

Новые отечественные и зарубежные  
установки физики космических  
лучей и решаемые проблемы.



# Космические лучи

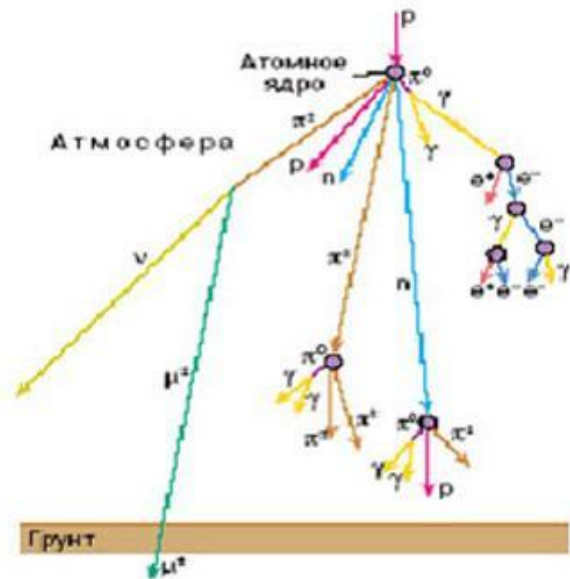


Рис. 5. Схема ядерно-каскадного процесса в атмосфере. В результате соударения протона космических лучей с ядром атома воздуха образовались  $\pi^+$  и  $\pi^-$ -мезоны.  $\pi^0$ -Мезон породил электронно-фотонный ливень (показан в правой части рисунка).  $\pi^+$ -Мезоны генерировали новый  $\pi^0$ -мезон и заряженные  $\pi^+$ -мезоны второго поколения, часть  $\pi^-$ -мезонов распалась, породив мюоны. Протон очень высокой энергии способен породить в атмосфере Земли десятки поколений и образовать миллионы и миллиарды вторичных частиц, генетически связанных между собой, — так называемые широкие атмосферные ливни

- Космические лучи были открыты Виктором Гессом в 1912 г. во время полета на воздушном шаре. Благодаря тому, что Земля обладает атмосферой, они представляют собой альтернативный ускорителем способ наблюдения элементарных частиц и взаимодействий между ними. В 30-х годах прошлого века Пьер Оже открыл широкие атмосферные ливни космических лучей (ШАЛ).

# Развитие ядерного каскада

- В ШАЛ происходит развитие ядерного каскада от первичной частицы высокой энергии, налетающей в атмосфере Земли на ядро атома воздуха. Число частиц в ШАЛ, например на уровне моря в районе Москвы, составляет примерно 2 млн. Схема ШАЛ напоминает треки частиц в камере Вильсона. Четко выделяются 3 составляющих ливня – от электромагнитных взаимодействий (электромагнитный каскад), каскады от сильных и слабых взаимодействий.

- Существуют 2 основных способа регистрации частиц – 1) регистрация сцинтилляционными детекторами, когда ливень частиц рождает в веществе-сцинтилляторе электрон-фотонную пару, и 2) регистрацию частиц по черенковскому излучению (ИЧ), излучаемому частицами, движущимися со скоростью, большей скорости света в среде. Длина волны ИЧ лежит в видимой части спектра, поэтому основную часть черенковского детектора образуют зеркала, регистрирующие этот свет. Оба способа регистрации имеют свои плюсы и минусы и должны взаимно дополнять друг друга. Еще один тип детекторов – детекторы типа "глаз мухи" – улавливают излучение атомов азота в атмосфере, возникающее при прохождении ШАЛ, с помощью трубок фотоэлементов.

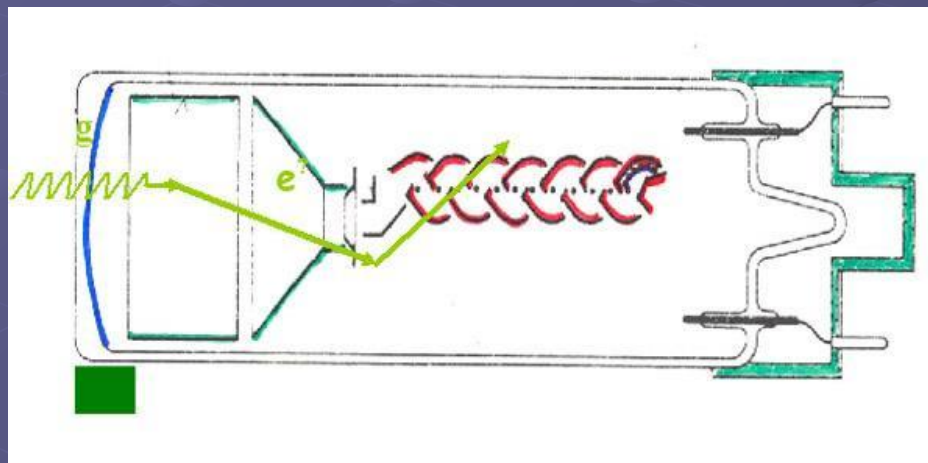


Рис. 2. Сцинтилляционный детектор с фотокатодом, сцинтиллятором и системой промежуточных динодов усиления.

