



КАК ОСМЫСЛИТЬ ТО, ЧЕГО
НЕЛЬЗЯ УВИДЕТЬ.
ОТ СИЛ К ФУНДАМЕНТАЛЬНЫМ
ВЗАИМОДЕЙСТВИЯМ.

КОВТУН АНДРЕЙ. МФТИ (ГУ)

ЧТО ТАКОЕ ФИЗИКА?

- Взаимодействие



ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ НА БЫТОВОМ УРОВНЕ

Сила — физическая величина, являющаяся мерой воздействия на данное тело со стороны других тел. (Педивикия)



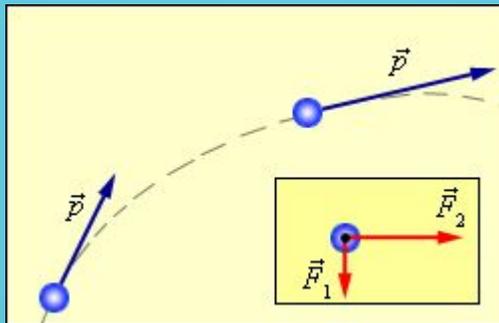
Механическое воздействие

КАК МЫ ВОСПРИНИМАЕМ СИЛЫ

- Эксперимент
- Единицы измерения
- Сравнение



МЕХАНИКА



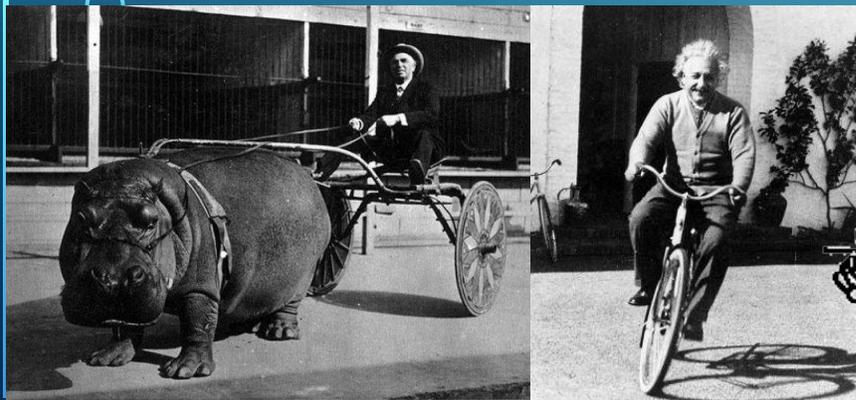
$$m\vec{a} = \vec{F}, \quad \frac{\Delta\vec{p}}{\Delta t} = \vec{F}$$

II ЗАКОН НЬЮТОНА

Тащишь на веревочке, вращаешь педали, ударяешь

и т. п...

АКТИВНОЕ МЕХАНИЧЕСКОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ



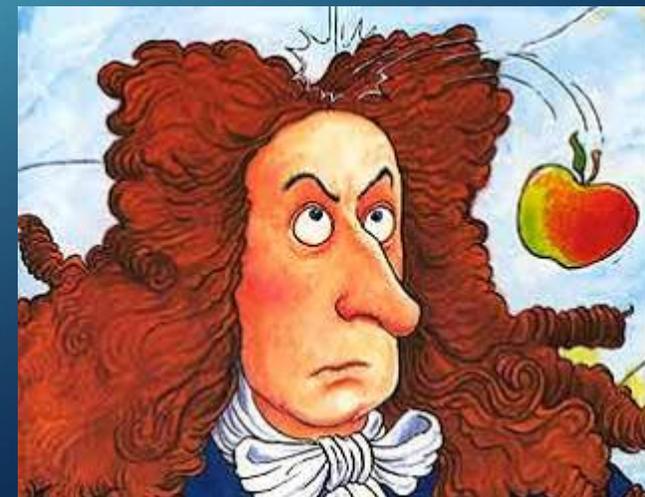
Трение, реакция опоры, натяжение...

ПАССИВНОЕ МЕХАНИЧЕСКОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ



Гравитация, электростатическое притяжение, магнетизм...

НЕВИДИМОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ



КАК БЫТЬ?

