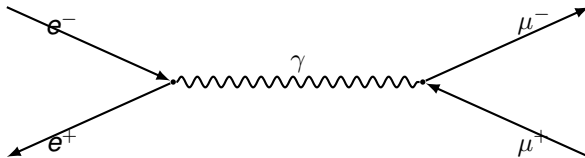


Діаграми Фейнмана

Олександр Зенаєв

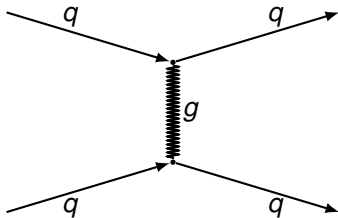
Діаграми Фейнмана: ідея

- Кожна діаграма — символічне зображення квантової амплітуди.
- Лінії — частинки, вершини — взаємодії (пропорційні константам зв'язку).
- Зовнішні лінії — початкові та кінцеві частинки (on-shell).
- Внутрішні лінії — віртуальні частинки (пропагатори, off-shell).
- У вершинах зберігаються імпульс, заряд, колір та інші квантові числа.
- Діаграми Фейнмана – це не траєкторії, а доданки в розкладі за константою зв'язку.

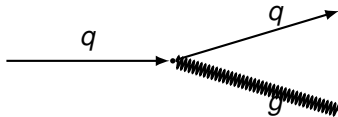


- Визначити початковий і кінцевий стан.
- Побудувати всі топології з мінімальною кількістю вершин (leading order, LO). Це “древесний”, або борнівський рівень (tree level, Born level)
- Позначити типи ліній:
 - ▶ ферміони — суцільні лінії зі стрілками,
 - ▶ фотони, W , Z -бозони — хвилясті, глюони — спіральні,
 - ▶ скаляри — пунктирні (бозон Хіггса).
- Врахувати всі допустимі перестановки зовнішніх ліній.
- У КЕД єдина вершина — ферміон-бозон-ферміон.
- У КХД також можливі також 3-глюонні та 4-глюонні вершини.

- На ЛХЦ основний процес: обмін глюоном у t -каналі.

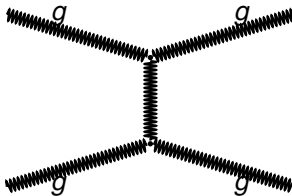
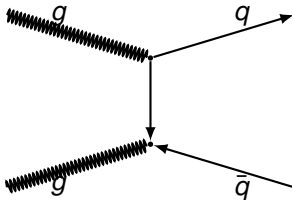


- Випромінювання глюона — джерело партонних струменів (parton showers, PS).



Народження пари $gg \rightarrow q\bar{q}$

- При високих енергіях два глюони можуть створити пару кварк–антикварк, або обмінятися глюоном.



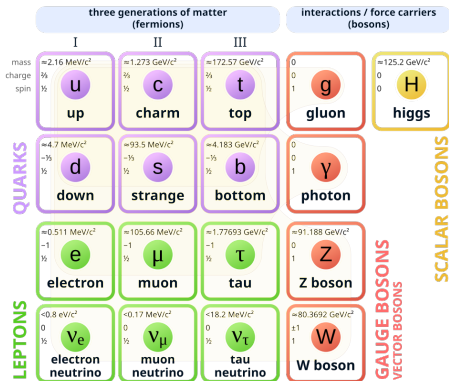
- This is Monte-Carlo generator at NLO+PS
- Download code from <http://madgraph.phys.ucl.ac.be/cgi-bin/Register/download.cgi> (latest version)
- Untar:
tar xvpzf MG5_aMC_v3.6.5.tar.gz

- Start:
./bin/mg5_aMC

```
Using default text editor "nano". Set another one in ./input/mg5_configuration.txt
Using default eps viewer "evince". Set another one in ./input/mg5_configuration.txt
Using default web browser "firefox". Set another one in ./input/mg5_configuration.txt
Loading default model: sm
INFO: Restrict model sm with file models/sm/restrict_default.dat .
INFO: Run "set stdout_level DEBUG" before import for more information.
INFO: Change particles name to pass to MG5 convention
Defined multiparticle p = g u c d s u~ c~ d~ s~
Defined multiparticle j = g u c d s u~ c~ d~ s~
Defined multiparticle l+ = e+ mu+
Defined multiparticle l- = e- mu-
Defined multiparticle vl = ve vm vt
Defined multiparticle vl~ = ve~ vm~ vt~
Defined multiparticle all = g u c d s u~ c~ d~ s~ a ve vm vt e- mu- ve~ vm~ vt~ e+ mu+ t b t~ b~ z w+ h w- ta- ta+
MG5_aMC>
```

- (not necessary, it is loaded by default) Import SM:
import model sm
- generate process (at LO), e.g.
p p > generate t t~
- display diagrams:
display diagrams
- generate process at NLO QCD
p p > generate t t~ [QCD]
- Exit:
quit

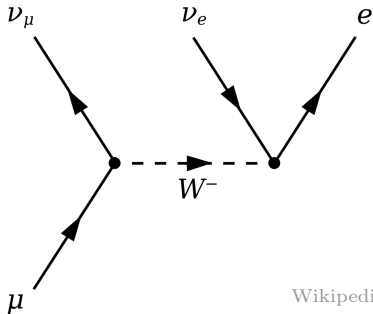
Standard Model of Elementary Particles



- Нестабільні частинки переходять у стани з меншою масою.
- Закон збереження:
 - ▶ енергії, імпульсу, заряду;
 - ▶ лептонного, баріонного числа;
 - ▶ спіну та його проекції (спіральність).
- Розпади описуються тими ж вершинами, що й зіткнення у діаграмах Фейнмана.

