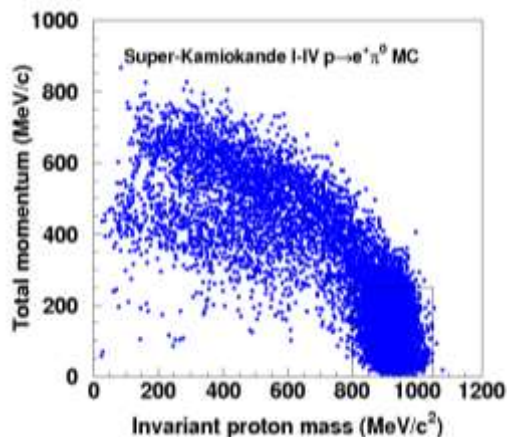
- $6000 < Q_{\text{полный}} < 9500$ ф/электронов
 - Позволяет сразу исключить большое число фоновых событий
- 2 или 3 e-like черенковских кольца
 - Три – идеальный, неискаженный случай распада протона, два – т.к. энергия одного из фотонов может оказаться ниже черенковского порога
- $85 < M_{\pi} < 185$ МэВ/с² (в двух кольцах при трех зарегистрированных)
- $800 < M_p < 1050$ МэВ/с²
- Полный импульс $P_{\text{tot}} = \left| \sum_i \vec{P}_i \right| < 250$ МэВ/с (импульс Ферми для ядра ¹⁶O)

Результаты (полный импульс vs. полная инвариантная масса)

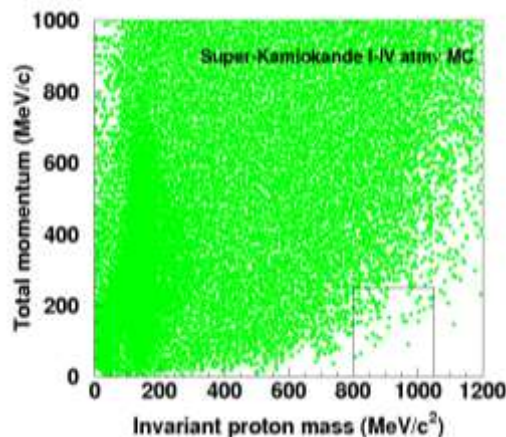
- Статистика 205.7 кт·год
- Ни одного события не найдено
- $\tau > 1.21 \cdot 10^{34}$ лет (90% C.L.)

