



Московский физико-технический институт
(государственный университет)



Физика высоких энергий: задачи на миллион долларов

Дмитрий Казаков

Лаборатория теоретической физики
Объединённый институт ядерных исследований (Дубна)

Московский физико-технический институт
Кафедра фундаментальных и прикладных проблем физики микромира





Московский физико-технический институт
(государственный университет)



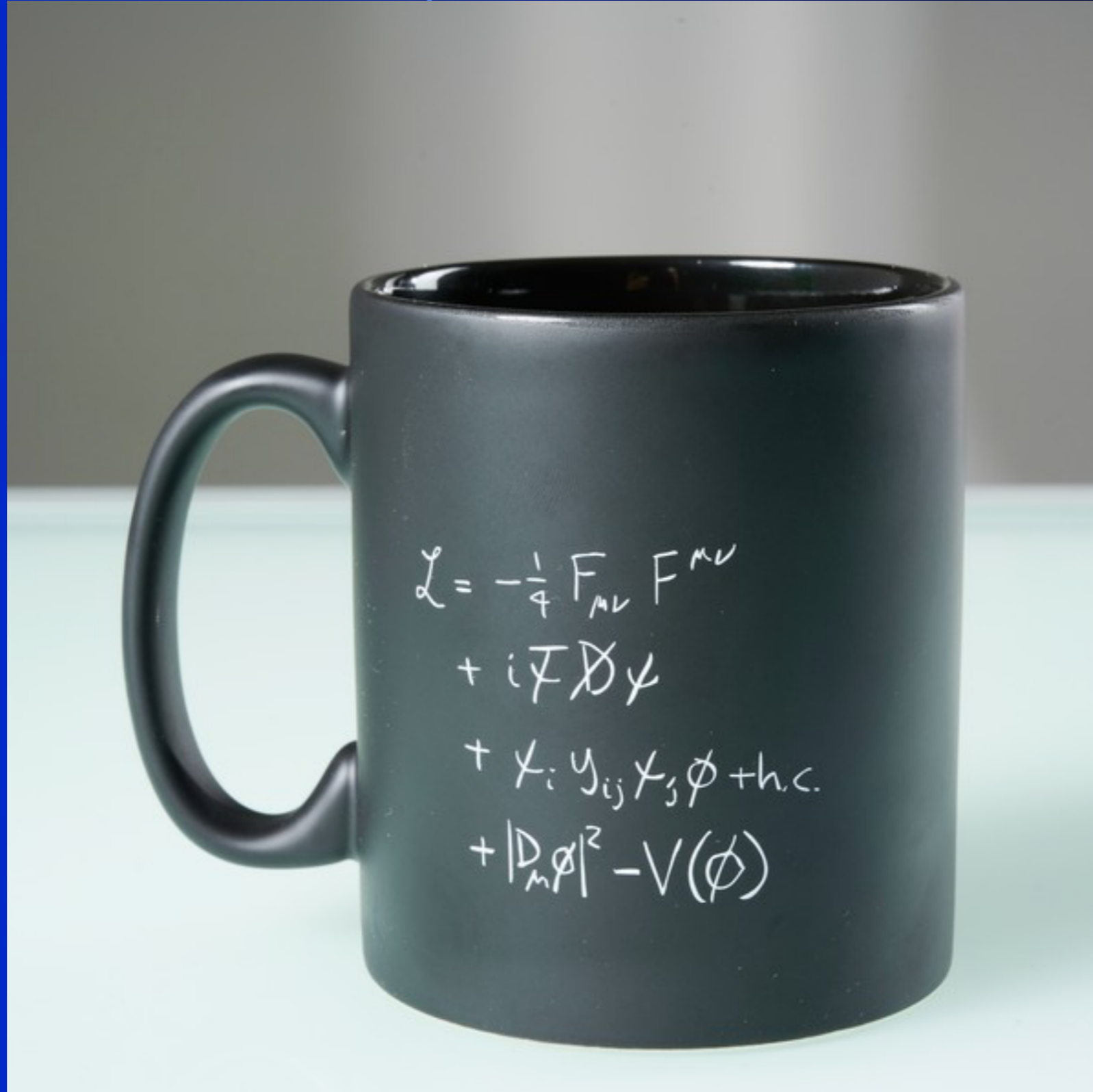
Физика высоких энергий: задачи на миллион долларов

