

20 лет открытий в физике частиц и космологии, Нобелевские премии...

Дмитрий Горбунов

Институт ядерных исследований РАН, Москва

Russian Teachers Programme 2013

- 1 Открытия и премии по астрофизике и космологии
- 2 Открытия и премии за исследования лептонов
- 3 Теоретические премии по физике частиц
- 4 “ЦЕРНовские” Нобелевские премии

“Наши” Нобелевские премии за 20 лет

- 1992: to Georges Charpak "for his invention and development of particle detectors, in particular the multiwire proportional chamber"
- 1993: jointly to Russell A. Hulse and Joseph H. Taylor Jr. "for the discovery of a new type of pulsar, a discovery that has opened up new possibilities for the study of gravitation"
- 1995: "for pioneering experimental contributions to lepton physics" jointly with one half to Martin L. Perl "for the discovery of the tau lepton" and with one half to Frederick Reines "for the detection of the neutrino".
- 1998: fractional charge excitations
- 1999: jointly to Gerardus 't Hooft and Martinus J.G. Veltman "for elucidating the quantum structure of electroweak interactions in physics"

“Наши” Нобелевские премии за 20 лет

- 2001: Bose-Einstein condensate
- 2002: divided, one half jointly to Raymond Davis Jr. and Masatoshi Koshiba "for pioneering contributions to astrophysics, in particular for the detection of cosmic neutrinos" and the other half to Riccardo Giacconi "for pioneering contributions to astrophysics, which have led to the discovery of cosmic X-ray sources"
- 2003: theory of superconductors and superfluids
- 2004: jointly to David J. Gross, H. David Politzer and Frank Wilczek "for the discovery of asymptotic freedom in the theory of the strong interaction"
- 2005: coherence in scattering

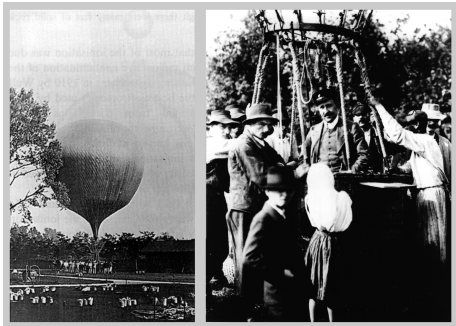
“Наши” Нобелевские премии за 20 лет

- 2006: jointly to John C. Mather and George F. Smoot "for their discovery of the blackbody form and anisotropy of the cosmic microwave background radiation"
- 2008: one half awarded to Yoichiro Nambu "for the discovery of the mechanism of spontaneous broken symmetry in subatomic physics the other half jointly to Makoto Kobayashi and Toshihide Maskawa "for the discovery of the origin of the broken symmetry which predicts the existence of at least three families of quarks in nature"
- 2011: one half awarded to Saul Perlmutter, the other half jointly to Brian P. Schmidt and Adam G. Riess "for the discovery of the accelerating expansion of the Universe through observations of distant supernovae"

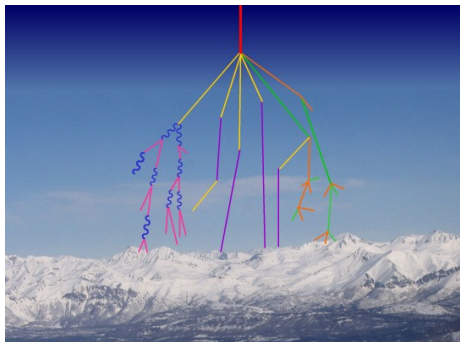
2013: to Francois Englert and Peter W. Higgs “for the theoretical discovery of a mechanism that contributes to our understanding of the origin of mass of subatomic particles, and which recently was confirmed through the discovery of the predicted fundamental particle, by the ATLAS and CMS experiments at CERN’s Large Hadron Collider”

100 лет физике частиц: космические лучи !

Открытие: Виктор Гесс, 1912г.



- Спонтанный электрический ток в газах
- Наблюдался даже в свинцовой камере
- Ток растёт с высотой! ↗5300м
- Эффект не от Солнца!



- 1932г. открыт позитрон e^+ “анти”
- 1937г. открыты мюоны $\mu^+\mu^-$ и их распад 2-е поколение
- 1947г. открыты π -мезоны адроны, множественное рождение
- 1955г. открыты K -мезоны и нейтральные гипероны “странность”

- 1 Открытия и премии по астрофизике и космологии
- 2 Открытия и премии за исследования лептонов
- 3 Теоретические премии по физике частиц
- 4 “ЦЕРНовские” Нобелевские премии

За возможность проверки гравитации

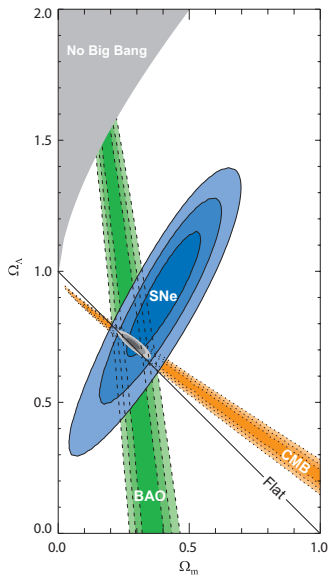
1993: jointly to Russell A. Hulse and Joseph H. Taylor Jr. “for the discovery of a new type of pulsar, a discovery that has opened up new possibilities for the study of gravitation”

За анизотропию реликтового излучения (РИ)

2006: jointly to John C. Mather and George F. Smoot “for their discovery of the blackbody form and anisotropy of the cosmic microwave background radiation”

За ускоренное расширение (тёмная энергия?)