- Сил много
- Могут ли быть связаны
- Где искать связи, если да

СКОРАЯ ПОМОЩЬ

ФИЗИКА

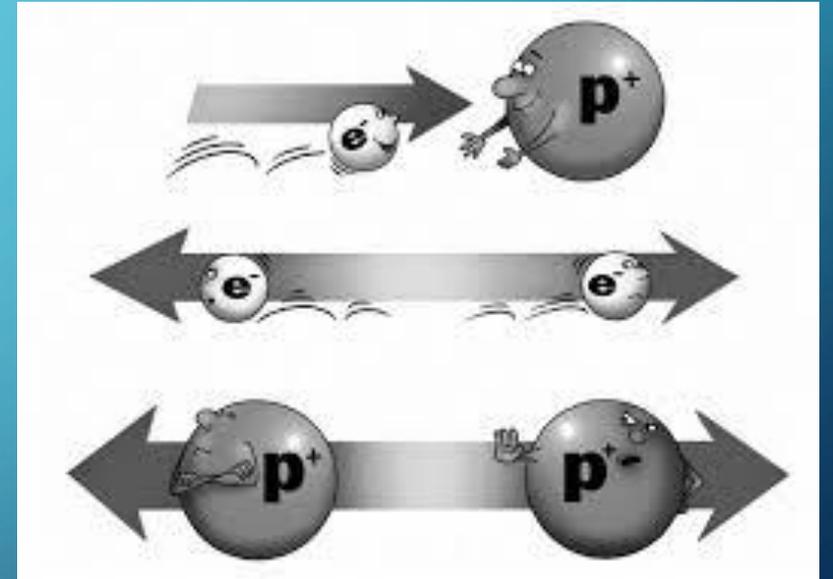
- Атомизм
- Электромагнетизм
- Гравитация

МАТЕМАТИКА

- Закон сохранения энергии
- Потенциальный характер сил
- Гамильтонов и Лагранжев формализмы

АТОМИЗМ, ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ

- Вещество состоит из атомов и молекул
- Электромагнитные силы (Закон Кулона)
- Потенциальное взаимодействие – энергия взаимодействия (потенциальная энергия) зависит только от расстояния между взаимодействующими телами.

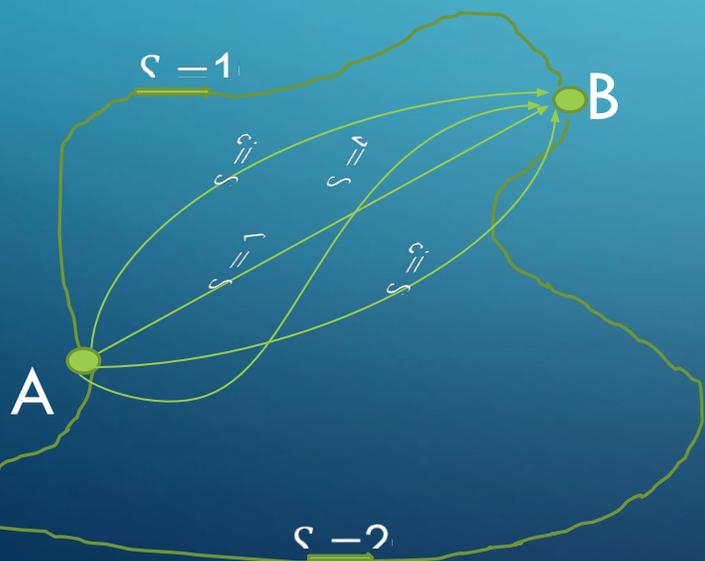


МАТЕМАТИКА

- Энергия = Кинетическая + Потенциальная
- Так для большинства известных сил (но не для всех)
- Потенциальная энергия однозначно соответствует силе

ПРИНЦИП НАИМЕНЬШЕГО ДЕЙСТВИЯ ЛАГРАНЖЕВ ФОРМАЛИЗМ

- II Закон Ньютона \Leftrightarrow Принцип наименьшего действия
- Для каждой консервативной системы можно написать действие
- $S = \int_{t_1}^{t_2} dt (T - U)$ – действие нерелятивистской частицы с потенциальной энергией U ,
- $S = \int d^4x (-\rho c^2 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}})$ - действие свободной релятивистской частицы



- Число, которое сопоставляется каждому возможному перемещению системы
- Выбирая, наименьшее или наибольшее из этих чисел можно получить действительное перемещение системы