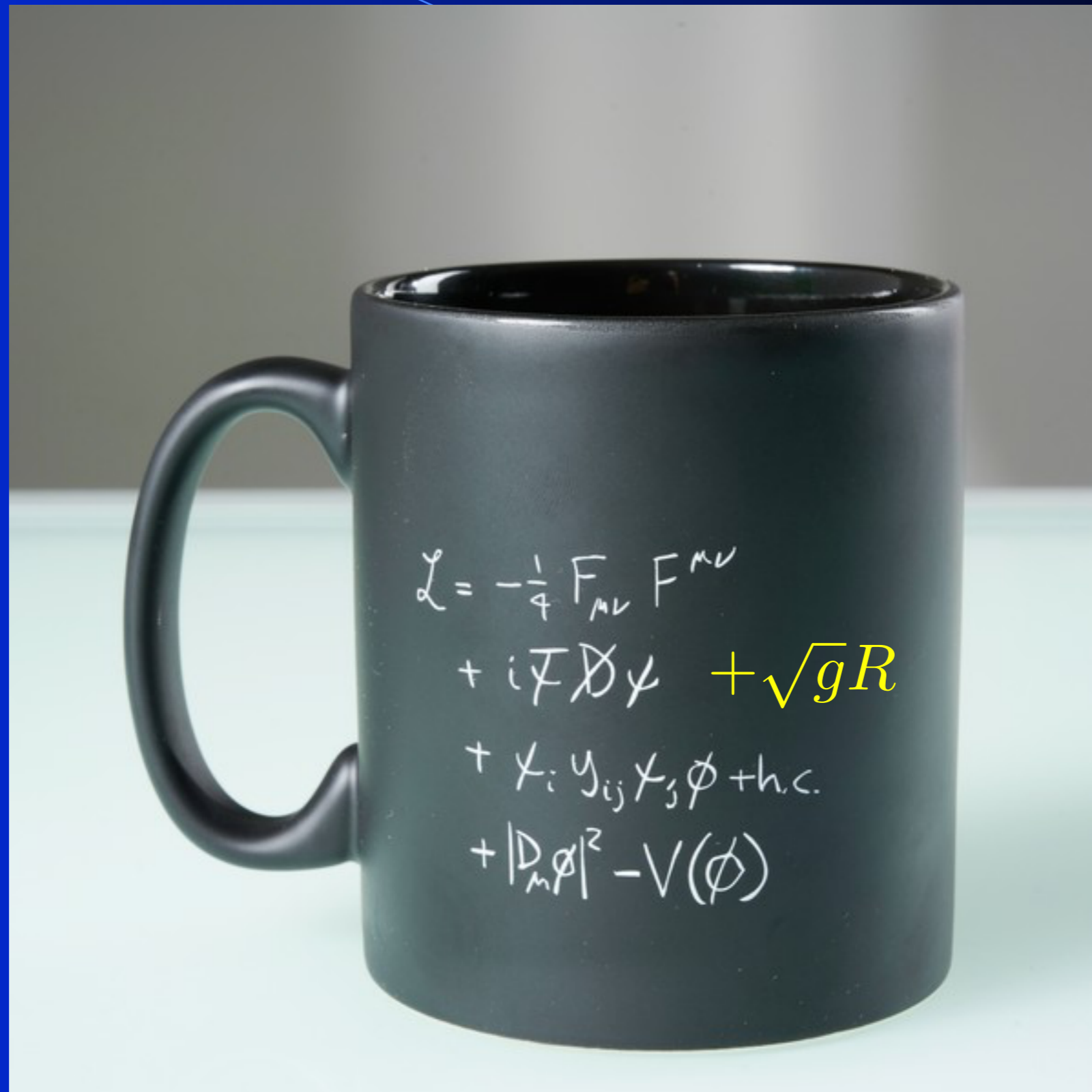
Дмитрий Казаков

Лаборатория теоретической физики
Объединённый институт ядерных исследований (Дубна)