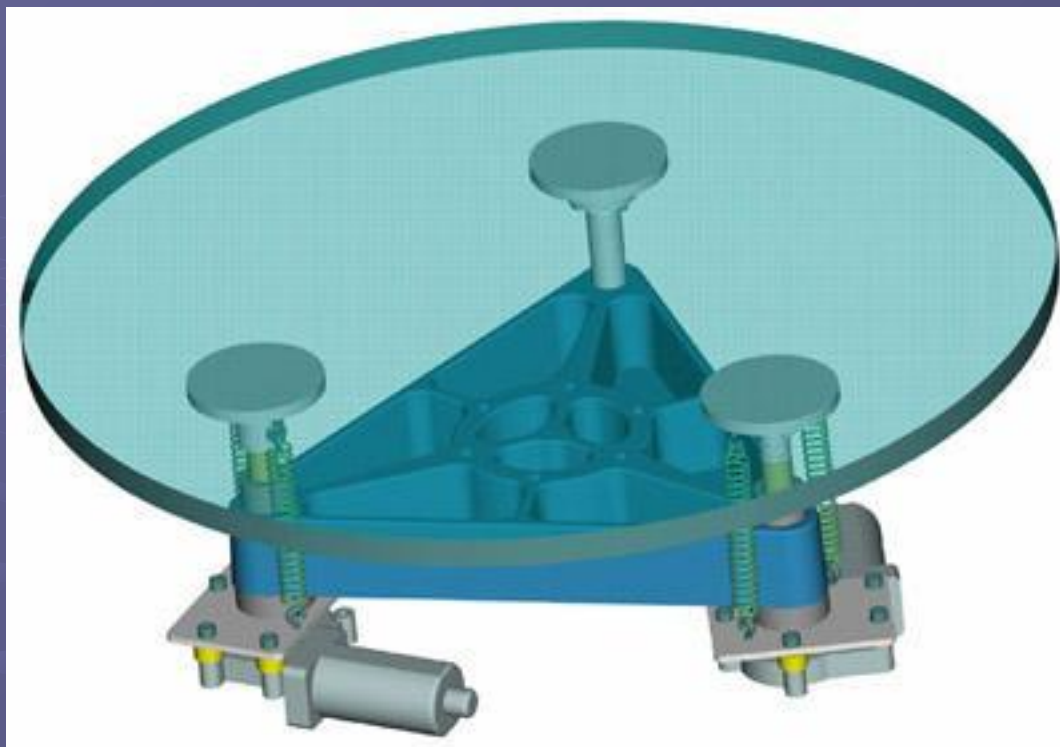


Рис. 3 Зеркало черенковского детектора.

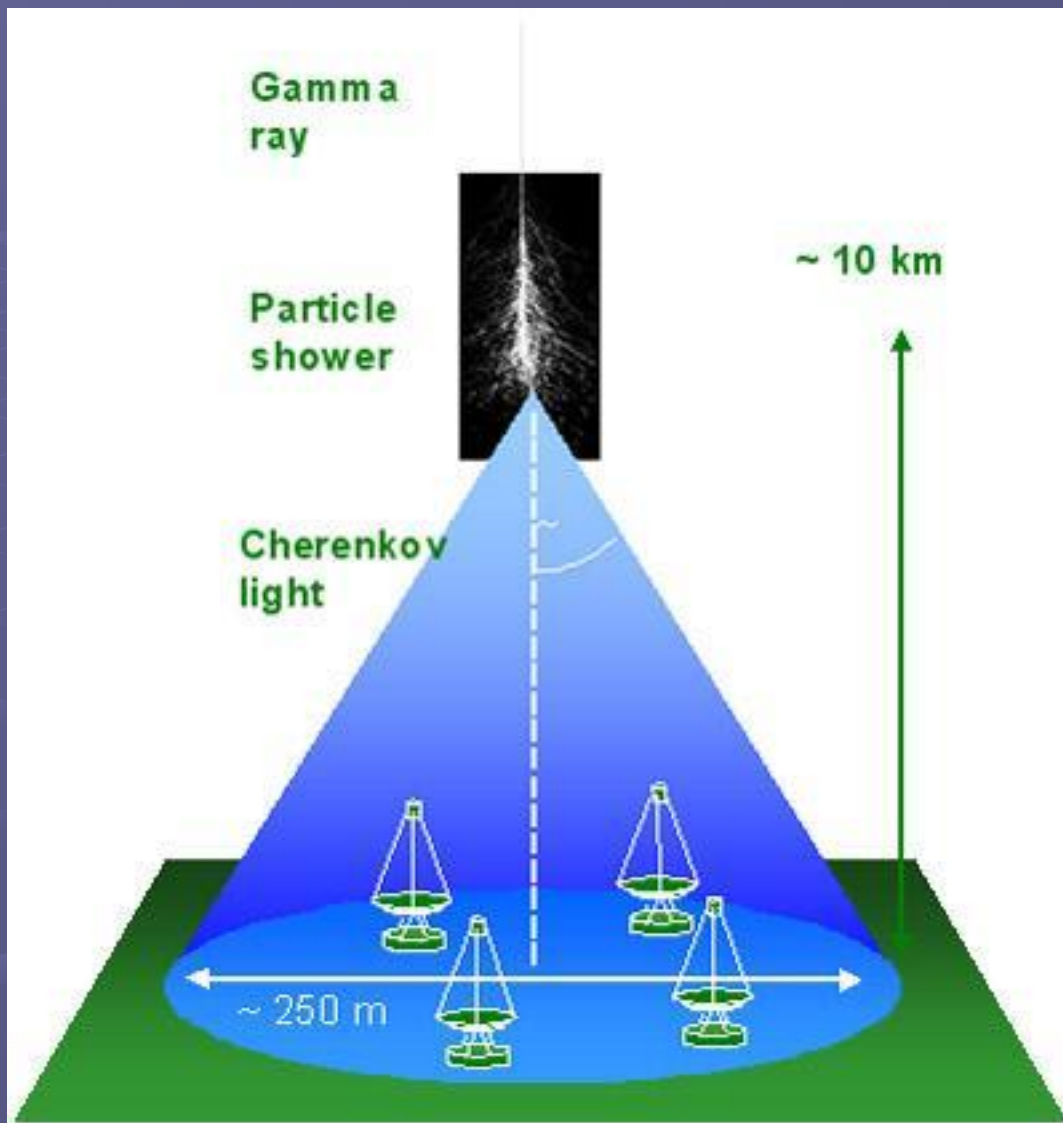


Рис. 4. Конус черенковского излучения частицы в атмосфере.