ПРОБЛЕМА

- Лагранжев и Гамильтонов формализмы не описывают системы с диссипацией энергии
- Если стартовать не с законов Ньютона, а с принципа наименьшего, то не понятно, откуда брать силы
- Какой смысл в принципе наименьшего действия как формулировке механики

ЭЛЕКТРОДИНАМИКА

- Уравнения Максвелла – математическое обобщение эмпирических данных об электромагнетизме.
- Можно придумать такой же функционал (Действие S), варьированием которого получаться уравнения Максвелла.
- $S = \int d^4x \left(-\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu}\right)$, где $F_{\mu\nu} = \partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu$
- Можно написать действие, которое содержит как динамику частицы, так и электромагнитного поля, а также учитывает их взаимное влияние

- $S = \int d^4x \left(-\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} - \rho c^2 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} + j^\mu A_\mu\right)$

ОСТАЮТСЯ ВОПРОСЫ

Две разные теории имеют одинаковое математическое выражение

- ❖ Как быть с трением?
- ❖ Как понять какой вид имеет взаимодействие?
- ❖ Частицы материи взаимодействуют с полем, но при этом остается ощущение, что они по разные стороны баррикад
- ❖ Электрические и магнитные силы возникают между частицами, потому что они взаимодействуют с ЭМП, но при этом все ещё непонятно, что это и как себе их представить