Московский физико-технический институт
Кафедра фундаментальных и прикладных проблем физики микромира







$$\begin{aligned}\mathcal{L} = & -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} \\ & + i\bar{\psi}\not{D}\psi + \sqrt{g}R \\ & + \chi_i Y_{ij} \chi_j \phi + \text{h.c.} \\ & + |D_\mu \phi|^2 - V(\phi)\end{aligned}$$

Задача № 1:

Почему кварки не
вылетают из адронов?

Стандартная Модель

SU(3)

SU(2)

U(1)

ФЕРМИОНЫ

Three Generations of Matter (Fermions)

	I	II	III		
mass→	3 MeV	1.24 GeV	172.5 GeV	0	125.7 GeV
charge→	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0	0
spin→	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	0
name→	u up	c charm	t top	γ photon	H Higgs
Quarks	6 MeV	95 MeV	4.2 GeV	0	0
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	2
	d down	s strange	b bottom	g gluon	G Graviton
Leptons	<2 eV	<0.19 MeV	<18.2 MeV	90.2 GeV	
	0	0	0	0	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	Z⁰ weak force	
	0.511 MeV	106 MeV	1.78 GeV	80.4 GeV	
	-1	-1	-1	±1	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
	e electron	μ muon	τ tau	W[±] weak force	

Bosons (Forces)

СИЛЫ

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ

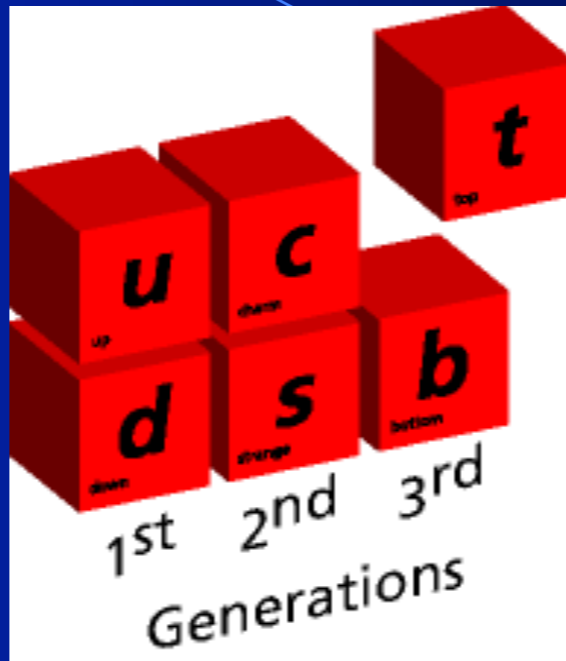
СИЛЬНЫЕ

СЛАБЫЕ

ЮКАВСКИЕ

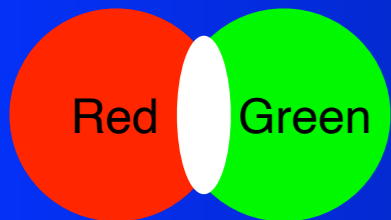
ГРАВИТАЦИЯ

Кварки — “кирпичики мироздания”

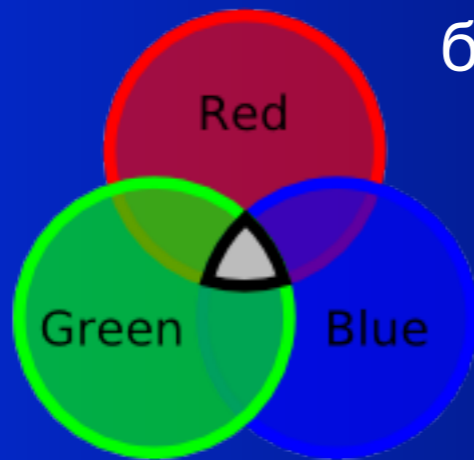


- Электрический заряд кварков кратен 1/3
- Каждый кварк несёт новое квантовое число - цвет, принимающее три значения
- Число сортов кварков росло с открытием новых частиц и достигло **шести**