Здесь мог быть
распад протона

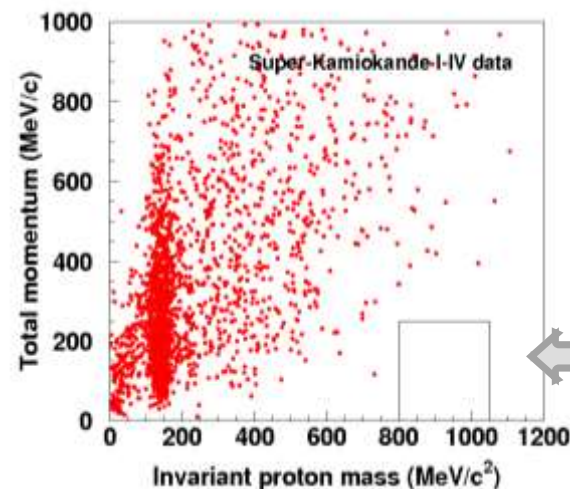
Signal MC



BKGD MC

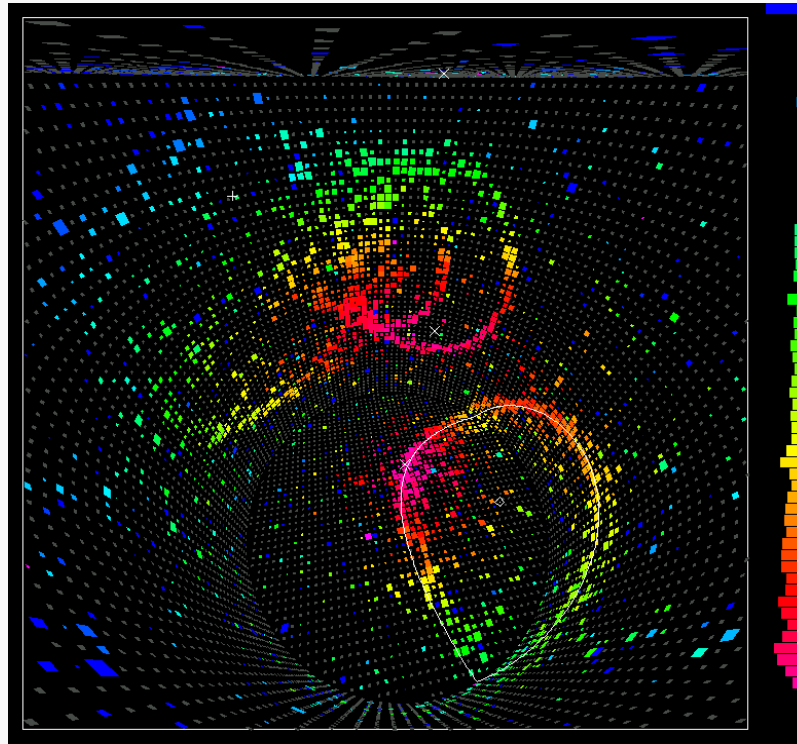


Data



Пример события-кандидата

Это событие было одним из близких кандидатов на распад протона на e^+ и p^0 .
 p^0 распадется на два γ -кванта, которые образуют перекрывающиеся нечеткие кольца.
 e^+ и p^0 летели бы в противоположных направлениях.
Это реальное событие (не Монте-Карло), записанное 24.09.1997, 12:02:48. Его обнаружил Бретт Вирен, но он не прошел проверку.



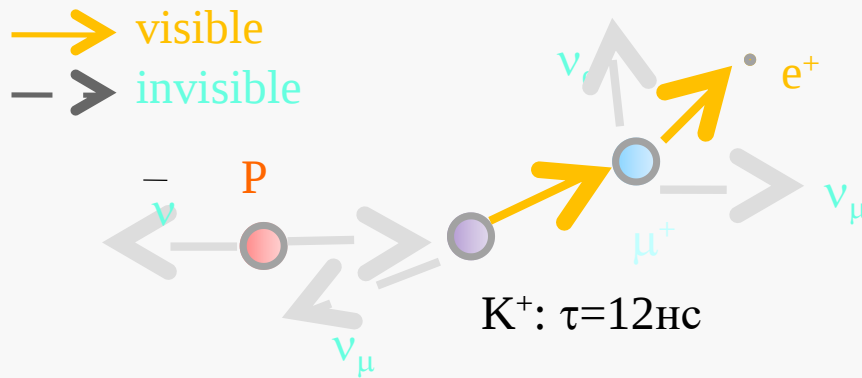
Распад по каналу $p \rightarrow \tilde{\nu} K^+$

- Анализ основан на поиске продуктов распада K^+
 - *Нейтрино уносит часть энергии протона, так что уже нельзя восстановить его массу по продуктам распада*
- Сценарий А: $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$ (вер-ть 64%)
 - *A1: свободный протон*
 - *A2: связанный в ^{16}O протон*
- Сценарий Б: $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0$ (вер-ть 21%)

Model	Prediction, years
Minimal SUSY SU(5)	$\leq 10^{30}$
SUGRA SU(5)	$10^{32} - 10^{34}$
SUSY SO(10)	$10^{32} - 10^{34}$