# Сети установок

- В современном мире существуют сети установок с преимущественно сцинтилляционными и преимущественно черенковскими детекторами, которые либо уже построены, либо находятся в стадии строительства. Сцинтилляционные детекторы установлены в европейской обсерватории Гран Сассо (итальянские Альпы), в Баксанской Нейтринной Обсерватории (БНО), в китайской обсерватории "Тибет", самой высокогорной обсерватории в мире "Чакалтая" (Колумбия – 6200 м над уровнем моря). Черенковские детекторы установлены в Байкальской Нейтринной обсерватории, средиземноморских подводных обсерваториях, на Южном Полюсе (установка "Аманда"), самой большой в мире обсерватории "Пьер Оже" (Аргентина), японской обсерватории "Суперкамиоканда".

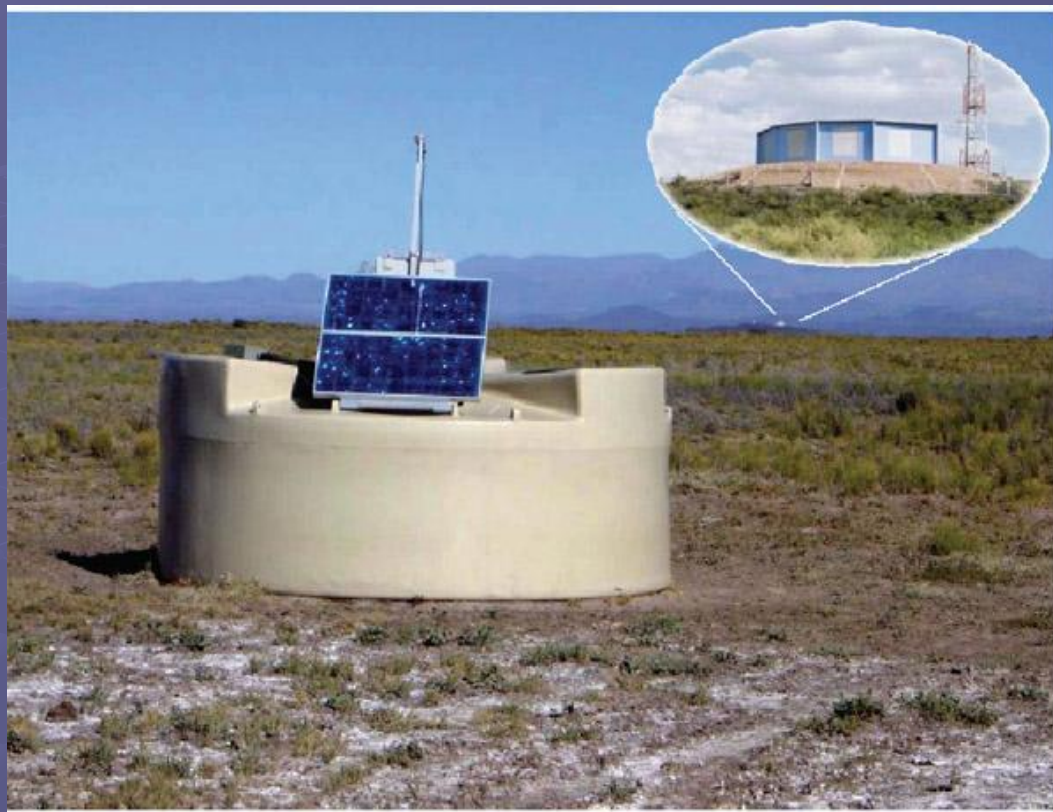


Рис. 5. Черенковский детектор обсерватории "Пьер Оже". На холме расположен телескоп типа "глаз мухи".





Рис. 6. Принципиальная схема детектирования ШАЛ в обсерватории Всемирная сеть гамма-телескопов.

# Все эти установки детектируют черенковский свет от гамма-лучей.

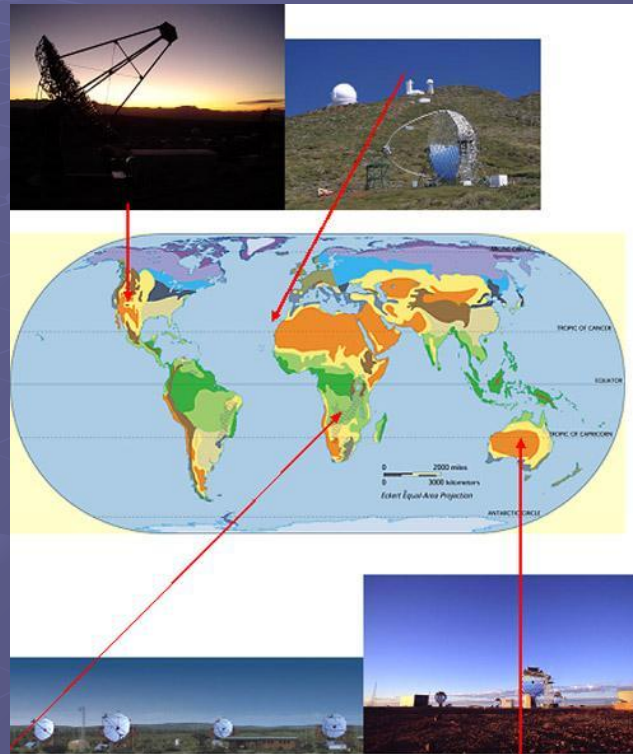


Рис. 7. Телескопы сети расположены в Северной Америке (Коллаборация VERITAS – каньон Китт Пик – обсерватории WHIPPLE), телескоп MAGIK на Канарских островах, коллаборация HESS в Южной Африке, японский телескоп KANGUROO в Австралии.