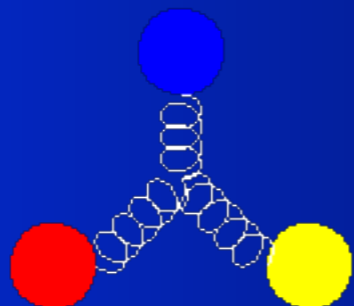
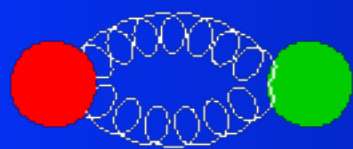
МЕЗОН



барион



- Кварки “заперты” внутри адронов
- Наружу вылетают лишь «бесцветные» состояния



- Между кварками натянута струна из глюонов постоянной напряжённости, что обеспечивает потенциал удержания

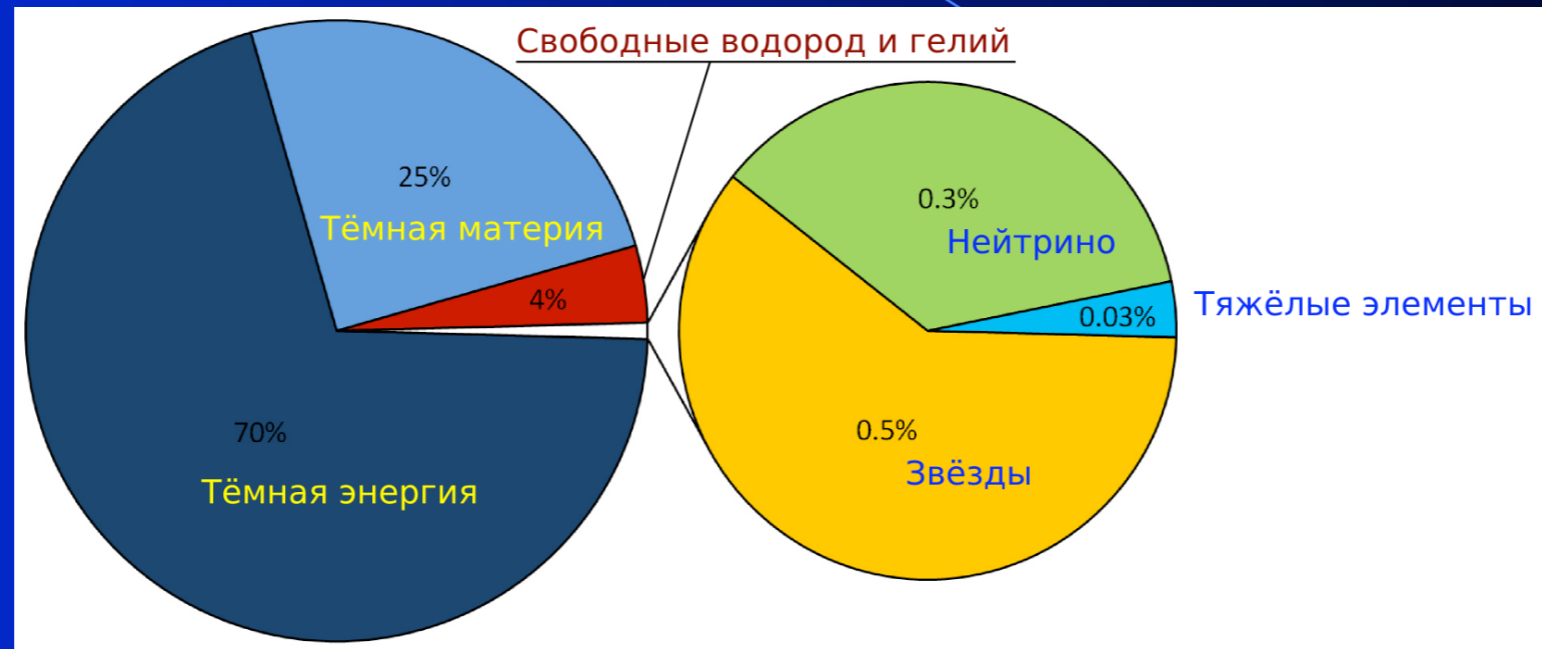
$$V(r) = -\frac{g_s^2}{r} + br$$

Задача № 2:

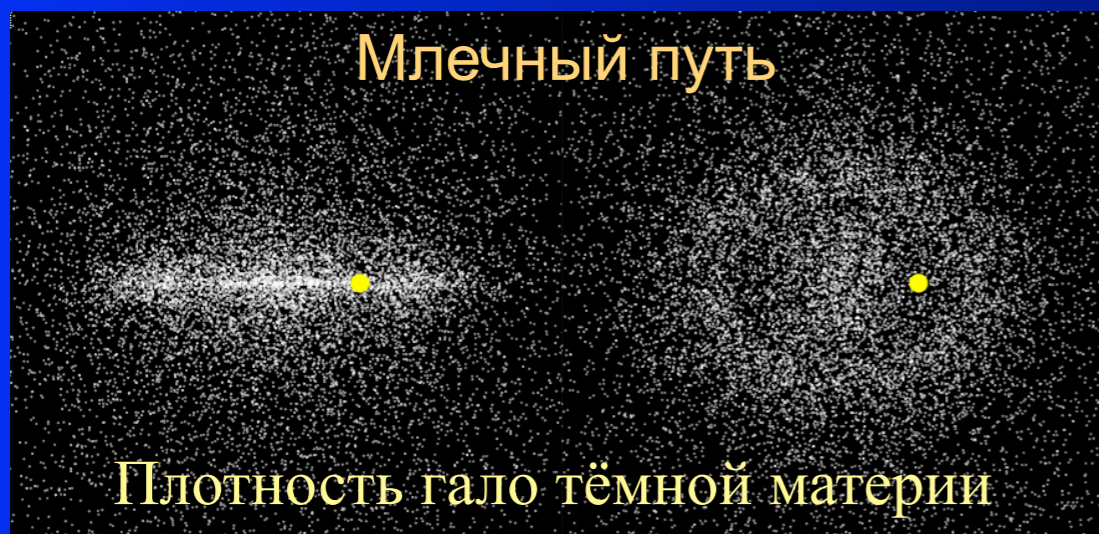
Из чего состоит тёмная
материя?

Тёмная материя

Энергетический баланс Вселенной



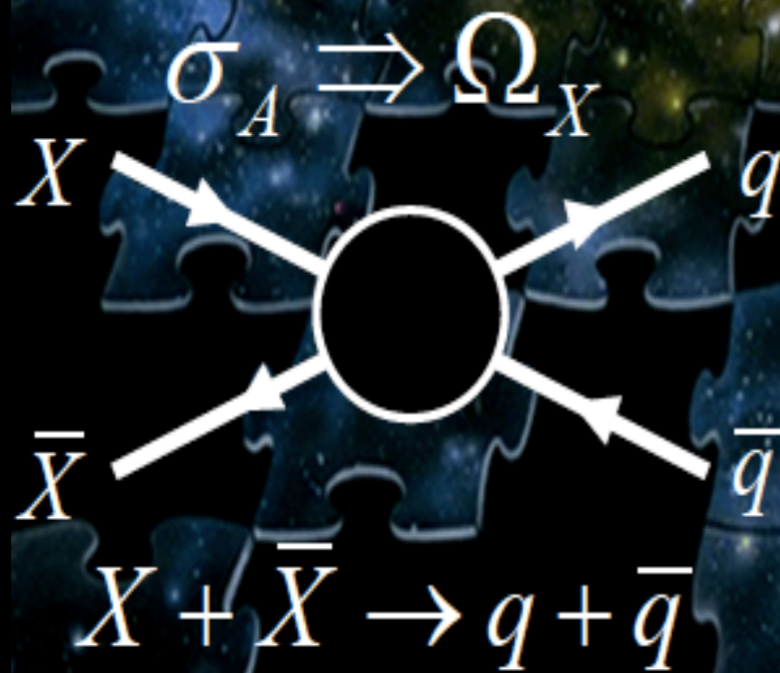
Наше знание касается лишь малой части Вселенной, однако возможно нам известны 90% (50%) элементарных частиц