2011: one half awarded to Saul Perlmutter, the other half jointly to Brian P. Schmidt and Adam G. Riess “for the discovery of the accelerating expansion of the Universe through observations of distant supernovae”



- оценка массы в галактиках, скоплениях и других структурах
- поправки к закону Хаббла : связь между красным смещением и кривыми блеска для “стандартных свеч” (SNe Ia)
- анизотропия РИ, распространённость структур (BAO, и др.)

$$\rho_{\text{энергии}}^{\text{плотность}}(t_0) \equiv \rho_c \approx 0.53 \times 10^{-5} \frac{\text{ГэВ} c^2}{\text{см}^3}$$

вклад РИ:

$$\Omega_\gamma \equiv \frac{\rho_\gamma}{\rho_c} = 0.5 \times 10^{-4}$$

Вклад барионов (водород, гелий):

$$\Omega_B \equiv \frac{\rho_B}{\rho_c} = 0.046$$

Вклад нейтрино:

$$\Omega_\nu \equiv \frac{\sum \rho_{\nu_i}}{\rho_c} < 0.01$$

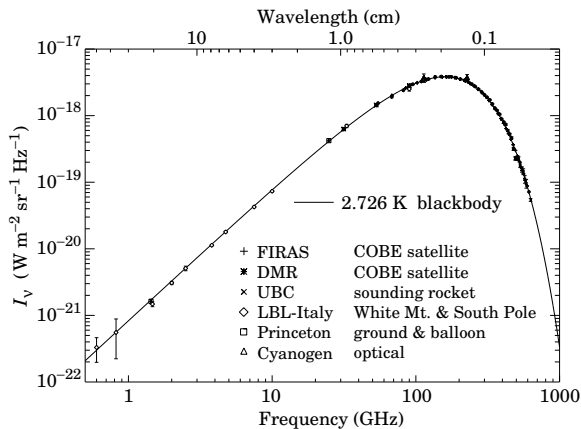
Вклад тёмной материи:

$$\Omega_{DM} \equiv \frac{\rho_{DM}}{\rho_c} = 0.23$$

Вклад тёмной энергии:

$$\Omega_\Lambda \equiv \frac{\rho_\Lambda}{\rho_c} = 0.73$$

Вселенная заполнена “горячими” фотонами



$$T_0 = 2.726 \text{ K}$$

и спектр и
концентрация
равновесны

$$n_\gamma = 411 \text{ cm}^{-3}$$

Анизотропия РИ и образование структур во Вселенной

- Реликтовое излучение не совсем изотропно.

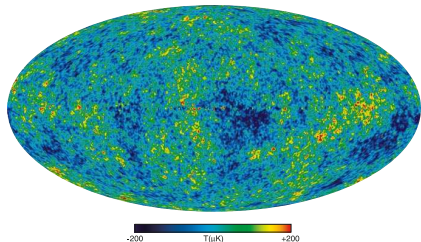
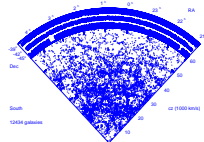
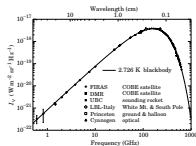
- 1 Движение Земли относительно РИ

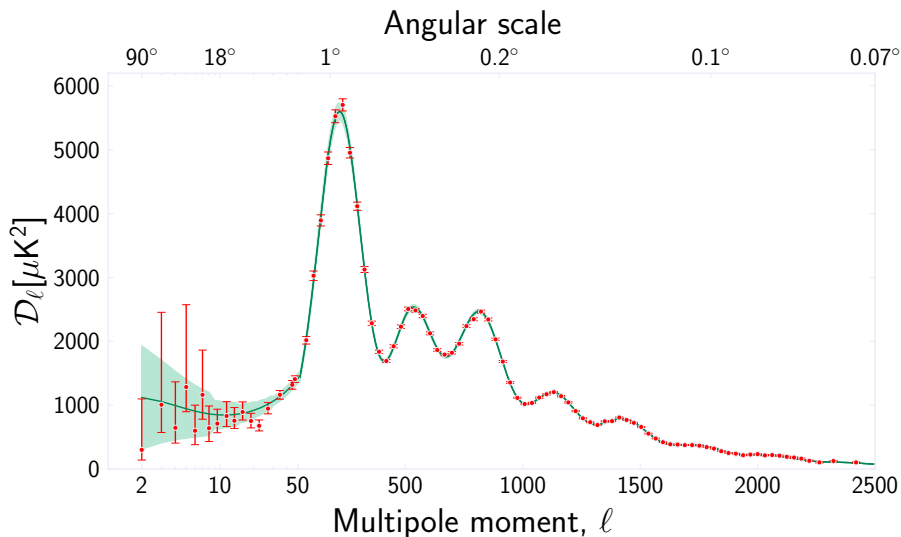
$$\frac{\Delta T_{\text{диполь}}}{T} \sim 10^{-3}$$

- 2 Есть более сложная анизотропия!