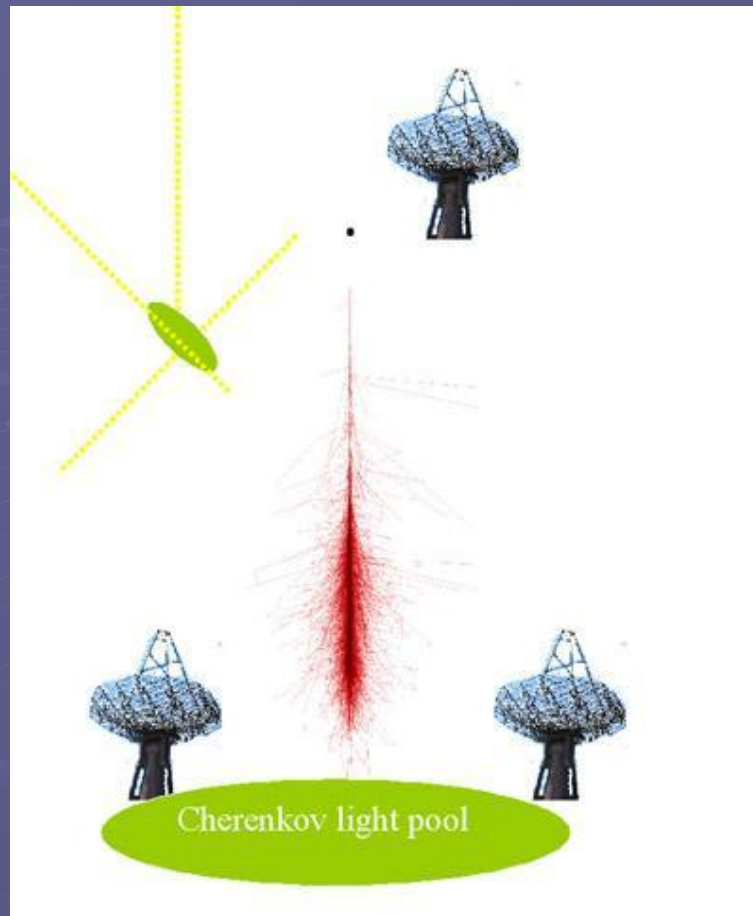


Рис. 8. Принципиальная схема детектирования гамма-лучей телескопами коллаборации VERITAS.

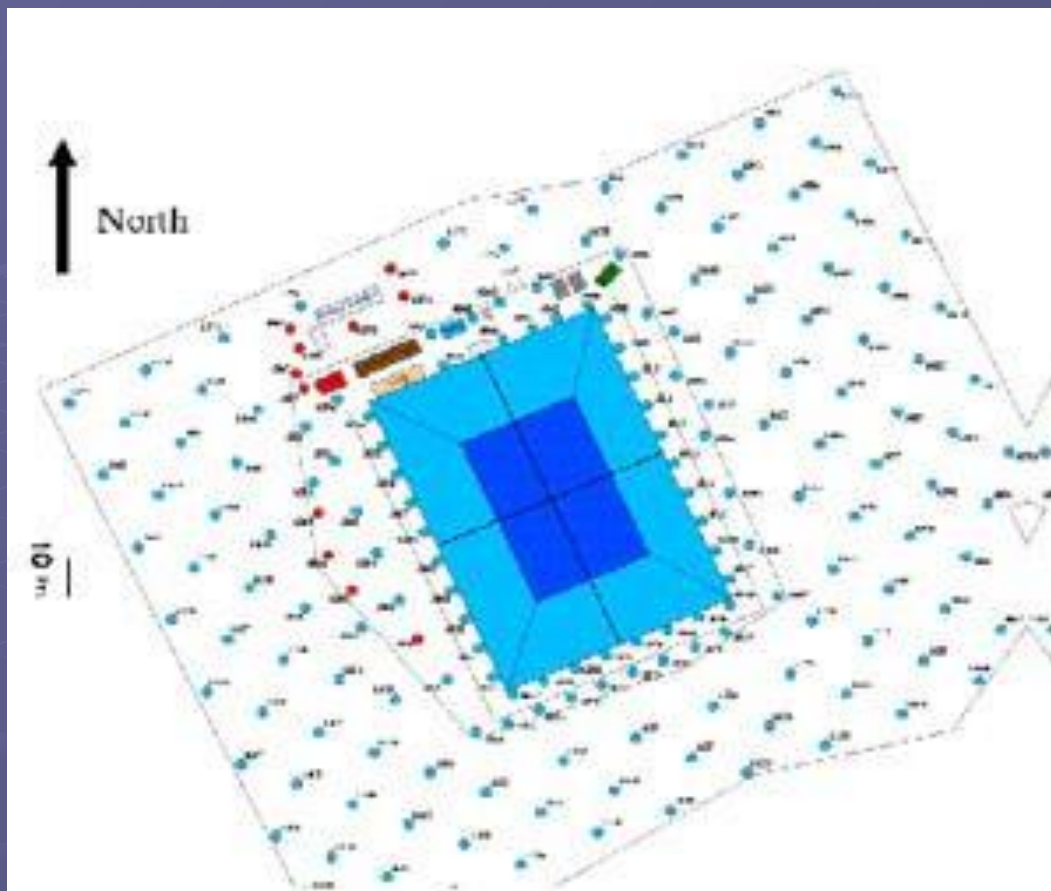
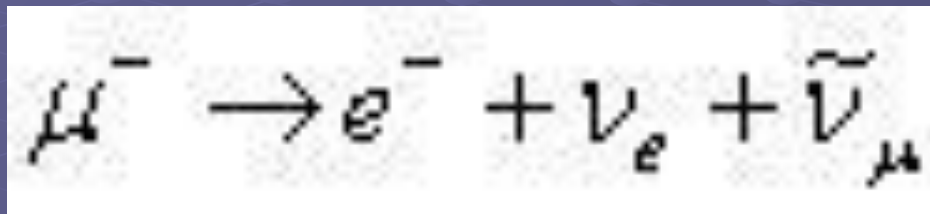


Рис. 9. Эта обсерватория представляет собой водный многослойный бассейн 8-ми метровой глубины, оборудованный черенковскими детекторами. Нейтринные телескопы регистрируют нейтрино косвенным образом по продуктам распада этих нестабильных частиц. Наиболее долгоживущей фракцией распада нейтрино являются заряженные мюоны, длина пробега которых в атмосфере Земли достигает сотен метров. Именно их регистрируют детекторы телескопов.