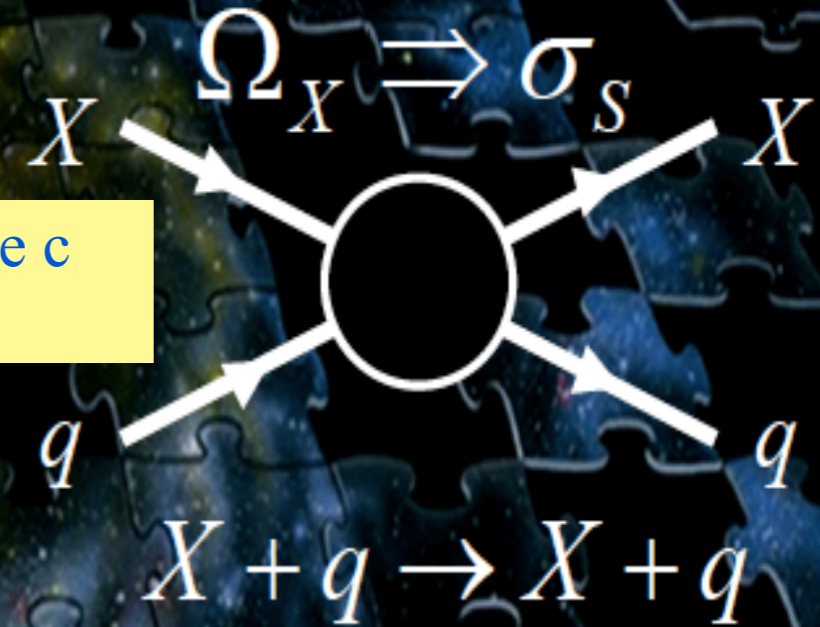
- Скорость вращения Земли вокруг Солнца - 30 км/сек
- Скорость вращения Солнца вокруг центра Галактики - 220 км/сек
- Скорость за счёт притяжения видимой материи - 175 км/сек
- Плотность ТМ в районе Солнца - 0.3 Гэв/см

Поиск частиц тёмной материи

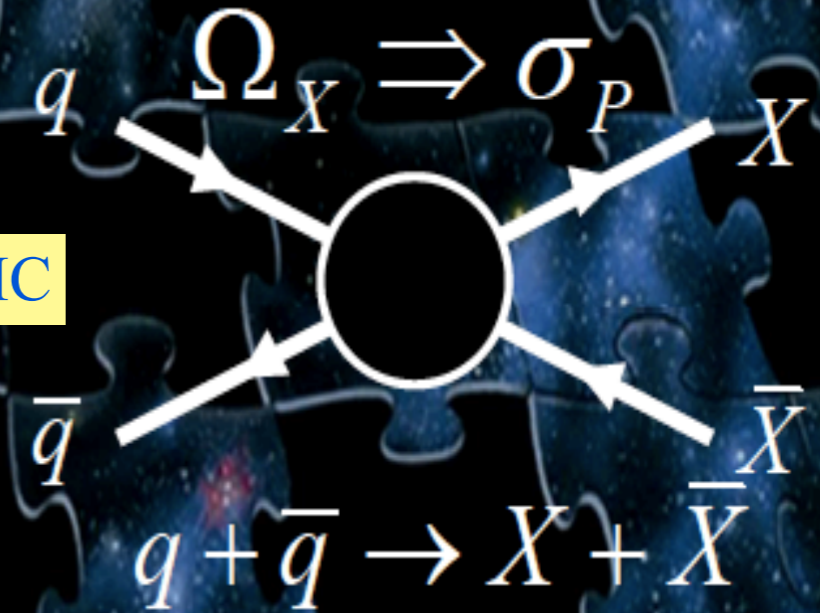
Аннигиляция \rightarrow новая компонента в космических лучах