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

A1: $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$, свободный протон



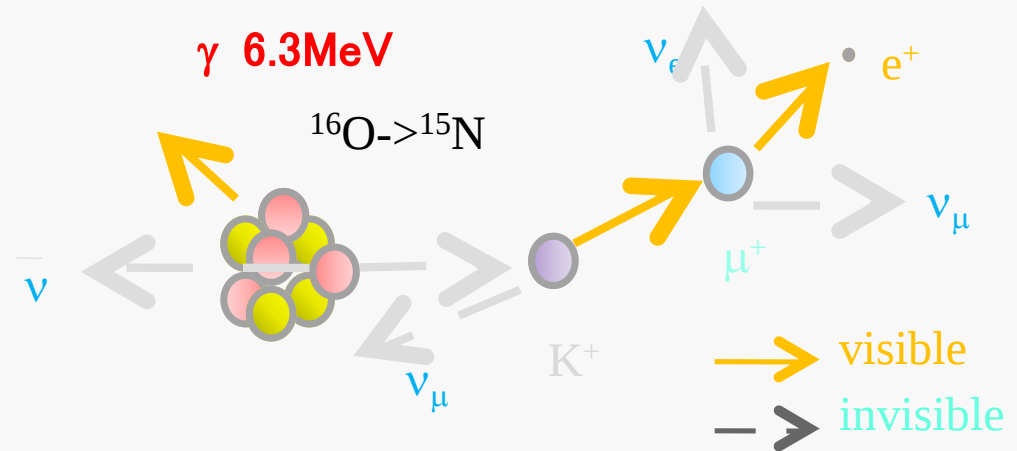
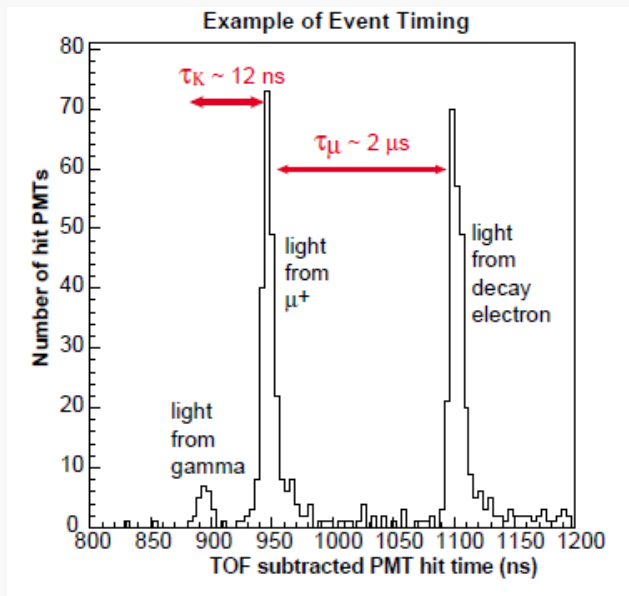
K^+ нерелятивистский (импульс ниже черенковского порога).
 K^+ останавливается и распадается на μ^+ ($P = 236 \text{ МэВ/с}$) и ν_μ (вероятность распада по этому каналу 64%)

Что ищем в данных:

- 1 μ -like кольцо + распадный электрон от распада мюона

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

A2: $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$, связанный протон



В результате распада протона в ядре ^{16}O образуется ^{15}N в возбужденном состоянии ($E_\gamma = 6.3 \text{ МэВ}$, вероятность 41%)
 $\Rightarrow$ TFC (three-fold coincidence)

Что ищем в данных:

- e-like кольцо от гамма-кванта
- 1 μ -like кольцо + электрон от распада мюона

Условия отбора событий

■ A1:

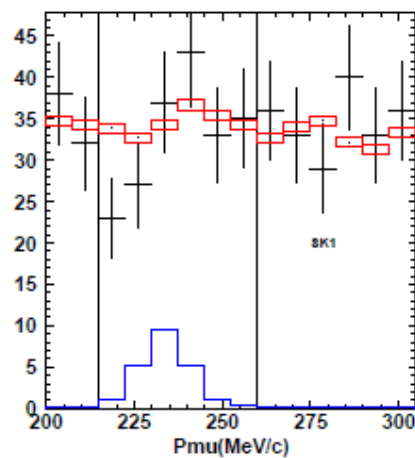
- 1 μ -like черенковское кольцо
- 1 e -like кольцо (электрон от распада мюона)
- $215 < P_{\mu} < 260$ МэВ/с

■ +A2:

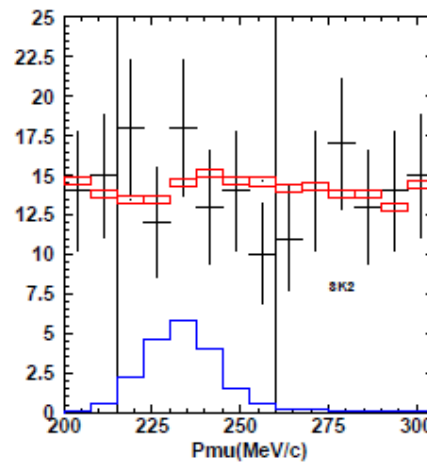
- $N_{\text{фэу}}$ для первого события:
 - ≤ 60 для SK-I, III, IV (≤ 30 для SK-II)
- $12 < t_{\text{фэу}} < 120$ нс до мюонного события

Результаты (A1)

