wie unterscheidet man aber solch ein GUT-Modell vom SM?

→ brauchen experimentell verifizierbare Konsequenzen!

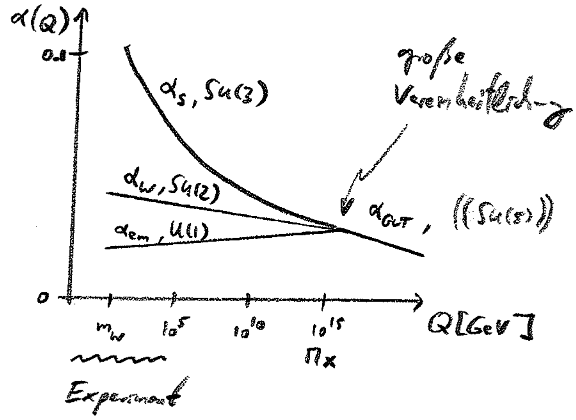
(1) <u>Vereinheitlichung der Eichkopplungen</u> $\alpha_i = \frac{g_i^2}{4\pi}$

haben anstelle von 3 Eichkopplungen ($\alpha_s, \alpha_w, \alpha_{em}$)

jetzt nur eine: α_{GUT}

bei niedrigen Energien: Sy. gebrochen

bei hohen Energien: Sy. sollte wiederhergestellt sein!



<u>Bem.:</u> die Vereinheitlichungs-Skala, $M_X \approx 10^{5}$ GeV, ist sehr groß!

Gravitationskraft $\sim \frac{\gamma m_1 m_2}{r^2}$ ⇒ kann sie bei solch kleinen Abständen immer noch vernachlässigt werden?

Abschätzung: Grav. ist wichtig, wenn Potential ≈ Ruhemasse

$$\frac{\gamma M^2/r}{Mc^2} \approx 1 \quad , \quad r \approx \frac{\hbar}{Mc} \quad \Rightarrow \quad M \approx \sqrt{\frac{\hbar c}{\gamma}} \approx 10^{19}\ \text{GeV}$$

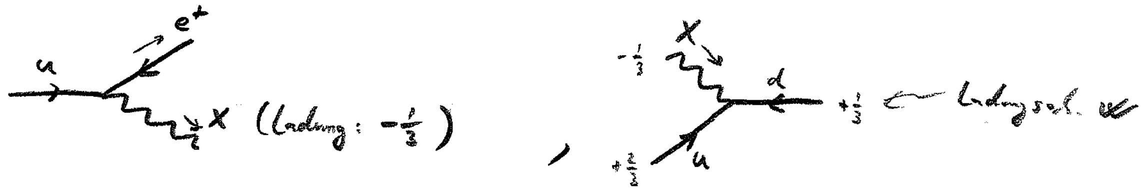
"natürliche Längeneinheit" — <u>Planck-Masse</u>

→ ~~Grav.~~ ist wahrscheinlich immer noch ok.
man ist aber bei M_X schon "in der Nähe" der Planck-Masse.

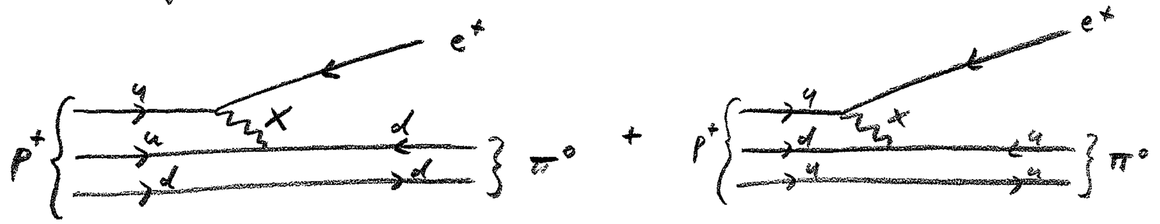
(2) <u>Proton-Zerfall</u>

sehr wichtige GUT-Vorhersage: Proton zerfällt!

Ursache: Quarks und Leptonen sind im gleichen Vektor;
bekommen dann geladene Ströme durch X-Boson-Austausch:



dies führt zu der Möglichkeit $p^+ \to e^+\pi^0$ ← $Lk(d\bar{d}, u\bar{u})$



Abschätzung der Zerfallsrate für diesen Kanal: s. Übung, Aufg. 56

aber (PDG Booklet): Lebensdauer des Protons $\tau_p \gtrsim 10^{33}$ Jahre

→ man bekommt untere Grenze für m_X (vgl. Abbildung oben)

→ falls m_{GUT} also endlich ist, sollte dieser Zerfall eines Tages beobachtet werden!