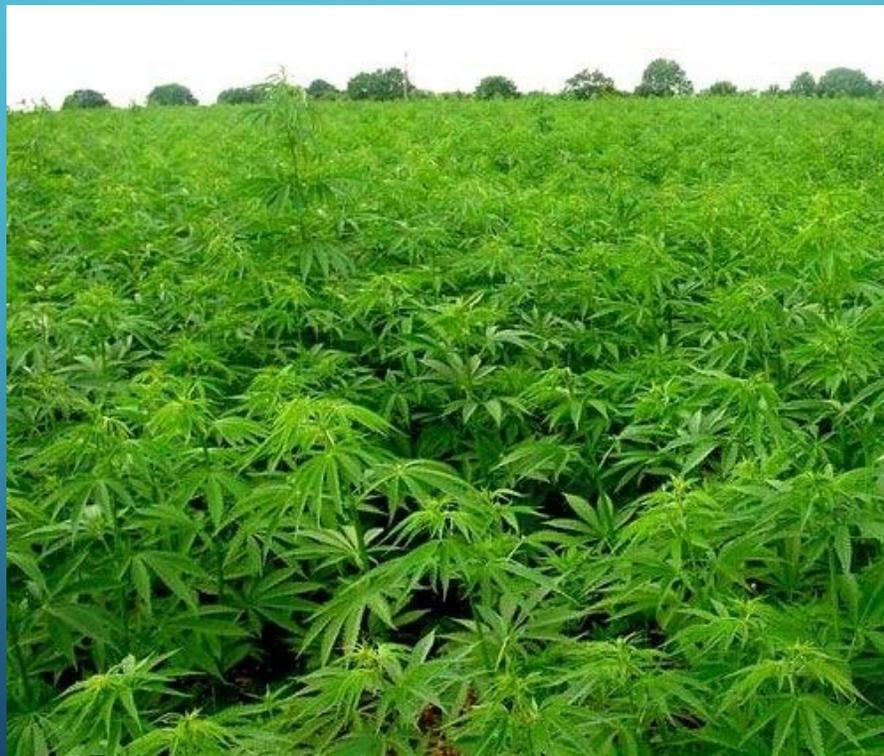


ОТВЕТЫ

- Трения нет
- Квантовая теория поля (КТП)
- Теория групп

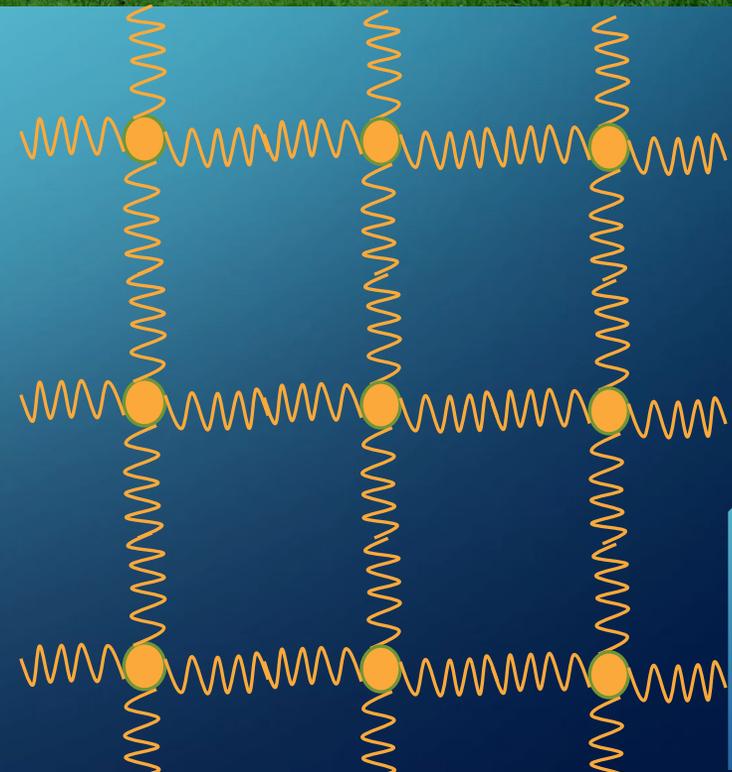
КТП

- Материя состоит из полей



ПОЛЕ

- Функция или совокупность числовых функций от координат пространства и времени
- Существует сразу во всем пространстве
- Каждая конкретная физическая конфигурация поля – решение, которое является экстремумом действия этого поля
- Бесконечная совокупность пружинок, колеблющихся со всеми возможными частотами



ЧАСТИЦЫ

- Квантовое поле – когда пружинки квантовые (они колеблются всегда)
- Когда одна из пружинок переходит в возбужденное состояние рождается частица
- Квантовые поля не функции, а операторы, которые отвечают за рождение и уничтожение частиц

КВАНТОВАЯ МЕХАНИКА ПОЛЕЙ

- Каждое поле описывается каким-то действием
- Поля бывают свободные и взаимодействующие
- Чтобы рождать и уничтожать частицы надо взаимодействовать

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПОЛЕЙ

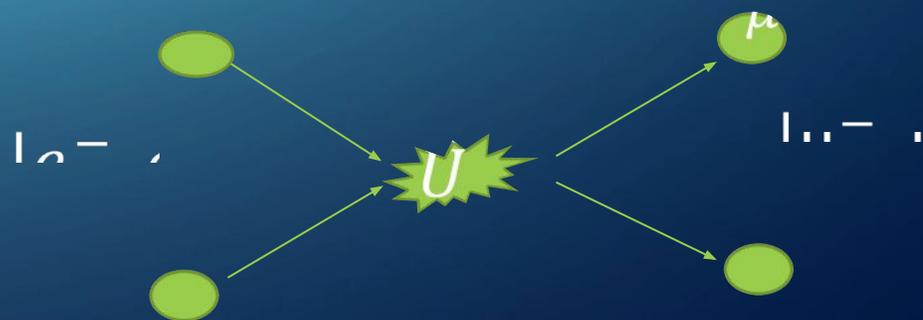
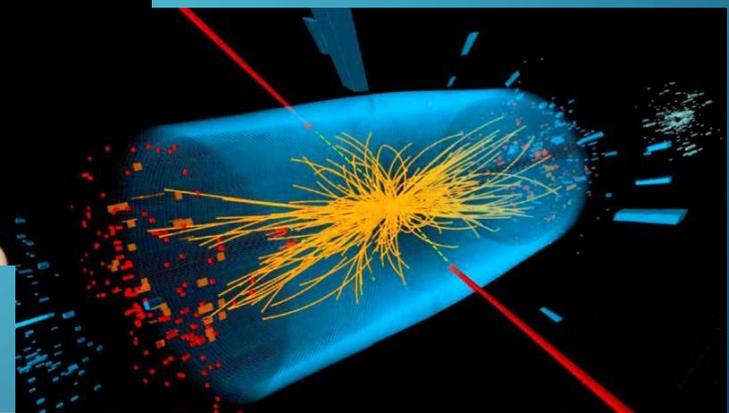
- Математически это члены в функции Лагранжа, которые содержат произведения функций или операторов поля друг на друга $S = \int d^4x (L(A) + L(B) + Const \times A^n \times B^m)$
- Уравнения перемешиваются
- Составляют одну систему. Совместное решение, которой даёт реальную физическую полевую конфигурацию

ВОПРОСЫ

- Как понять какого вида должно быть это взаимодействие?
- Как его себе представить?

