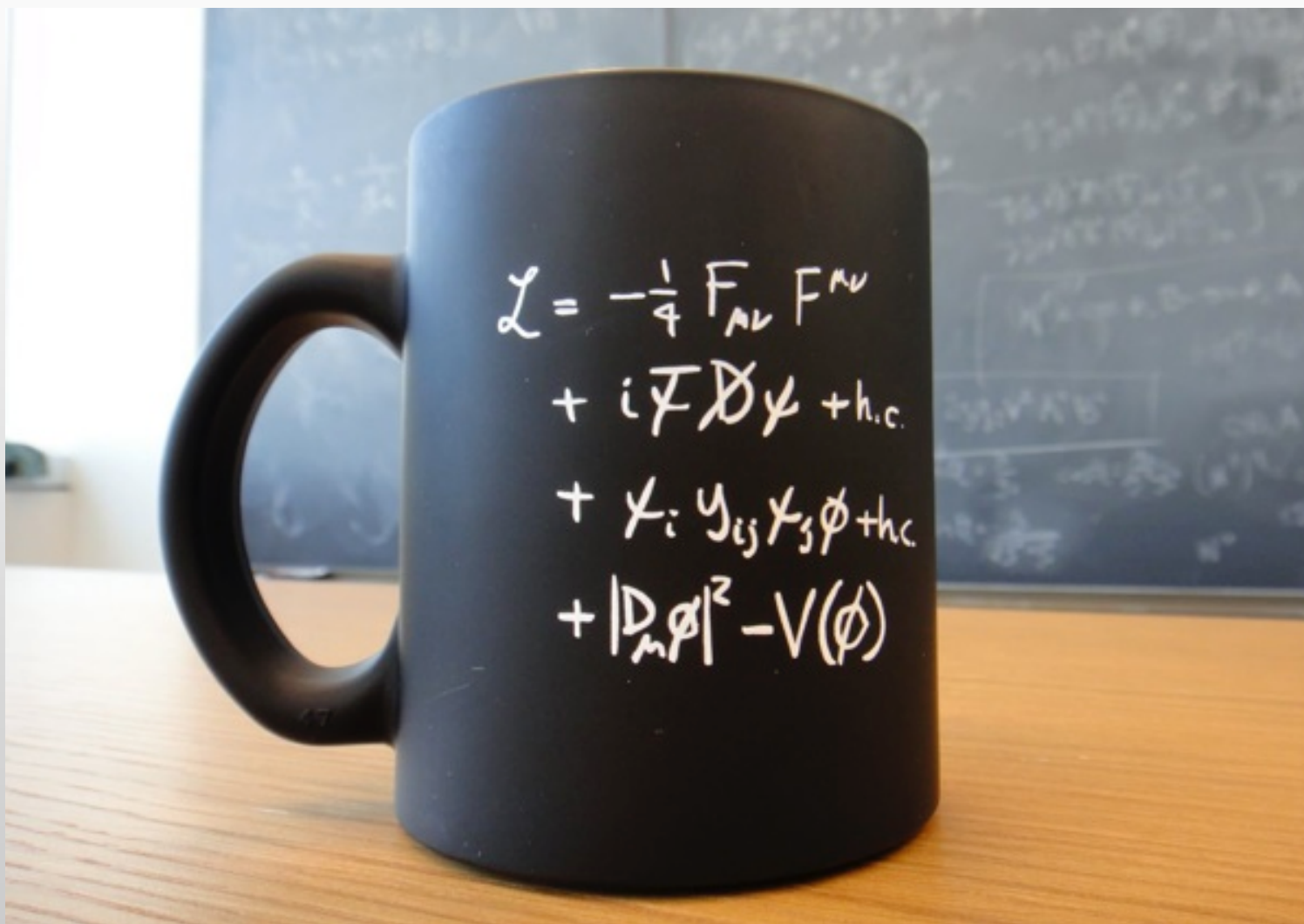




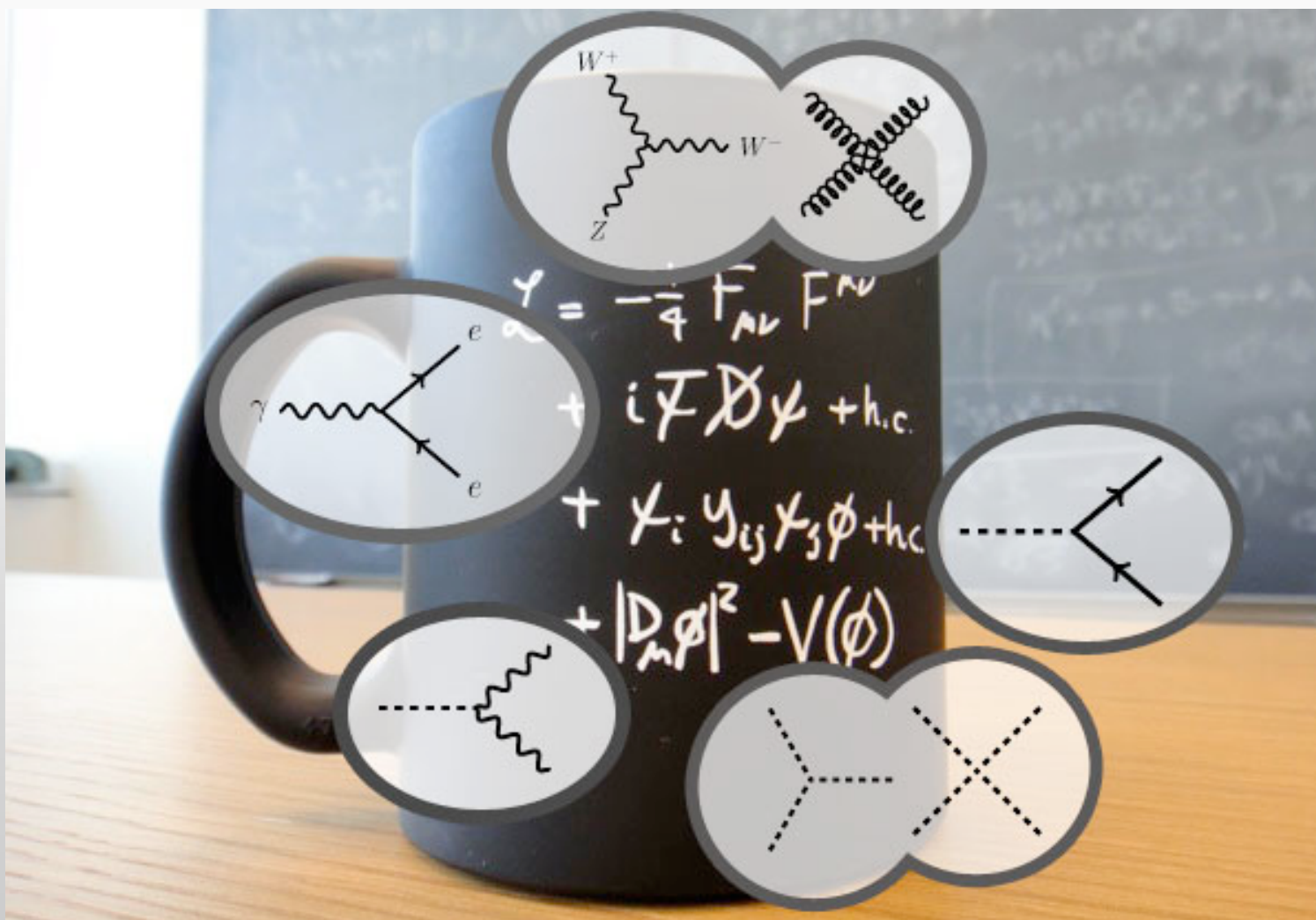
Lagrangiana del Modello Standard



Credit: Flip Tanedo, QuantumDiaries.org



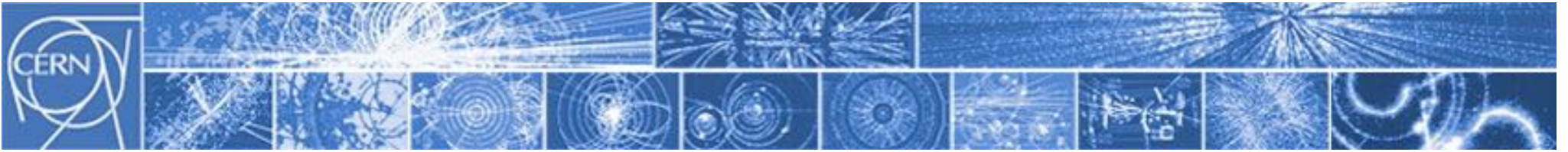
Lagrangiana del Modello Standard



presentazione
per insegnanti:

J. Woithe, J. Wiener, F. Van der Veken, *Let's have a coffee with the Standard Model of particle physics!*, Phys. Educ. 52 (2017) 034001

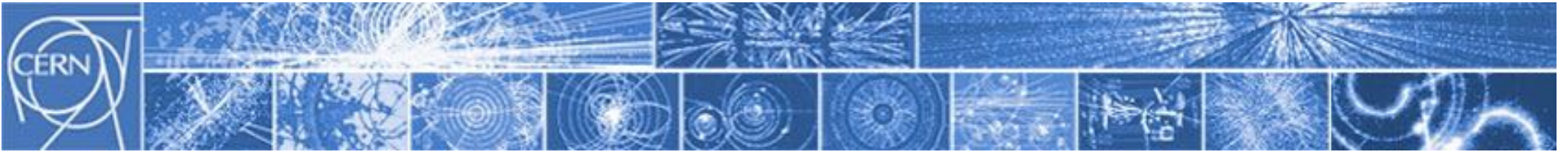
Credit: Flip Tanedo, QuantumDiaries.org



I diagrammi di Feynman al lavoro

Esempio 1: collisione e^+e^-

(semirigoroso)

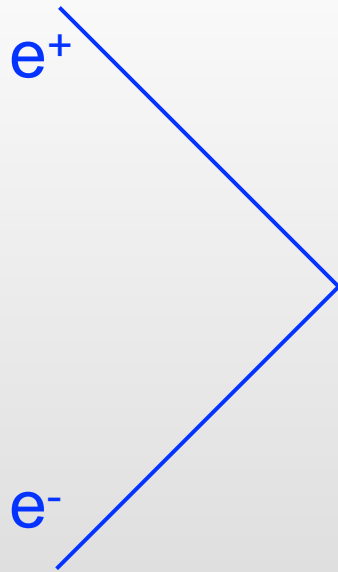


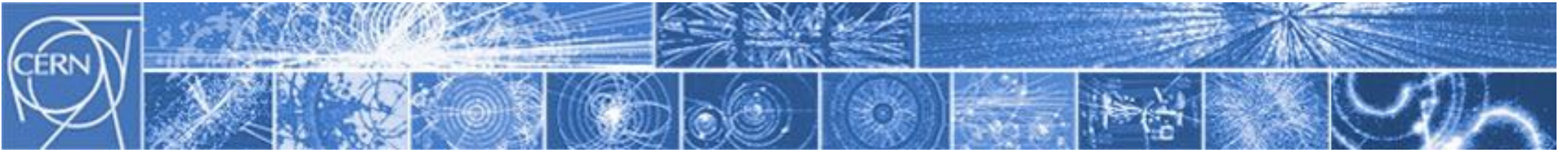
I diagrammi di Feynman al lavoro

Esempio 1: collisione e^+e^-

(semirigoroso)