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



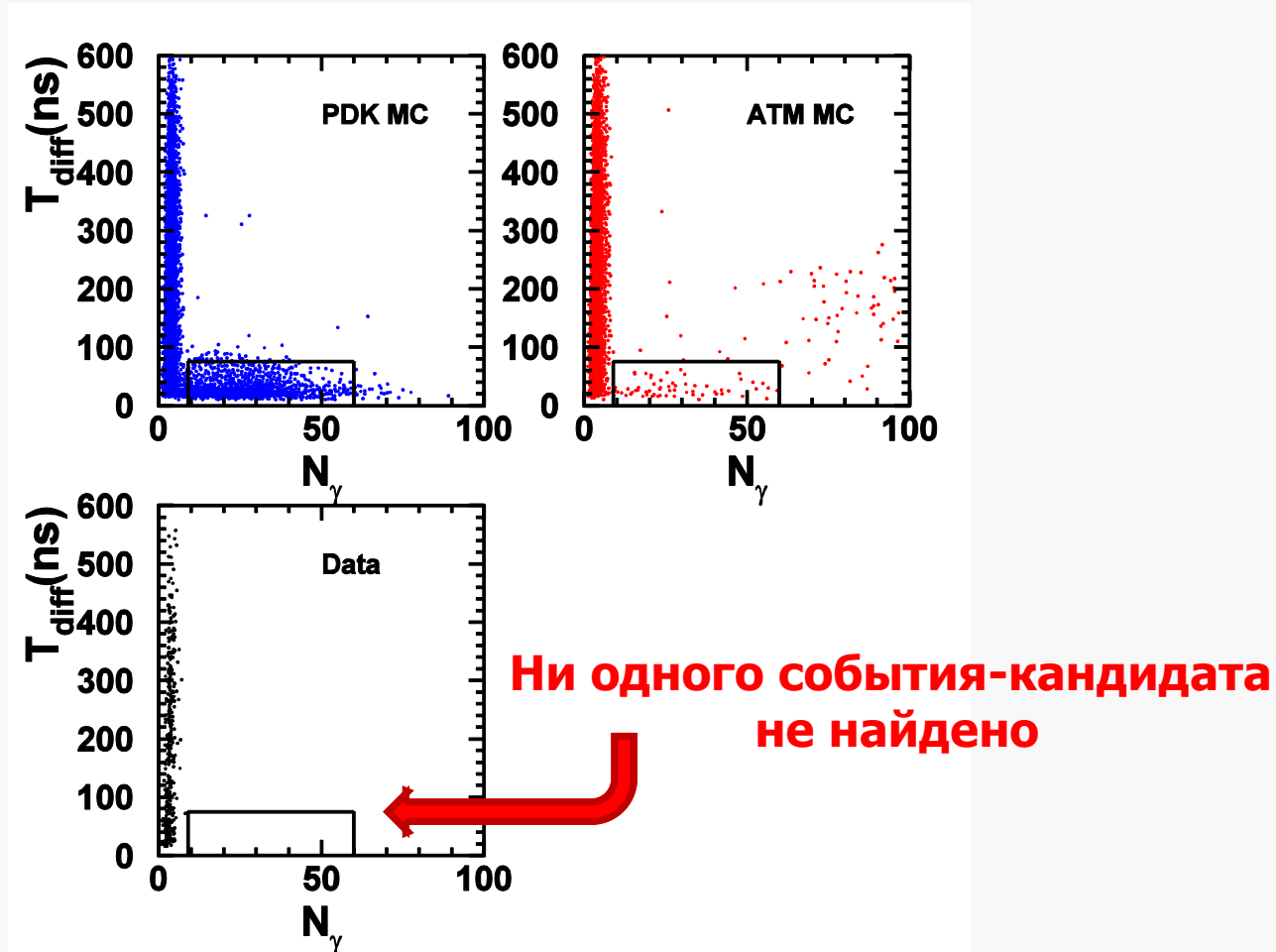
(a) SK-1



(b) SK-2

Fig. 1: Momentum distribution of FC1R μ -like sample of SK-1 (left) and SK-2(right). Cross dots are data, boxes are atmospheric neutrino MC, and histograms are proton decay MC.