Прямое вз-е с веществом



Рождение на LHC

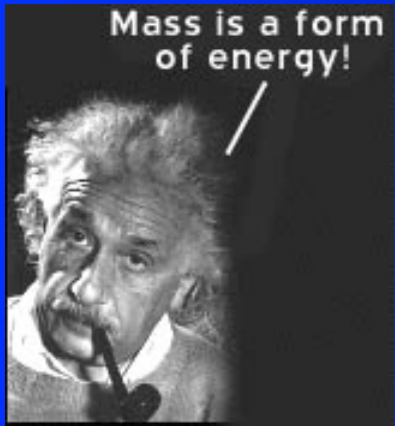


R. Kolb

Сигнал пока отсутствует

Задача № 3:

Как проквантовать
гравитацию?



Общая теория Относительности

$$Action = \int d^4x \sqrt{-g} \left[\frac{c^4}{16\pi G} (R - 2\Lambda) + \mathcal{L}_M \right]$$

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R = \frac{8\pi G}{c^2}T_{\mu\nu} \quad \Rightarrow \quad R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R + g_{\mu\nu}\Lambda = \frac{8\pi G}{c^2}T_{\mu\nu}$$

↑
тензор Риччи
скалярная кривизна

↑
тензор энергии-импульса материи

↑
Космологическая постоянная

Космологическая постоянная есть
вакуумная энергия = Λ^4

Приводит к антигравитации, что
порождает ускоренное расширение
Вселенной

Чтобы получить ~ 70 % вклада в энергетический баланс
Вселенной Λ должна быть порядка 10^{-3} эв.

?!

Квантование

$$g_{\mu\nu} = g_{\mu\nu}^{clasic} + h_{\mu\nu}$$



метрика



квантовые флуктуации (гравитон)

Проблемы:

- Лишние степени свободы: духи
- Рост вероятностей с энергией: $\sim E^2 / M_{Pl}^2$
- Наличие бесконечного числа бесконечностей: неперенормируемость

Квантование

$$g_{\mu\nu} = g_{\mu\nu}^{clasic} + h_{\mu\nu}$$



метрика



квантовые флуктуации (гравитон)

Проблемы:

- Лишние степени свободы: духи
- Рост вероятностей с энергией: $\sim E^2 / M_{Pl}^2$
- Наличие бесконечного числа бесконечностей: неперенормируемость

Пути решения:

- Модификация сектора материи (суперсимметрия)
- Модификация гравитации (высшие члены по кривизне)
- Нелокальная теория (струна)
- Обуздание неперенормируемости

Квантование

$$g_{\mu\nu} = g_{\mu\nu}^{clasic} + h_{\mu\nu}$$



метрика



квантовые флуктуации (гравитон)

Проблемы:

- Лишние степени свободы: духи
- Рост вероятностей с энергией: $\sim E^2 / M_{Pl}^2$
- Наличие бесконечного числа бесконечностей: неперенормируемость

Пути решения:

- Модификация сектора материи (суперсимметрия)
- Модификация гравитации (высшие члены по кривизне)
- Нелокальная теория (струна)
- Обуздание неперенормируемости

?!

Квантование

$$g_{\mu\nu} = g_{\mu\nu}^{clasic} + h_{\mu\nu}$$



метрика



квантовые флуктуации (гравитон)

Проблемы:

- Лишние степени свободы: духи
- Рост вероятностей с энергией: $\sim E^2 / M_{Pl}^2$
- Наличие бесконечного числа бесконечностей: неперенормируемость