КАК ПРЕДСТАВИТЬ

- Квантовая механика дает амплитуды событий
- Вероятность = |Амплитуда|²
- Эксперимент смотрит сечения рассеяния
- Сечение рассеяния пропорционально вероятности
- Амплитуда процесса пропорциональная корреляционной функции



КОРРЕЛЯЦИОННАЯ ФУНКЦИЯ

- Свободные поля –

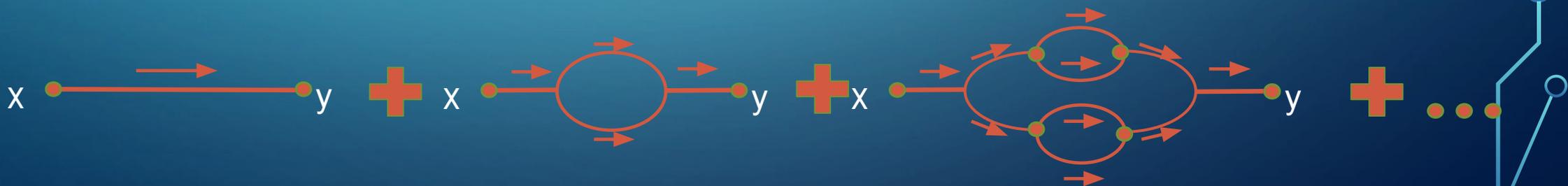
$$\langle \text{Вакуум(св)} | A_{\text{своб}}(x) A_{\text{своб}}(y) | \text{Вакуум(св)} \rangle$$



- Взаимодействующие поля –

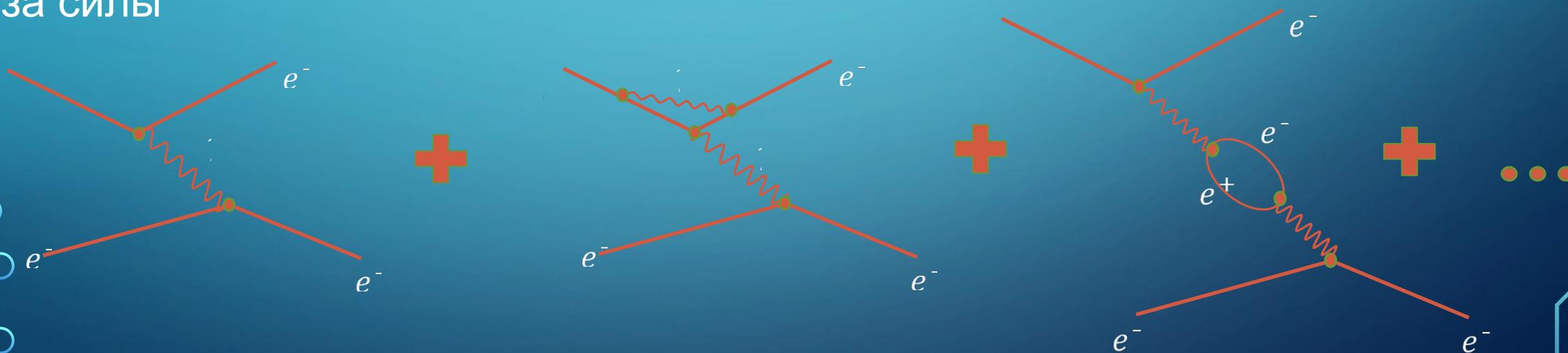
$$\langle \text{Вакуум(вз)} | A_{\text{вз}}(x) A_{\text{вз}}(y) | \text{Вакуум(вз)} \rangle$$

- $\langle \text{Вакуум(св)} | T \{ A_{\text{св}}(x) A_{\text{св}}(y) \hat{S} \} | \text{Вакуум(св)} \rangle$



ПОЛЯ

- Поля материи
- Поля переносчики взаимодействия – частицы, которые отвечают за силы