# Схема слабого распада мюонов



- Схема слабого распада мюонов опять включает нейтрино, которые не регистрируются непосредственно. Электроны образуют в атмосфере фон, препятствующий регистрации. Время жизни мюона  $\tau \sim 2.2 \times 10^{-6}$  с. За это время он должен быть зарегистрирован детекторами. Сеть современных нейтринных телескопов, работающих с ИЧ, покрывает весь мир.

# The Neutrino Telescope World Map



27.09.2004

U. Katz: Fishing for Neutrinos

3

Рис. 10. Сеть работающих и строящихся черенковских нейтринных телескопов. Телескопы сети позволяют продвигаться в область высоких энергий и исследовать законы физики в данной области.

# Нейтринное окно во Вселенную.

- Человечество открыло новое – нейтринное окно во Вселенную. Основная цель проводимых исследований – фундаментальная физика. Возможная прикладная цель – борьба за новые неизвестные сейчас источники энергии.

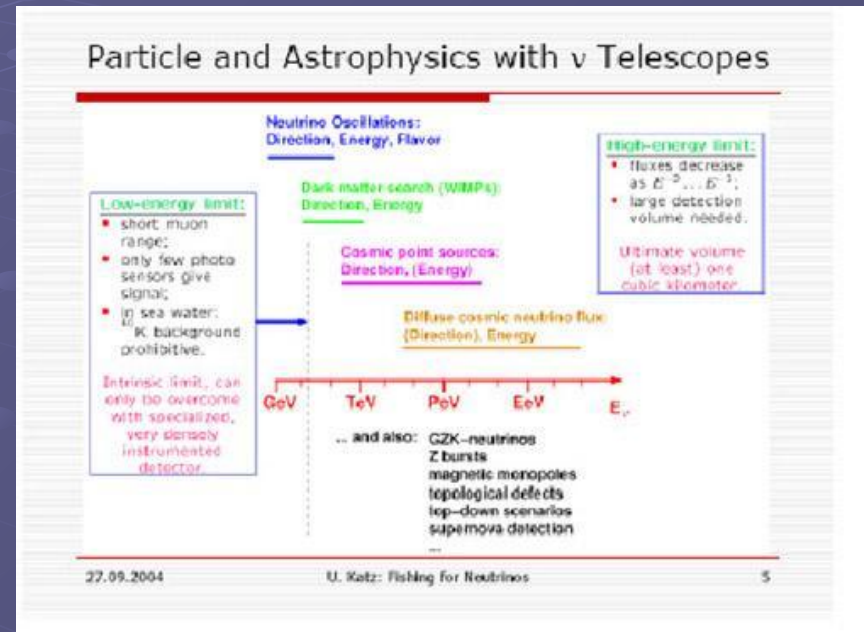


Рис. 11. Шкала энергий, подвластных нейтринным телескопам. 1 GeV = 1 млн. эВ. В районе станции Амундсен–Скотт на Южном полюсе находятся строящийся детектор Ice Cube и работающий нейтринный детектор "Аманда".

# Другие установки

Следующий шаг в эксперименте по КЛ УВЭ – создание космических оптических детекторов. Два направления: «телескоп» и «широкоугольная камера». Принцип действия- наблюдение флуоресцентного и рассеянного черенковского света ШАЛ.

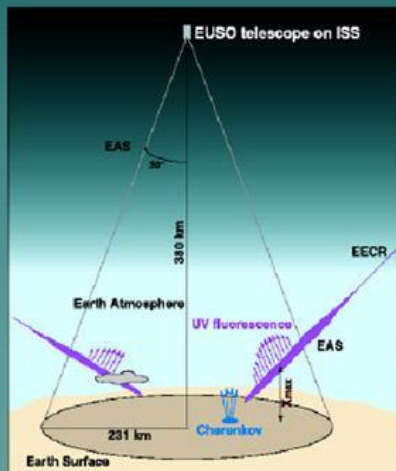


Рис. 12. Детектирование ШАЛ из космоса.

Коллаборация Ice Cube (станция Амундсен–Скотт)

- Интенсивно разрабатываются проекты других установок, основанных на принципиально новых методах регистрации. Так, нагретый канал ливня излучает радиоволны (излучение Аскарьяна). Опыты по его регистрации проводятся международной коллаборацией на Южном полюсе. Акустические волны от ШАЛ регистрируются в океане системой гидрофонов, которая была создана в годы "холодной войны" для защиты от подводных лодок. Эти методы не являются сегодня точными методами. Исследования в этом направлении носят поисковый характер.