$$\mu^{-} \rightarrow e^{-} + \bar{\nu}_e + \nu_{\mu}$$

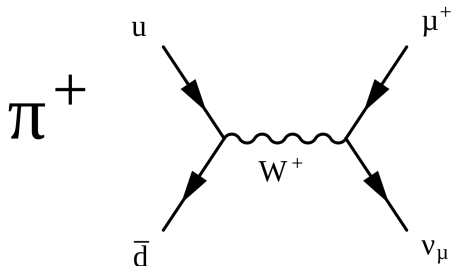
- Відбувається через слабку взаємодію.
- Мюон випромінює W^{-} і перетворюється у ν_{μ} .
- Потім W^{-} розпадається на e^{-} і $\bar{\nu}_e$.
- Particle Data Group (PDG):
<https://pdglive.lbl.gov/Particle.action?node=S004&init=0>



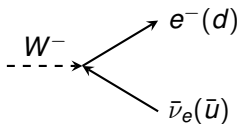
Wikipedia

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$$

- π^+ складається з кварків $u\bar{d}$.
- Розпад на $e^+ + \nu_e$ теж можливий, але пригнічений фактором $\sim m_{e^+}^2/m_{\mu^+}^2 \sim 10^{-4}$ через спіральність (векторна природа слабкої взаємодії)



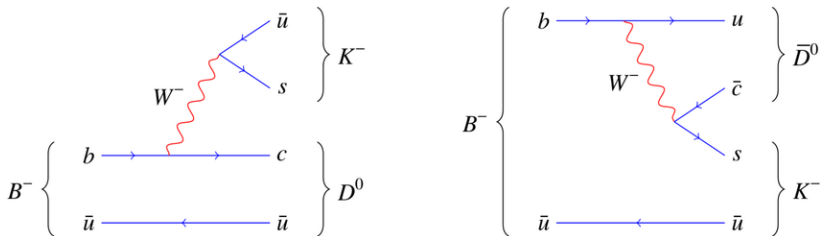
- $W^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e$
- $W^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu$
- $W^- \rightarrow d\bar{u}, s\bar{c}, b\bar{t}$



Розпади кварків

- За рахунок слабкої взаємодії (W^\pm)
- t розпадається одразу
- Інші кварки спочатку "адронізуються" (сильна взаємодія: конфайнмент), а потім можуть розпадатися в адронах

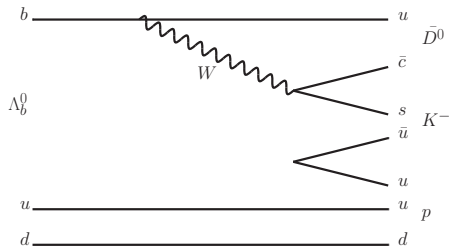
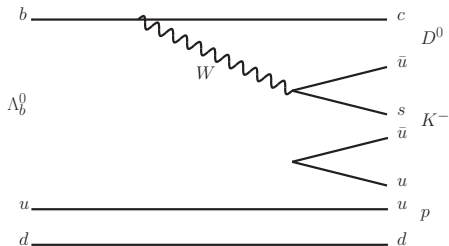
$$\begin{bmatrix} |V_{ud}| & |V_{us}| & |V_{ub}| \\ |V_{cd}| & |V_{cs}| & |V_{cb}| \\ |V_{td}| & |V_{ts}| & |V_{tb}| \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.97435 \pm 0.00016 & 0.22500 \pm 0.00067 & 0.00369 \pm 0.00011 \\ 0.22486 \pm 0.00067 & 0.97349 \pm 0.00016 & 0.04182^{+0.00085}_{-0.00074} \\ 0.00857^{+0.00020}_{-0.00018} & 0.04110^{+0.00083}_{-0.00072} & 0.999118^{+0.000031}_{-0.000036} \end{bmatrix}$$



Розпади кварків

- За рахунок слабкої взаємодії (W^\pm)
- t розпадається одразу
- Інші кварки спочатку "адронізуються" (сильна взаємодія: конфайнмент), а потім можуть розпадатися в адронах

$$\begin{bmatrix} |V_{ud}| & |V_{us}| & |V_{ub}| \\ |V_{cd}| & |V_{cs}| & |V_{cb}| \\ |V_{td}| & |V_{ts}| & |V_{tb}| \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.97435 \pm 0.00016 & 0.22500 \pm 0.00067 & 0.00369 \pm 0.00011 \\ 0.22486 \pm 0.00067 & 0.97349 \pm 0.00016 & 0.04182^{+0.00085}_{-0.00074} \\ 0.00857^{+0.00020}_{-0.00018} & 0.04110^{+0.00083}_{-0.00072} & 0.999118^{+0.000031}_{-0.000036} \end{bmatrix}$$



Розпади бозона Гігса

- Зв'язок Гігса пропорційний масі частинки.
- Основні канали:

$$H \rightarrow b\bar{b}, \quad H \rightarrow WW^*, \quad H \rightarrow ZZ^*, \quad H \rightarrow \tau^+\tau^-, \quad H \rightarrow \gamma\gamma$$

Higgs boson decay channels