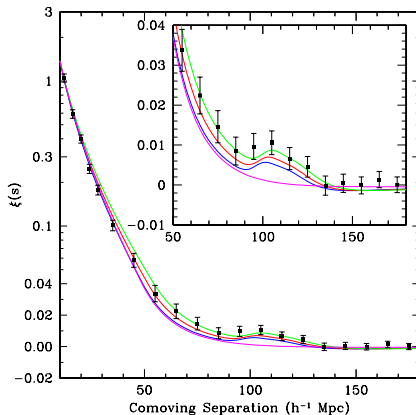
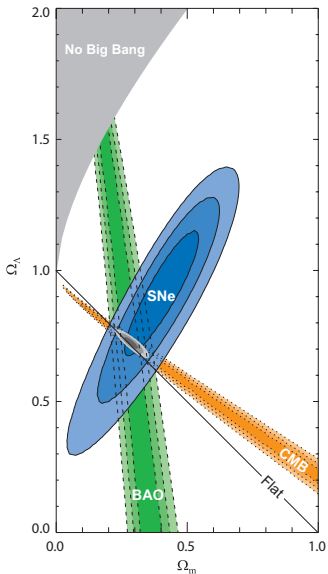
$$\frac{\Delta T}{T} \sim 10^{-4} - 10^{-5}$$

- Были неоднородности вещества $\Delta\rho/\rho \sim \Delta T/T$ в эпоху рекомбинации — образования водорода
- Гравитационная (джинсовская) неустойчивость системы покоящихся частиц $\Rightarrow \Delta\rho/\rho \nearrow \Rightarrow$ галактики
- Одни барионы не успели бы! После рекомбинации они “сваливаются” в гравитационные ямы, образованные тёмной материей.





Данные из космологии: “сахаровские” осцилляции



Вклад тёмной материи:

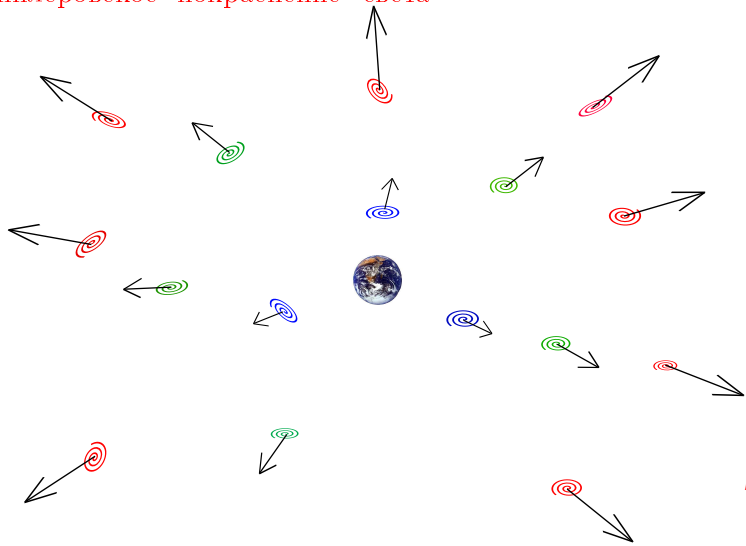
$$\Omega_{DM} \equiv \frac{\rho_{DM}}{\rho_c} = 0.23$$

Вклад тёмной энергии:

$$\Omega_\Lambda \equiv \frac{\rho_\Lambda}{\rho_c} = 0.73$$

Основные представления о Вселенной: расширяется

Доплеровское “покраснение” света



$$L \propto a(t)$$

$$n \propto a^{-3}(t)$$

$$H(t) = \frac{\dot{a}(t)}{a(t)}$$

параметр Хаббла

закон Хаббла

$$H(0)r = v_r$$



Выводы из наблюдений

Итак, Вселенная однородна, изотропна, расширяется и “горячая”...

Выводы

- интервал между событиями модифицируется

$$\Delta s^2 = c^2 \Delta t^2 - a^2(t) \Delta \vec{x}^2$$

в ОТО расширение описывается уравнением Фридмана

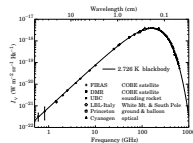
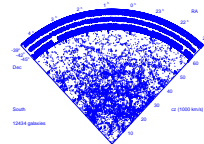
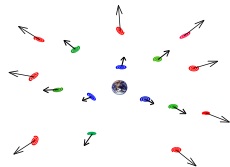
$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = H^2(t) = \frac{8\pi}{3} G \rho_{\text{энергии}}$$

$$\rho_{\text{энергии}}^{\text{плотность}} = \rho_{\text{радиация}} + \rho_{\text{вещество}}^{\text{обычное}} + \rho_{\text{материя}}^{\text{тёмная}} + \dots$$

- в прошлом Вселенная была “плотнее” и “горячее”, была электромагнитная плазма

$$\rho_{\text{вещество}} \propto 1/a^3(t), \quad \rho_{\text{радиация}} \propto 1/a^4(t)$$

надёжно знаем вплоть до $T \sim 1 \text{ МэВ } c^2/k \sim 10 \text{ млрд. К}$



Измерение $a(t)$ даёт состав современной Вселенной

$$\Delta s^2 = c^2 \Delta t^2 - a^2(t) \Delta \vec{x}^2$$

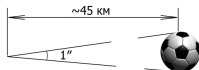
Как мы его проверяем?