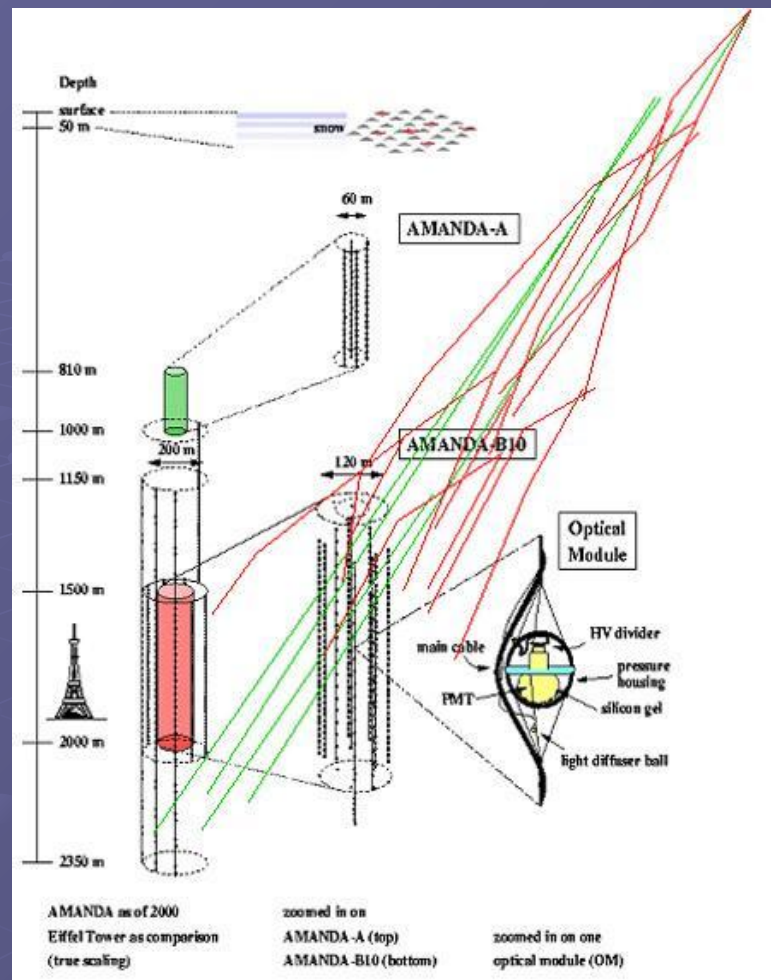


Рис. 13. Схемы установок АМАНДА и Ice Cube на Южном полюсе. Для сравнения приведен рисунок эйфелевой башни.

# Обнаружение осцилляций нейтрино



Лептоны  $J=1/2$

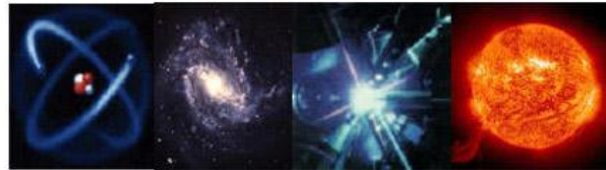
$e^-$	$\mu^-$	$\tau^-$
0.511 МэВ	105.7 МэВ	1777 МэВ
$\nu_e$	$\nu_\mu$	$\nu_\tau$
< 3 эВ	< 0.19 МэВ	< 18.2 МэВ



Raymond Davis Jr.  
р. 1914



Masatoshi Koshiba  
р. 1926



### Нобелевская премия по физике

**2002 г. — Р. Дэвис, М. Косиба**  
За вклад в астрофизику, в частности за  
детектирование космических нейтрино.

#### Neutrino Flavor Mixing

■ What if neutrinos  
mixed?

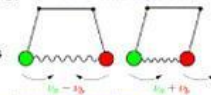
□ "normal modes"  
not  $a$  or  $b$   
but a mix.

■ We have  
learned this  
phenomenology!

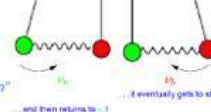
This is called  
"neutrino flavor oscillation"

$a \rightarrow b \rightarrow a$

Normal Modes of Coupled Pendula



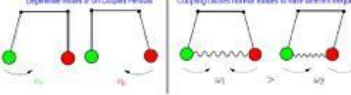
If you prepare the system in state  $a$ ...



... and then returns to  $a$

#### The Role of Neutrino Mass

■ There is an important condition for oscillation...



... the masses of the different mass eigenstates  
must be distinct!

Рис. 14. Механическая модель нейтринных осцилляций на примере системы связанных маятников.