LEP
105 GeV



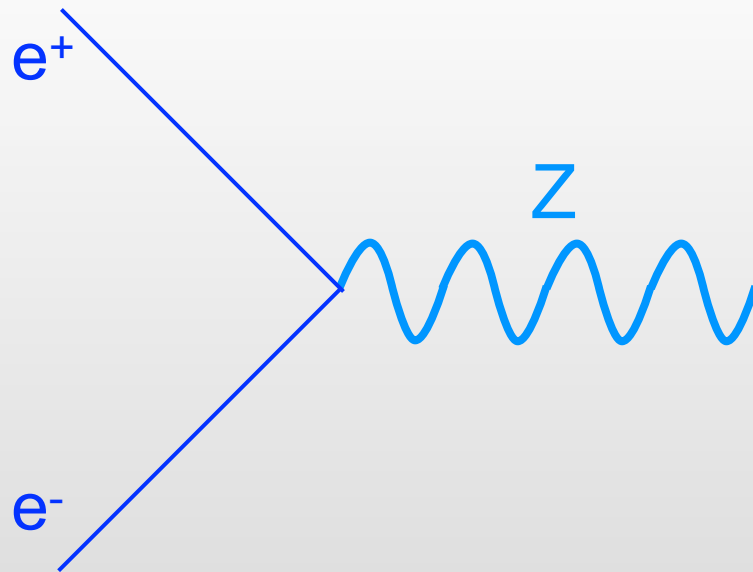


I diagrammi di Feynman al lavoro

Esempio 1: collisione e^+e^-

(semirigoroso)

LEP
105 GeV



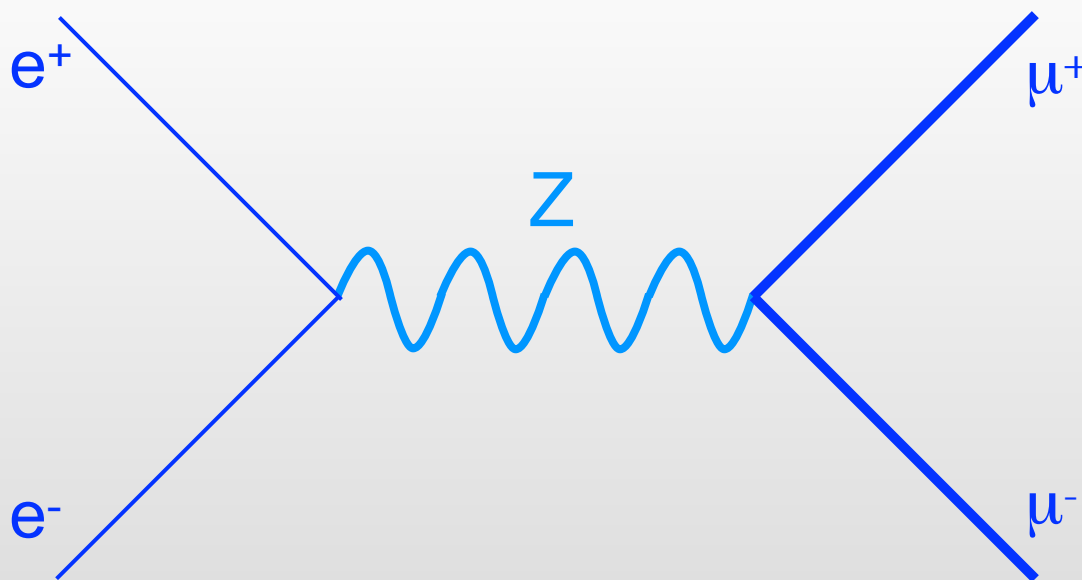


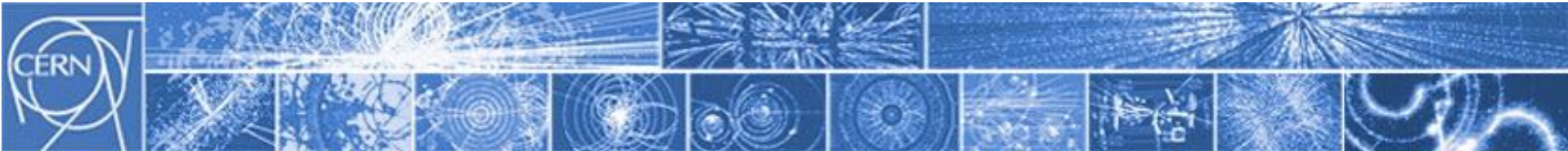
I diagrammi di Feynman al lavoro

Esempio 1: collisione e^+e^-

(semirigoroso)