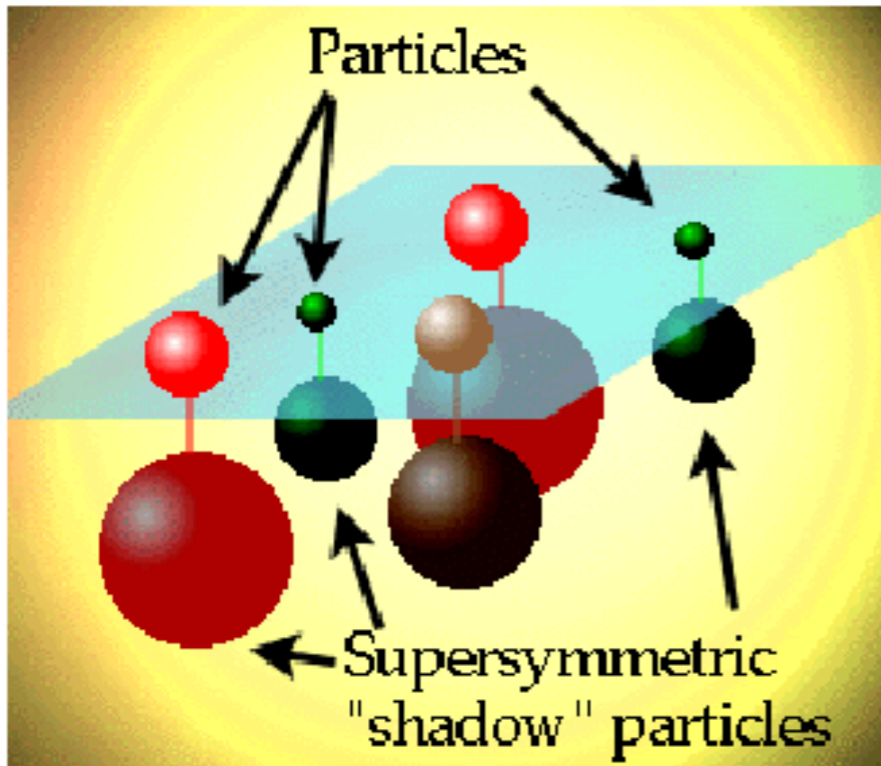
Пути решения:

- Модификация сектора материи (суперсимметрия)
- Модификация гравитации (высшие члены по кривизне)
- Нелокальная теория (струна)
- Обуздание неперенормируемости

?!

Решение пока отсутствует

Суперсимметрия



- Новый вид симметрии между частицами с целым спином – **бозонами** и частицами с полуцелым спином - **фермионами**
- Каждая частица имеет тяжёлого партнёра отличающегося лишь значением спина на $1/2$

- «суперпартнёры» тяжелее обычных частиц и потому пока не рождаются на ускорителях
- Теория супергравитации включает в себя все известные частицы и взаимодействия

кварк

$$q \rightarrow \tilde{q}$$

скварк

лептон

$$l \rightarrow \tilde{l}$$

слептон

W-бозон

$$W \rightarrow \tilde{W}$$

вино

Z-бозон

$$Z \rightarrow \tilde{Z}$$

зино

глюон

$$g \rightarrow \tilde{g}$$

глюино

фотон

$$\gamma \rightarrow \tilde{\gamma}$$

фотино

Хиггс

$$H \rightarrow \tilde{H}$$

Хиггсино

гравитон

$$G \rightarrow \tilde{G}$$

гравитино

Квантование

Модификация ОТО

$$R \rightarrow R + R^2 + R_{\mu\nu}R^{\mu\nu}$$



скалярная кривизна

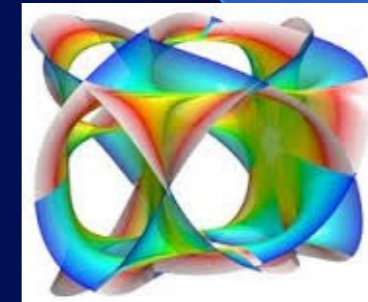


тензор Риччи

Изменение космологических сценариев

Поляризация гравитационных волн

Новая парадигма: Теория струн



Мировая линия



частица

$$X^\mu = X^\mu(\tau)$$



открытая струна

Мировая поверхность

$$X^\mu = X^\mu(\tau, \sigma)$$



замкнутая струна

Частицы есть моды колебаний релятивистской струны

Какие новые загадки или
разгадки ждут нас за
пределами Стандартной
Модели?

СТ