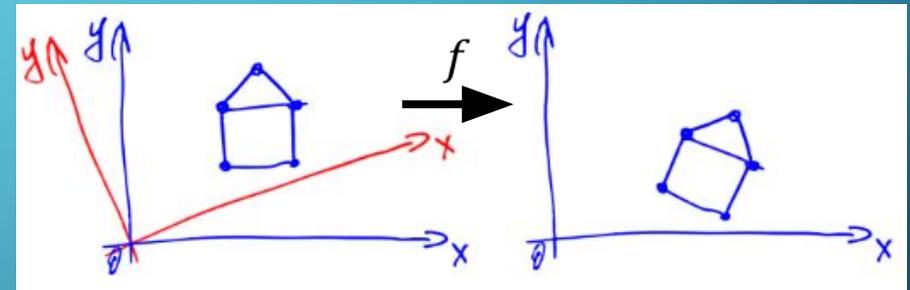
КАК ПОНЯТЬ КАКОЙ ДОЛЖНА БЫТЬ ВЕРШИНА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ (РАССМОТРИМ НА ПРИМЕРЕ КЭД)

- КЭД – квантовая электродинамика.
- КЭД описывает совместную жизнь частиц со спином $\frac{1}{2}$ совместно с электромагнитным полем (Электрон описывается уравнением Дирака, а ЭМП уравнениями Максвелла)
- Сам собой просится пример, конечно, с электронами и позитронами



ТАК КАК ВСЕ-ТАКИ ОНИ ВЗАИМОДЕЙСТВУЮТ

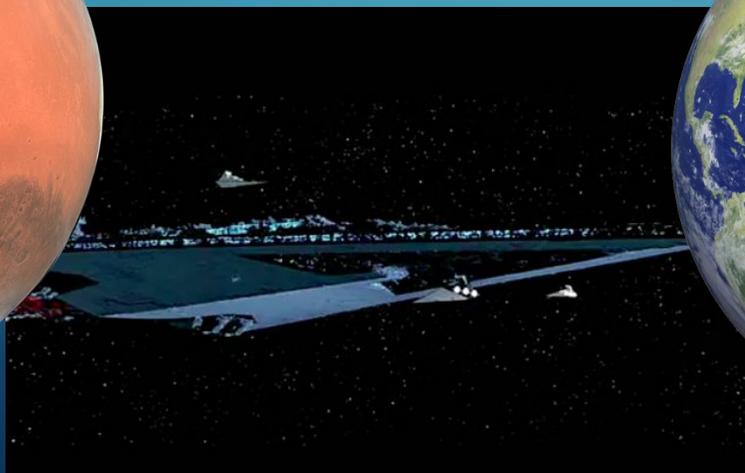
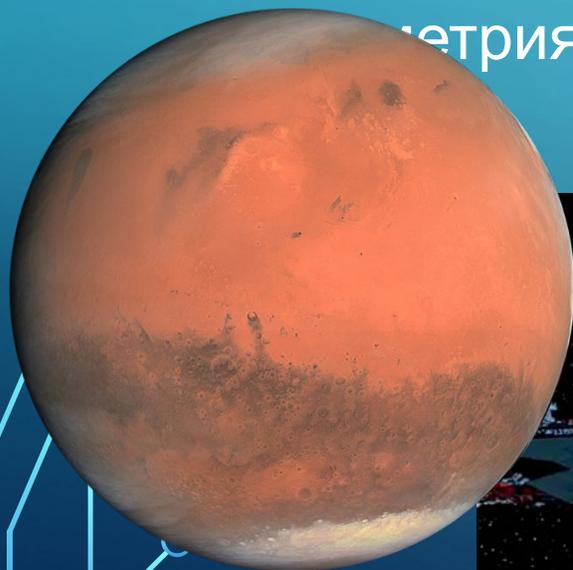
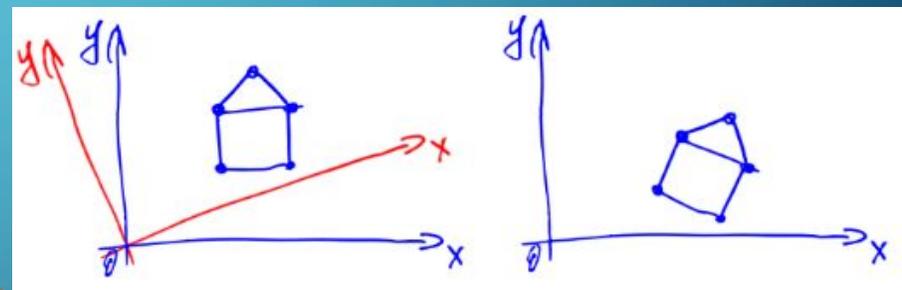
- Симметрия!!!
- Есть поле A
- Берем групповое преобразование f
- Применяем f к A
- Получаем $f(A) = A'$
- При этом действие этого поля и его уравнения не изменяют своего вида. $S(A) = S'(A')$