Измеряя расстояние L до объекта!

Изменяется закон распространения света

- Измеряя угловой размер θ объекта известного размера d

$$\theta = \frac{d}{L}$$



однотипные галактики

- Измеряя угловой размер $\theta(t)$ соответствующий известно как изменяющемуся размеру $d(t)$

$$\theta(t) = \frac{d(t)}{L}$$

- Измеряя яркость объекта J заданной светимости F

“стандартные свечи”

$$J = \frac{F}{4\pi L^2} \rightarrow J = \frac{F}{4\pi L^2(1+z)(1+z)} \quad \frac{\text{энергия}}{\text{время} \times \text{площадь}}$$

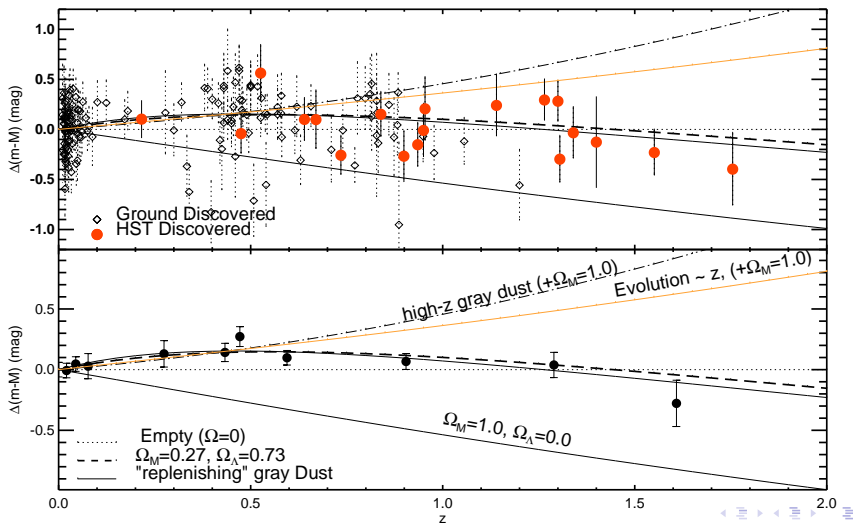


В расширяющейся Вселенной все эти законы модифицируются

Результаты по сверхновым типа Ia: $\ddot{a} > 0$

$$\Delta(m-M) = 5 \log \frac{r_{ph}}{r_{ph}(\Omega_c = 0.8, \Omega_M = 0.2)}$$

$$\ddot{a} = -\text{const} \times (\rho + 3p)$$



- 1 Открытия и премии по астрофизике и космологии
- 2 Открытия и премии за исследования лептонов
- 3 Теоретические премии по физике частиц
- 4 “ЦЕРНовские” Нобелевские премии

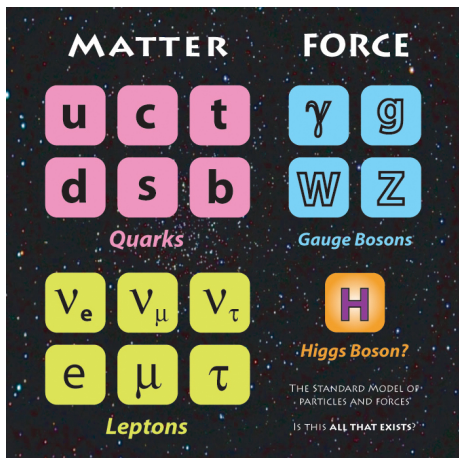
За открытие τ -лептона и регистрацию нейтрино

1995: “for pioneering experimental contributions to lepton physics” jointly with one half to Martin L. Perl “for the discovery of the tau lepton” and with one half to Frederick Reines “for the detection of the neutrino”

За вклад в астрофизику и регистрацию космических нейтрино

2002: divided, one half jointly to Raymond Davis Jr. and Masatoshi Koshiba “for pioneering contributions to astrophysics, in particular for the detection of cosmic neutrinos” and the other half to Riccardo Giacconi “for pioneering contributions to astrophysics, which have led to the discovery of cosmic X-ray sources”

Заряженный лептон третьего поколения



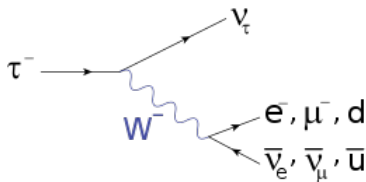
$$m_{\tau} \approx 1.8 \text{ ГэВ}$$

(SLAC, 1975)

(NP 1995)

$$e^{+} + e^{-} \rightarrow \tau^{+} + \tau^{-}$$

τ -ЛЕПТОН (ТАОН) $\tau_{\tau} \sim 10^{-12} \text{ с}$



нетривиальное свойство:

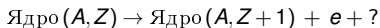
распады в адроны! (> 50%)

Роль нейтрино в слабых взаимодействиях



В. Паули (1930)

- Сохраняет энергию (экспериментально спектр позитронов непрерывен!)