# Установка "Суперкамиоканде"

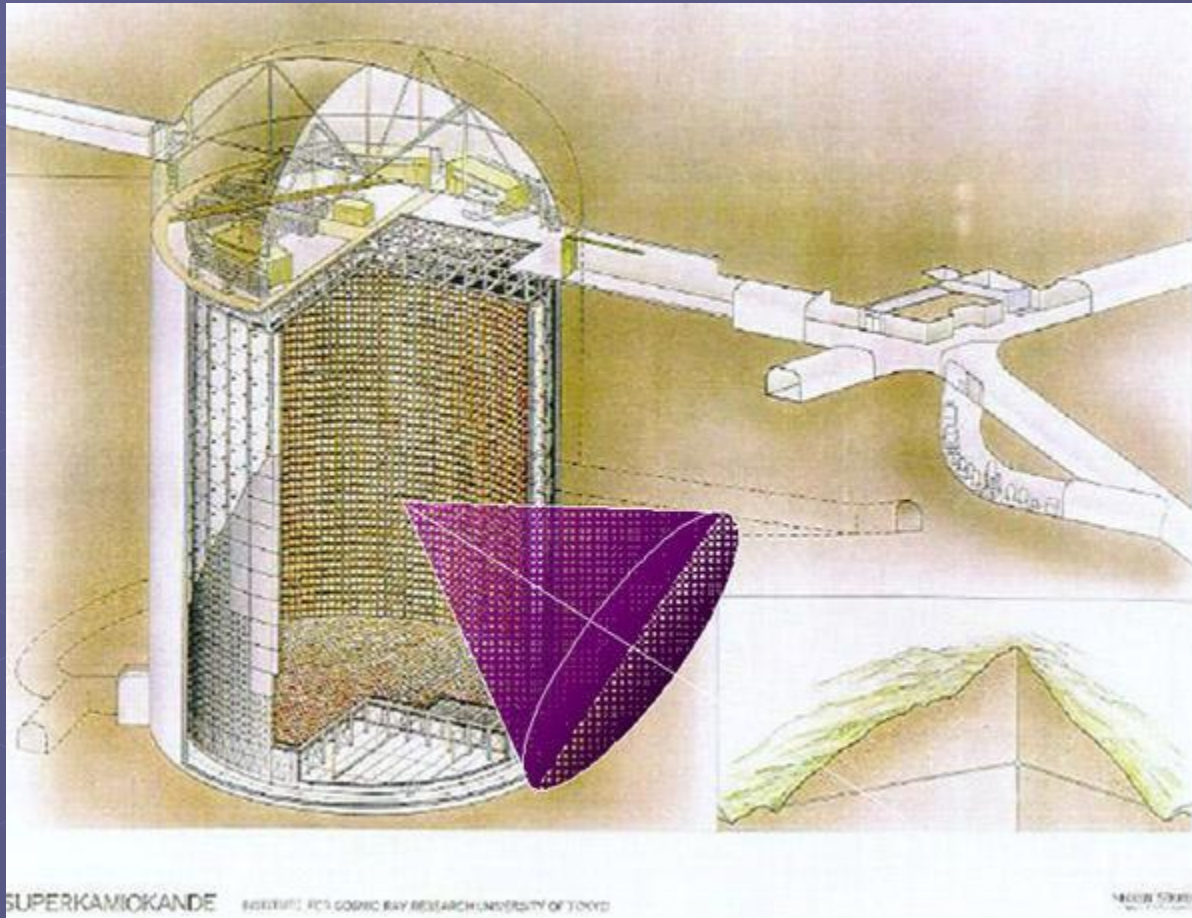


Рис. 15. Черенковский конус от мюона попадает на детекторы установки "Суперкамиоканде", изображенной в разрезе.

# "Суперкамиоканде"

- Установка "Суперкамиоканде" находится близ местечка Камиока в Японии. Она представляет собой большой цилиндрический бак с водой, на стенках и торцах которого установлены черенковские детекторы. На этой установке была доказана гипотеза об осцилляциях нейтрино различных ароматов (подобно системе связанных маятников). За это открытие руководитель коллектива экспериментаторов Масатоши Кошиба вместе с классиком физики космических лучей Раймондом Девисом получил в 2002 г. нобелевскую премию по физике.



Рис. 16. Гора Андырчи, в районе которой находится  
БНО ИЯИ РАН.

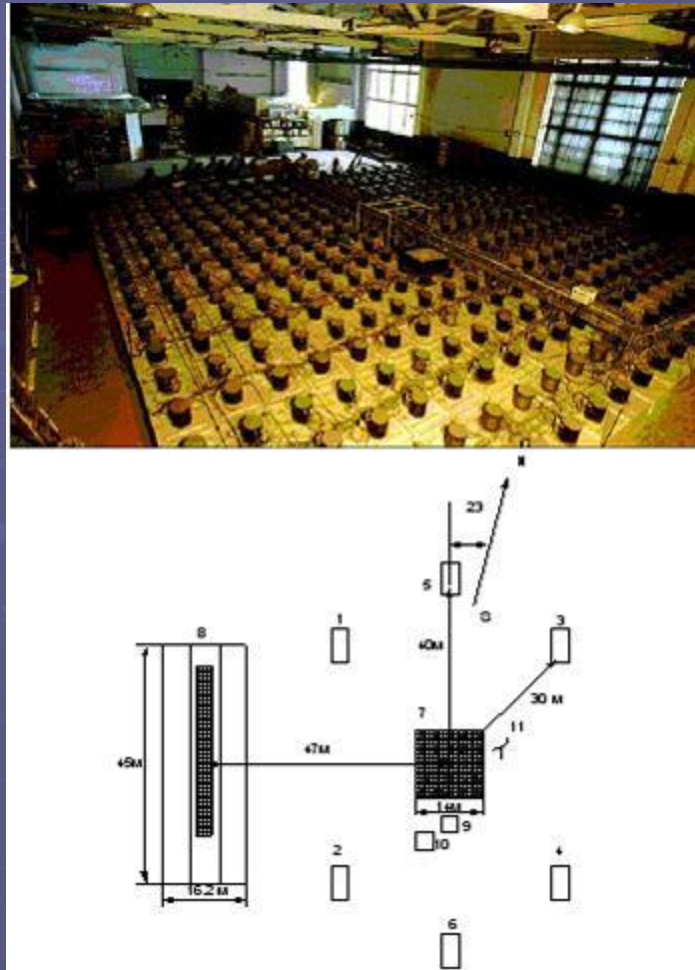


Рис. 17. Установка "Ковер-2" и ее принципиальная схема.

# "Ковер-2"

- Под установкой "Ковер-2" находится туннель с мюонным детектором, который предполагается увеличить. Установка "Ковер-3" новой международной коллаборации представляет собой правильный 6-ти угольник площадью 2 кв. км. Расстояние между детекторами нового "Ковра" составит 4 см., тогда как на установке "Пьер Оже" оно составляет 300 м. Это позволит сосредоточить в малом объеме установки мощные современные детекторы, мониторирующие ШАЛ с той же высокой точностью без потери информации о нем за счет пустот между детекторами. Установка предполагается многоэтажной, что еще более повышает ее чувствительность по сравнению с зарубежными аналогами. В ее состав войдут 16 калибровочных черенковских телескопов для точного измерения треков мюонов и детекторы тепловых нейтронов для измерения адронной компоненты ШАЛ. Ориентировочная дата пуска 2011 – 2012 гг.