ПОЛЕ ЭЛЕКТРОНА

- $U(1)$ – первоначальная симметрия уравнения Дирака
- $U(1)$ то же самое, что поворот плоскости

симметрия была глобальная



ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ

- Если к электромагнитному полю добавить производную от любой скалярной функции ничего не поменяется
- ЭМП имеет четыре компоненты – A_t, A_x, A_y, A_z
- Берем произвольную функцию $\alpha(t, x, y, z)$
- Прибавляем скорость изменения этой функции, к ЭМП, т.е.

$$A'_t = A_t + \frac{\partial \alpha}{\partial t}, A'_x = A_x + \frac{\partial \alpha}{\partial x}, \dots$$

А ЧТО ЕСЛИ

- Симметрия калибровочная
- Уравнения движения меняются
- Мы не хотим, чтобы менялись
- Надо добавить поле, которое будет преобразовываться так, чтобы компенсировать это изменение, при этом сделать это минимальными усилиями
- Это и будет электромагнитное поле
Вот так и берется взаимодействие



ВЫВОДЫ

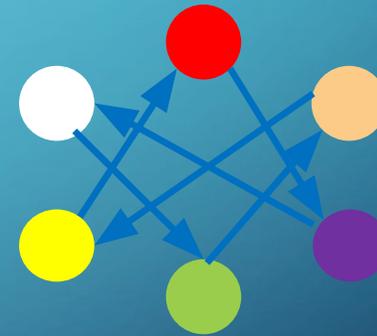
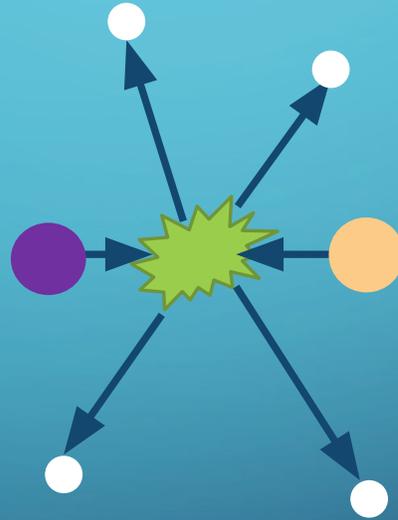
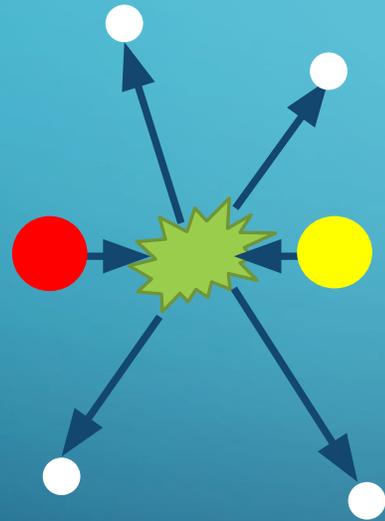
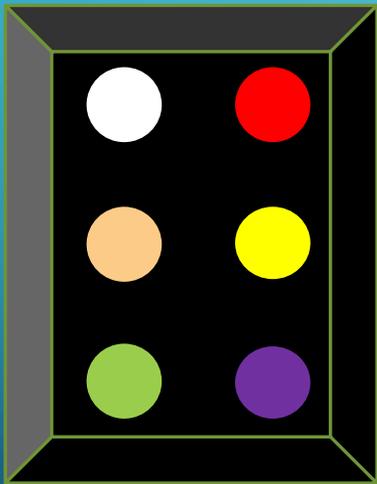
- Можно подбирать поля, которые по умолчанию обладают глобальными симметриями и делать из этих симметрий калибровочные
- Поля, которые нужно добавить, чтобы расширить глобальные симметрии до калибровочных как раз и являются переносчиками взаимодействий
- Взаимодействие частиц – обмен калибровочными бозонами