- Сохраняет угловой момент (фермионы! **спины!** Вспоминаем химию... принцип Паули)

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

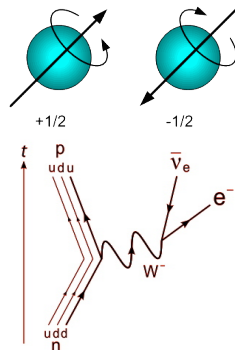
Спины:

$$\frac{1}{2} \rightarrow \frac{1}{2} \quad \frac{1}{2} \quad \frac{1}{2}$$

- Сохраняет лептонные числа L_e, L_μ, L_τ

$$L_e(n) = 0 \implies L_e(\bar{\nu}_e) = -L_e(e)$$

$$L_e(\nu_e) = -L_e(\bar{\nu}_e)$$



Свойства нейтрино

- **нейтрино очень лёгкие** (в Стандартной модели — безмассовы!)
- **антинейтрино** $\bar{\nu}_e$ рождаются в β^- -распаде (вместе с **электроном**), $\Delta L_e = 0$

$$\text{в ядре: } n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$$

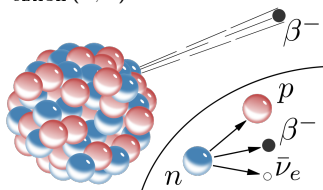
- **нейтрино** ν_e рождаются в β^+ -распаде (вместе с **позитроном**), $\Delta L_e = 0$

$$\text{в ядре: } p \rightarrow n + e^+ + \nu_e$$

всё зависит от энергетического баланса

(нужно родить электрон(позитрон) за счёт $m_n - m_p$ и разницы энергий связи):

$$M_{\text{ядра}}(A, Z) = Z m_p + (A - Z) m_n - E_{\text{связи}}(A, Z)$$



Свойства нейтрино

- нейтрино очень лёгкие (в Стандартной модели — безмассовы!)
- антинейтрино $\bar{\nu}_e$ рождаются в β^- -распаде (вместе с электроном), $\Delta L_e = 0$

$$\text{в ядре: } n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$$

- нейтрино ν_e рождаются в β^+ -распаде (вместе с позитроном), $\Delta L_e = 0$

$$\text{в ядре: } p \rightarrow n + e^+ + \nu_e$$

всё зависит от энергетического баланса

(нужно родить электрон(позитрон) за счёт $m_n - m_p$ и разницы энергий связи):

$$M_{\text{ядра}}(A, Z) = Z m_p + (A - Z) m_n - E_{\text{связи}}(A, Z)$$

- Важнейшее свойство:

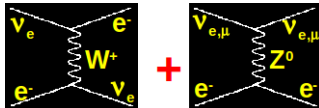
участвуют только в слабых взаимодействиях
($W^+ \rightarrow e^+ \nu_e$, $W^+ \rightarrow e^- \bar{\nu}_e$, $Z \rightarrow \nu_e \bar{\nu}_e$)

взаимодействуют очень редко!

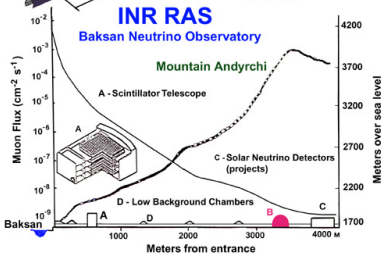
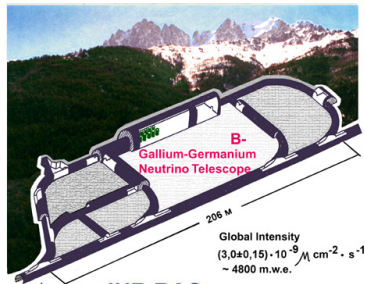
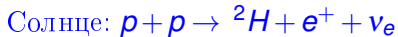
$\bar{\nu}_e$ из ядерного реактора пролетает в воде без столкновений более 10^{13} км

столько свет пролетит за год!!!

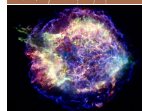
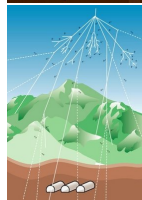
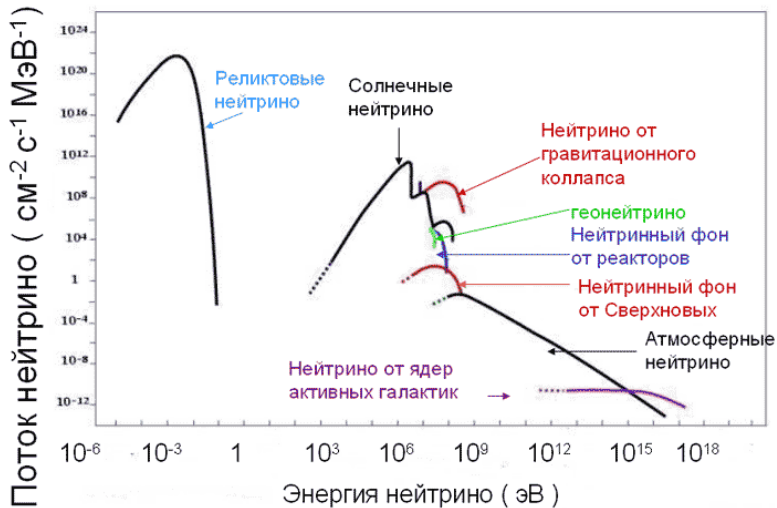
1) отовсюду вылетает, 2) нужны большие детекторы