# Астрофизические объекты высоких энергий



Рис. 18. Активные ядра галактик, ускоряющие частицы до  $E \sim 10^{21}$ .

# Космические объекты

- Космические объекты способны развивать энергетику, порождающую излучение ультравысоких энергий. Понять механизм этого излучения — одна из задач современной физики.

# Черные дыры

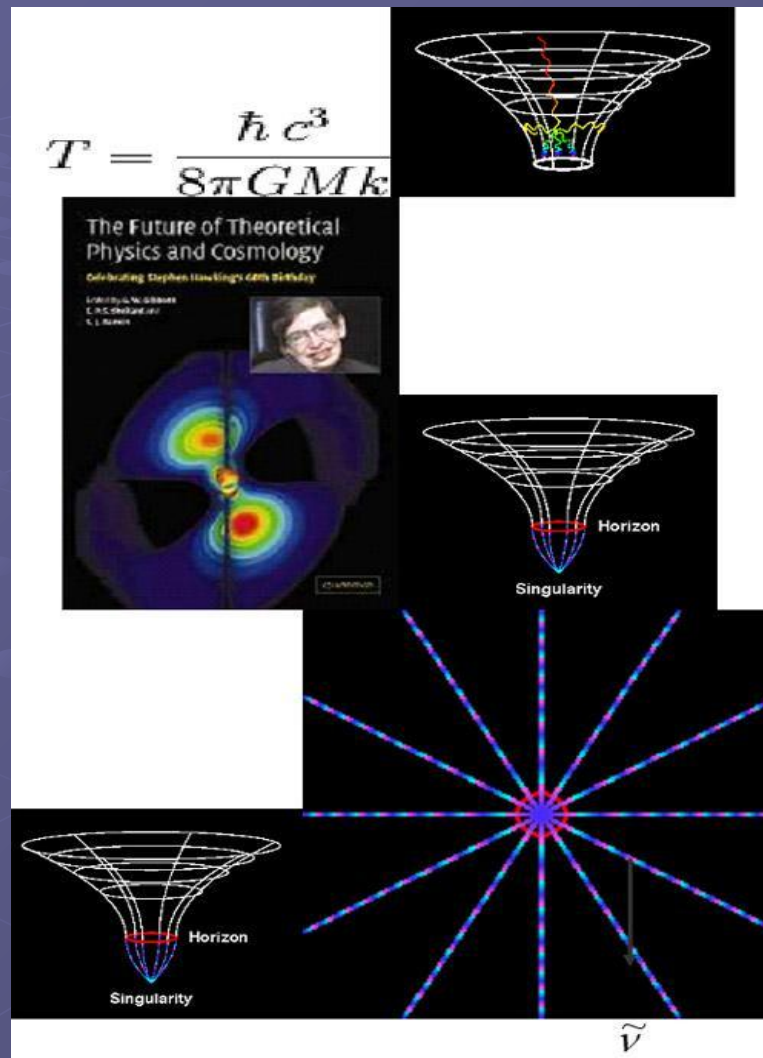


Рис. 19. Оптическое излучение черных дыр сопровождается излучение нейтрино.

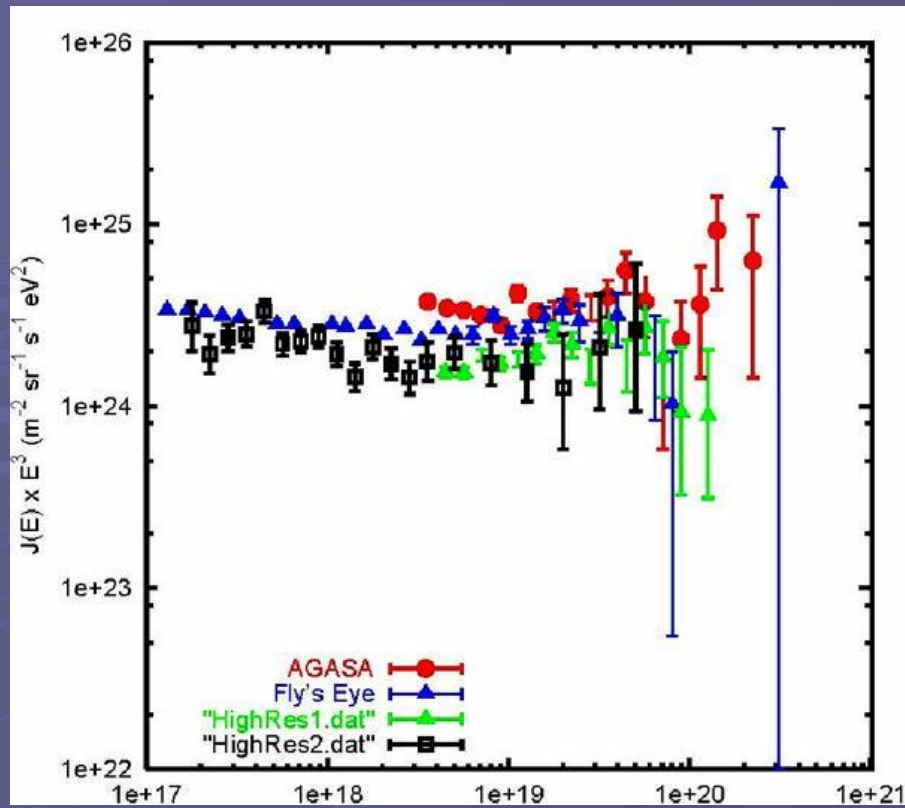


Рис. 20. Дифференциальный спектр космических лучей при высоких энергиях (зависимость потока адронов от энергии). Сегодня он содержит большие экспериментальные ошибки. Уточнение спектра – один из ключей к пониманию природы материи и законов физики.

Конец