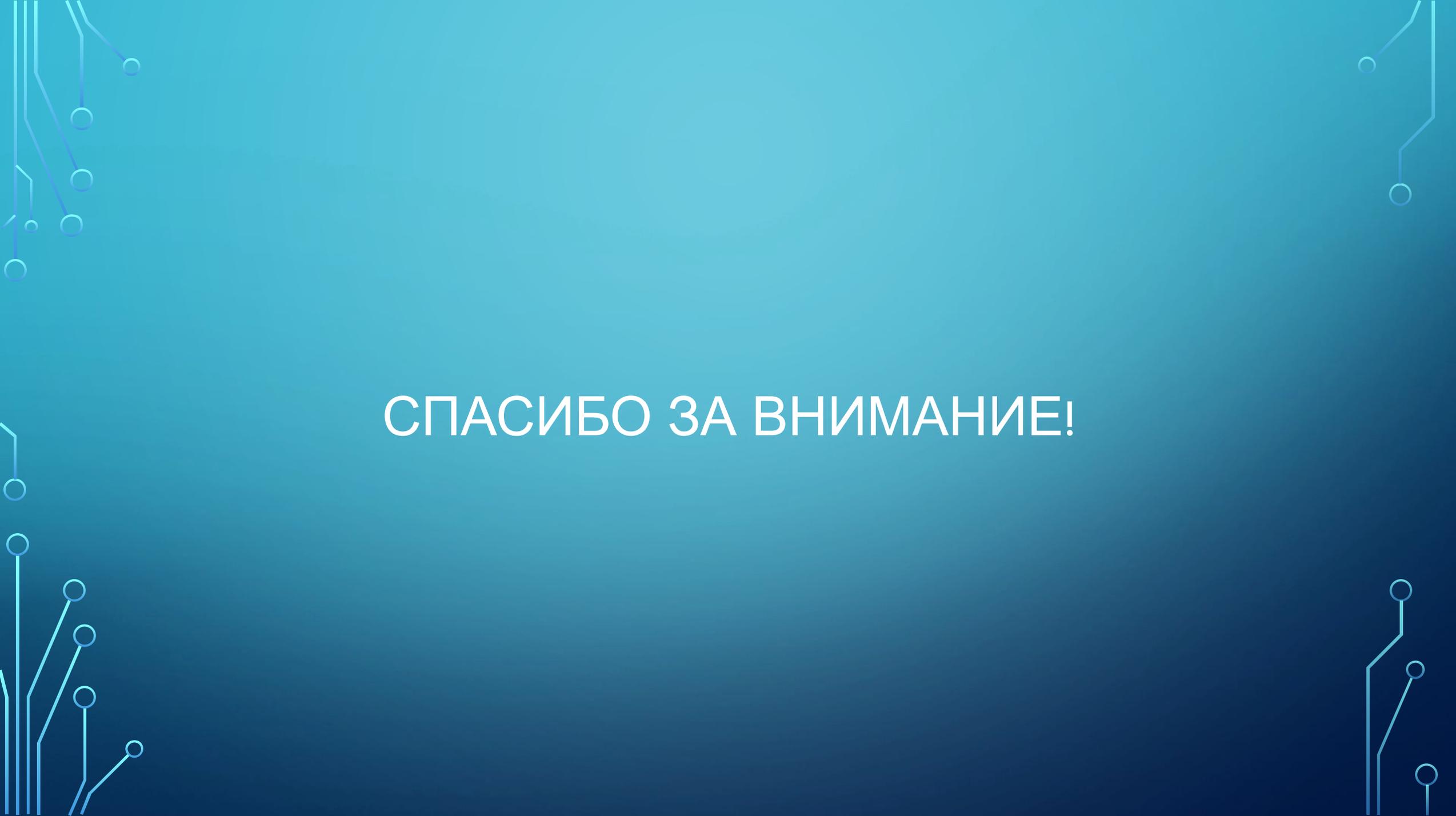
ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

- Электромагнитное – фотон (γ). Почти все лептоны, все кварки, и некоторые другие переносчики взаимодействия
- Сильное – глюоны (g). Все кварки
- Слабое – массивные векторные бозоны (W^+ , W^- , Z). Все лептоны

КАК ПОНЯТЬ КАКУЮ СИММЕТРИЮ ВЫБРАТЬ

- Эксперимент



The background is a dark blue gradient. In the corners, there are decorative white and light blue circuit-like patterns consisting of lines and circles, resembling a printed circuit board or a network diagram.

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!