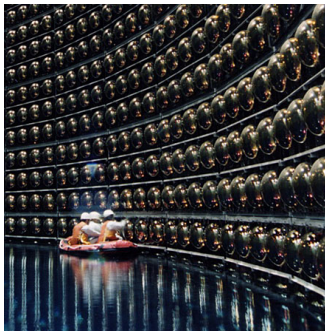
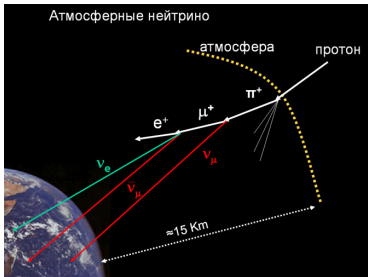
Регистрация солнечных нейтрино



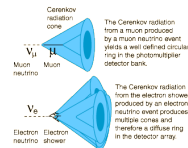
Нейтрино и антинейтрино вокруг нас



Регистрация атмосферных и космических нейтрино

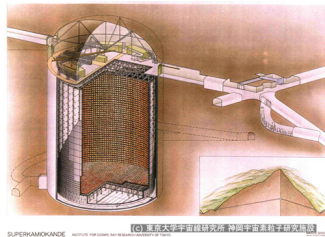
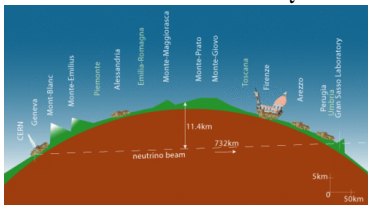


Черенковский свет от e и μ
($v_{\text{частицы}} < c$ в среде)



← SuperK

OPERA: появление ν_τ



Поток $_{\mu}$ $\uparrow <$ Поток $_{\mu}$ \downarrow

Поток $_{e}$ $\uparrow =$ Поток $_{e}$ \downarrow

- 1 Открытия и премии по астрофизике и космологии
- 2 Открытия и премии за исследования лептонов
- 3 Теоретические премии по физике частиц
- 4 “ЦЕРНовские” Нобелевские премии

За адронизацию и предсказание третьего поколения кварков

2008: one half awarded to Yoichiro Nambu “for the discovery of the mechanism of spontaneous broken symmetry in subatomic physics”, the other half jointly to Makoto Kobayashi and Toshihide Maskawa “for the discovery of the origin of the broken symmetry which predicts the existence of at least three families of quarks in nature”

За открытие асимптотической свободы в сильных взаимодействиях

2004: jointly to David J. Gross, H. David Politzer and Frank Wilczek “for the discovery of asymptotic freedom in the theory of the strong interaction”

Самосогласованность квантово-полевого описания теории со спонтанно-нарушенной калибровочной симметрией (хиггсовский механизм)

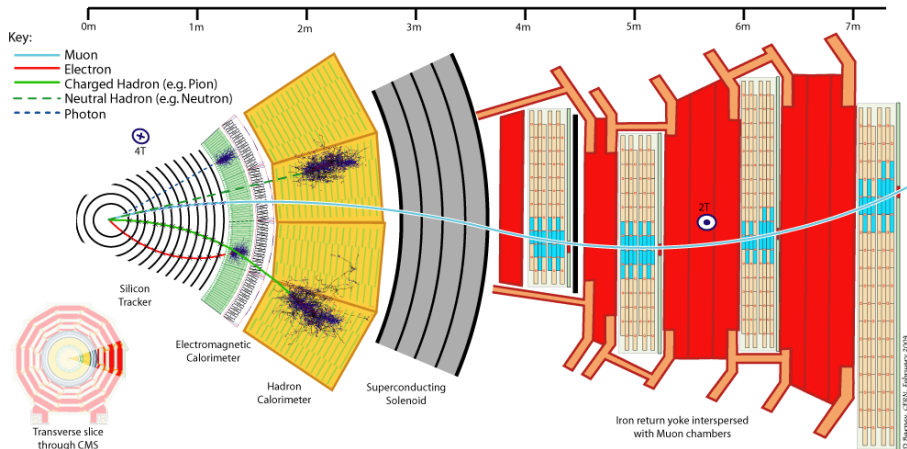
1999: jointly to Gerardus 't Hooft and Martinus J.G. Veltman “for elucidating the quantum structure of electroweak interactions in physics”

- 1 Открытия и премии по астрофизике и космологии
- 2 Открытия и премии за исследования лептонов
- 3 Теоретические премии по физике частиц
- 4 “ЦЕРНовские” Нобелевские премии

- 1992: to Georges Charpak "for his invention and development of particle detectors, in particular the multiwire proportional chamber"
- 2013: to Francois Englert and Peter W. Higgs “for the theoretical discovery of a mechanism that contributes to our understanding of the origin of mass of subatomic particles, and which recently was confirmed through the discovery of the predicted fundamental particle, by the ATLAS and CMS experiments at CERN’s Large Hadron Collider”