(3) <u>Neutrino-Massen</u>

eine "fundamentale" Theorie muss renormierbar sein.
das gilt jetzt also für die GUT.
das SM ist jetzt eine "<u>effektive Theorie</u>" die nur bei niedrigen Energien die Natur genau beschreibt.

→ können in $\hat{\mathcal{L}}_{SM}$ auch 4-Vertizes mit Fermionen, oder Vertizes mit ≥ 5 Teilchen unterbringen, wenn diese Operatoren durch die große Skala m_{GUT} <u>unterdrückt</u> sind, so dass sie für $m_{GUT} \to \infty$ verschwinden.

→ wichtiges Bsp: $\delta\hat{\mathcal{L}} = -\frac{h_\nu^2}{m_{GUT}} \hat{\bar{L}}_{1L} \hat{\tilde{\Phi}} \hat{\tilde{\Phi}}^\dagger \hat{L}_{1L}$ + 2.+3. Generation

führt zu <u>Massentermen</u> <u>für</u> <u>Neutrinos</u>, s. unten (§9) der obige Massenterm (mit $\hat{L}_{1L} = \begin{pmatrix} \nu_L \\ e_L \end{pmatrix}$) genügt noch nicht [da $\bar{\nu}_L \nu_L = 0$]. Es gibt aber einige Varianten davon (s. z.B. [Cottingham/Greenwood, Kap. 19-21]) ...

Resultat: nach $\hat{\tilde{\Phi}} \to \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} v \\ 0 \end{pmatrix}$ bekommen Neutrinos

eine Masse $m_\nu \sim \dfrac{h_\nu^2 v^2/2}{m_{GUT}}$.

bisher kennen wir die leichtesten/schwersten Fermionmassen

als $m_e = \frac{h_e v}{\sqrt{2}} \approx 0.5\ \text{MeV}$, $m_t = \frac{h_t v}{\sqrt{2}} \approx 175\ \text{GeV}$

Vermutung: h_ν sollte in diesem Bereich der Yukawakopplungen liegen, also $h_e \lesssim h_\nu \lesssim h_t$

aus Übung, Aufg. 56: $m_{GUT} \gtrsim 10^{15}\ \text{GeV}$

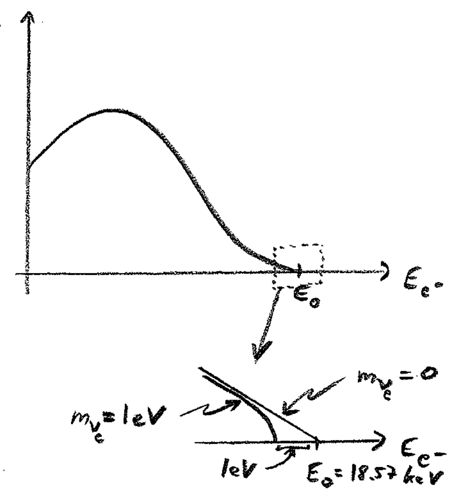
also $\dfrac{(0.5\ \text{MeV})^2}{10^{15}\ \text{GeV}} \approx \dfrac{10^{11}\ \text{eV}^2}{10^{24}\ \text{eV}} \lesssim m_\nu \lesssim \dfrac{(175\ \text{GeV})^2}{10^{15}\ \text{GeV}} \approx \dfrac{10^{22}\ \text{eV}^2}{10^{24}\ \text{eV}}$

$$10^{-13}\ \text{eV} \lesssim m_\nu \lesssim 10^{-2}\ \text{eV}$$

Experimentelle Bestimmung der Neutrinomassen

wie kann man so kleine Massen messen?

(a) direkt



Tritium β-Zerfall ($\tau_{1/2} = 12.32$ Jahre)

$^3H \to {}^3He + e^- + \bar{\nu}_e$

sehr schwierige Messung!

Mainzer Experiment 1997-2001:

$m_{\nu_e} < 2.2\ \text{eV}$

KATRIN (Karlsruhe Tritium Neutrino Experiment) 2009 - ...

Ziel: $m_{\nu_e} < 0.2\ \text{eV}$ "präziseste Waage der Welt"