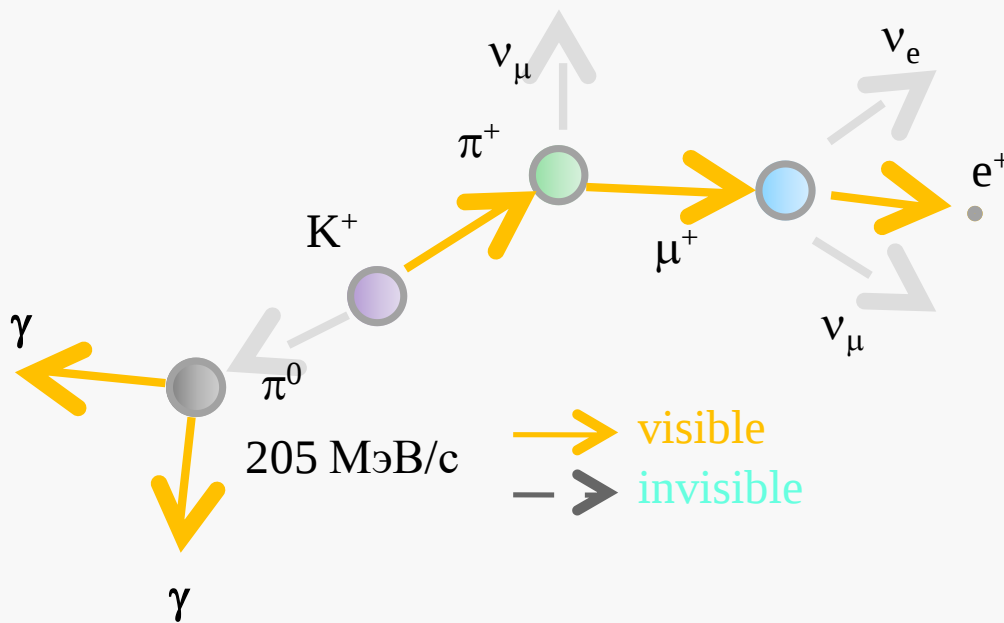
Результаты (A2)



Ограничение на время жизни: $> 3.9 \times 10^{33}$ лет (90% C.L.)

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

Б: $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0$



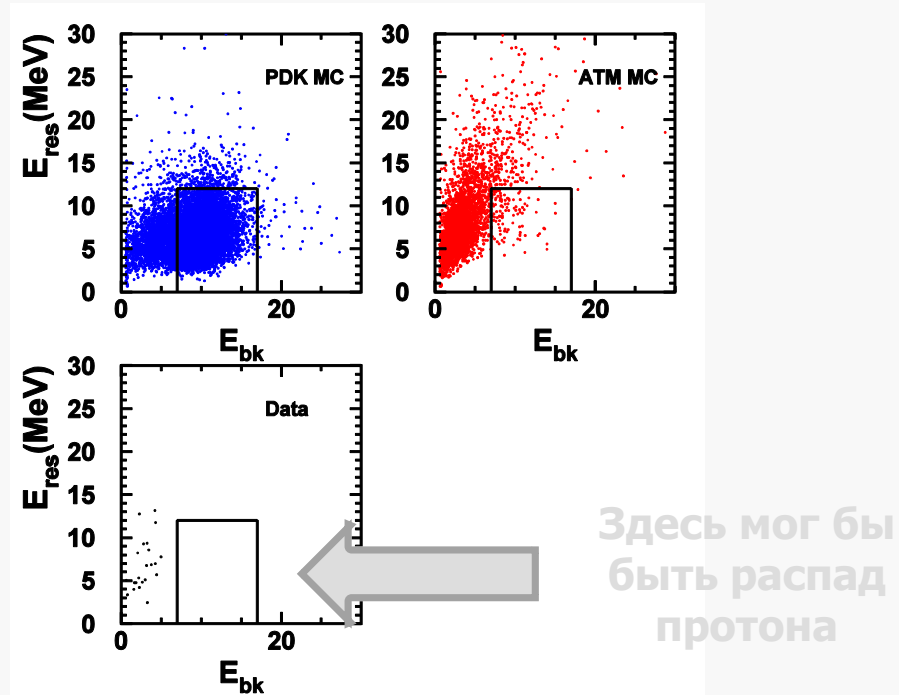
- Вероятность этого канала распада: 21%.
- π^0 и π^+ вылетают в противоположных направлениях с импульсами 205 МэВ/с .
- Импульс π^+ на уровне черенковского порога

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

Условия отбора событий

- 2 e-like черенковских кольца (π^0)
- 1 e-like кольцо от распада мюона (e^+)
- $85 < M_{\pi^0} < 185 \text{ МэВ}/c^2$
- $175 < P_{\pi^0} < 250 \text{ МэВ}/c$
- $40 < Q_{\pi^+} < 100 \text{ ф/электронов}$

Результаты



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

Гипер-Камиоканде

- Детектор будет иметь резервуар с миллиардом литров сверхчистой воды — в 20 раз больше, чем резервуар для Супер-Камиоканде. Это увеличение мощности будет сопровождаться пропорциональным ростом количества датчиков. Бак будет представлять собой двойной цилиндр длиной 2×250 метров, поперечником примерно 40×40 метров.
- В качестве одной из научных целей намечена надежда на первое наблюдение распада протона.

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!