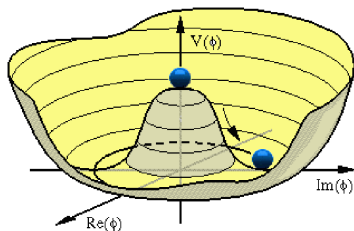
Детектирование частиц: 1992 to Georges Charpak

"for his invention and development of particle detectors, in particular the multiwire proportional chamber"



Механизм Хиггса: спонтанное нарушение

$$SU(3)_s \times SU(2)_w \times U(1)_Y \longrightarrow SU(3)_s \times U(1)_{em}$$



ϕ_r — массивно

ϕ_θ — безмассово,

$\partial_\mu \phi_\theta$ “поглощается” A_μ

$$H : (0, 2, 1) \longrightarrow \langle H^\dagger H \rangle = \frac{v^2}{2}$$

$$\mathcal{L}^{\text{self}} = \mathcal{D}_\mu H^\dagger \mathcal{D}^\mu H - \lambda \left(H^\dagger H - \frac{v^2}{2} \right)^2$$

$$\mathcal{D}_\mu H \equiv \left(\partial_\mu - ig \frac{\tau^a}{2} V_\mu^a - ig' \frac{Y_H}{2} A_\mu \right) H$$

унитарная калибровка:
$$H = \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{v}{\sqrt{2}} + \frac{h}{\sqrt{2}} \end{pmatrix}$$

Как проверить роль бозона Хиггса?

унитарная калибровка: $H = \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{v}{\sqrt{2}} + \frac{h}{\sqrt{2}} \end{pmatrix}$

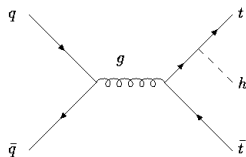
$$\begin{aligned} \mathcal{D}_\mu H^\dagger \mathcal{D}^\mu H &\rightarrow \frac{g^2}{4} h^2 |W_\mu^-|^2 + \frac{g^2 + g'^2}{8} h^2 Z_\mu Z^\mu \\ &+ \frac{g^2}{2} v h |W_\mu^-|^2 + \frac{g^2 + g'^2}{4} v h Z_\mu Z^\mu \\ Y_f H \bar{f} f &\rightarrow Y_f h \bar{f} f / \sqrt{2} = \frac{m_f}{v} h \bar{f} f \end{aligned}$$

Численно:

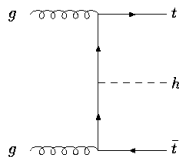
$$g \approx 0.5, g' \approx 0.3, Y_f = 10^{-6} - 10^{-2}, Y_b \approx 1/60, Y_t \approx 0.6$$

- 1 Новая (5-я) короткодействующая сила:
Юкавский потенциал между массивными частицами!
- 2 Унитарность в $WW \rightarrow WW$
- 3 Унитарность в $f\bar{f} \rightarrow WW$

Перспектива: Проверка механизма получения масс



$h\bar{t}t$:



Численно:

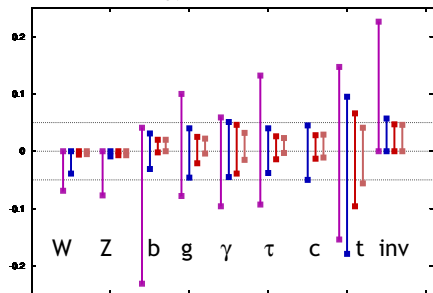
$$g_W \approx 0.5, g_\gamma \approx 0.3,$$

$$Y_f = 10^{-6} - 10^{-2},$$

$$Y_b \approx 1/40, Y_t \approx 1$$

M. Peskin (2012)

$g(hAA)/g(hAA)|_{SM}-1$ LHC/ILC1/ILC/ILCTeV



Перспектива: Проверка механизма спонтанного нарушения электрослабой симметрии

h^3, h^4 :

ТОЛЬКО

$h^*hh: pp \rightarrow hh + \dots$

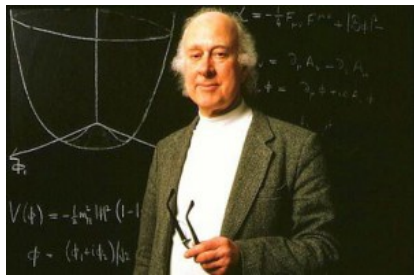
$$-1.1 < \Delta\lambda_{hhh} < 1.6$$

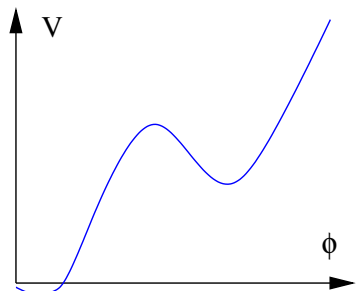
LHC (14 TeV), $\mathcal{L}_{pp} = 600 \text{ фб}^{-1}$

$$-0.62 < \Delta\lambda_{hhh} < 0.74$$

SLHC, $\mathcal{L}_{pp} = 6000 \text{ фб}^{-1}$

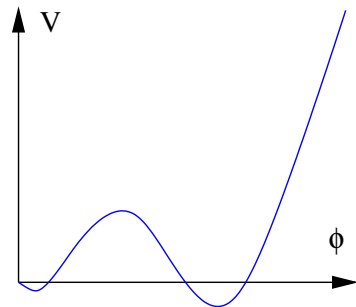
$$\Delta\lambda_{hhh} \equiv \lambda/\lambda_{SM} - 1$$





Fermi

Planck



Fermi

Planck

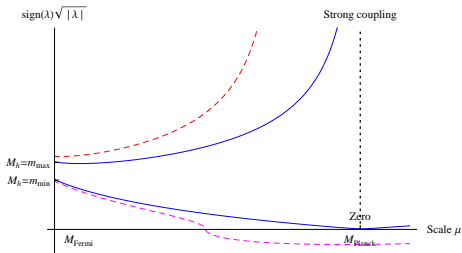
$$\Lambda \simeq 0 \Rightarrow V(\phi_{EW}) = V(\phi_{Planck}) = 0 \Rightarrow \lambda(\mu_{Planck}) = 0$$

$$\text{грав. масштаб} \Rightarrow V'(\phi_{EW}) = V'(\phi_{Planck}) = 0 \Rightarrow \frac{d\lambda(\mu)}{d\log\mu}(\mu_{Planck}) = 0$$

Это даёт

$$m_t \simeq 173 \text{ ГэВ} \text{ и } m_h \simeq 129 \text{ ГэВ}$$

Критическая точка: появление нового вакуума

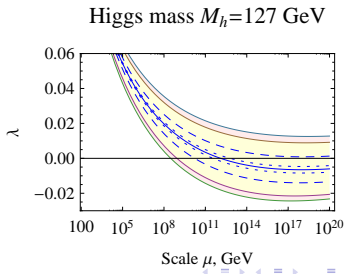
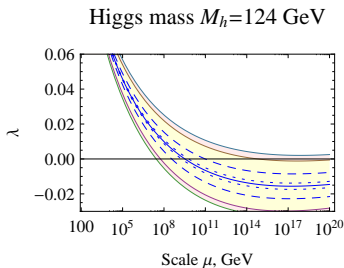


- F. Bezrukov, M. Shaposhnikov (2009)
- F. Bezrukov, D. G. (2011)
- F. Bezrukov, M. Kalmykov, B. Kniehl, M. Shaposhnikov (2012)
- G. Degrassi et al (2012)

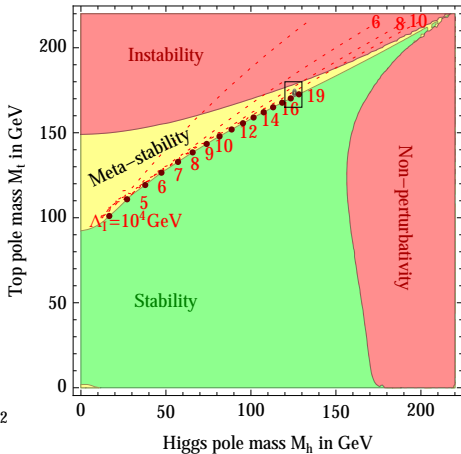
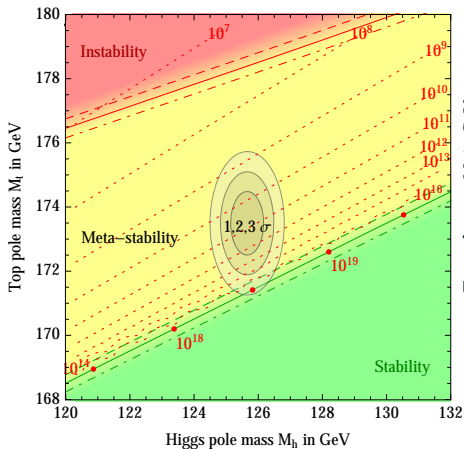
$$m_h^{cr} > \left[129.0 + \frac{m_t - 172.9 \Gamma_{\text{ЭВ}}}{1.1 \Gamma_{\text{ЭВ}}} \times 2.2 - \frac{\alpha_s(M_Z) - 0.1181}{0.0007} \times 0.56 \right] \Gamma_{\text{ЭВ}}$$

современные измерения на CMS и ATLAS:

$$m_h \simeq 125.8 \pm 0.9 \Gamma_{\text{ЭВ}}$$



“Натуральность” измеренной массы Хиггса



1307.7879

Что дальше?

- Что измерить?
 - параметры хиггсовского сектора уточнить массу t -кварка
 - величины масс нейтрино
 - CP-нарушение в нейтринном секторе
 - гравитационные волны от астрофизических источников
- Что найти?
 - тёмную материю
 - реликтовые гравитационные волны
- Что понять?
 - как появляются массы нейтрино
 - как появилась барионная асимметрия Вселенной
 - причину иерархии в кварковом секторе
 - $\Omega_B \sim \Omega_{DM} \sim \Omega_\Lambda$?
 - причину ускоренного расширения Вселенной
 - почему энергия вакуума так мала?
 - сильная CP-проблема
 - Квадратичные расходимости — малость массы бозона Хиггса
 -
 -