LEP
105 GeV



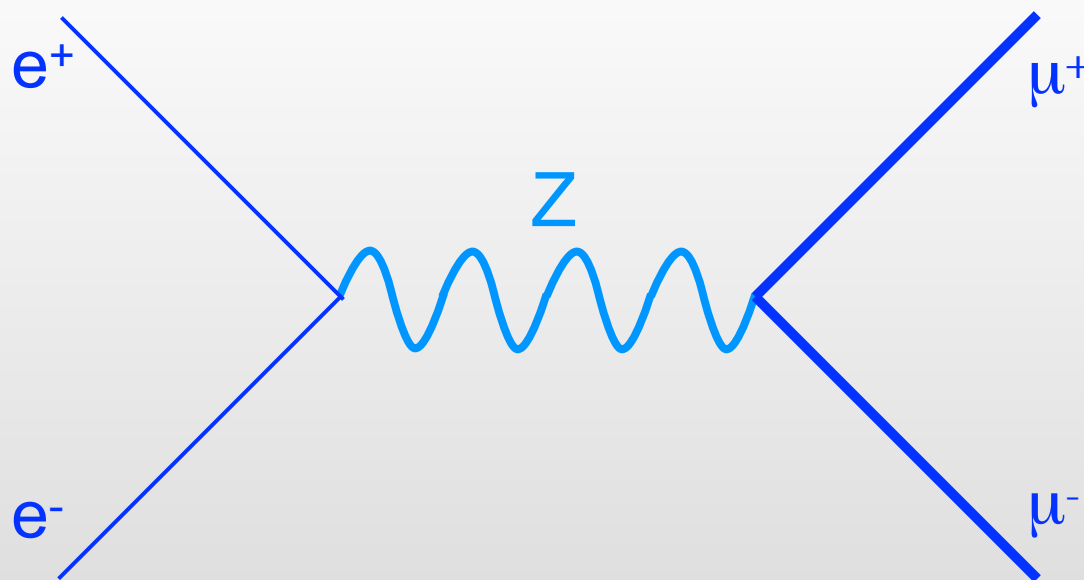


I diagrammi di Feynman al lavoro

Esempio 1: collisione e^+e^-

(semirigoroso)

LEP
105 GeV



- carica elettrica*
- sapore leptonic indiv.*



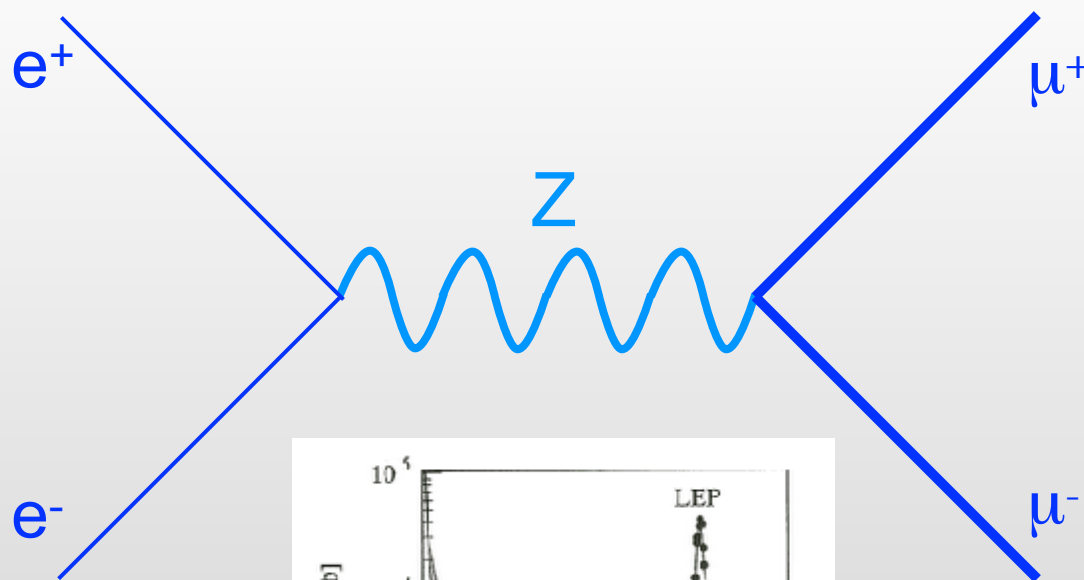
I diagrammi di Feynman al lavoro

Esempio 1: collisione e^+e^-

(semirigoroso)

LEP

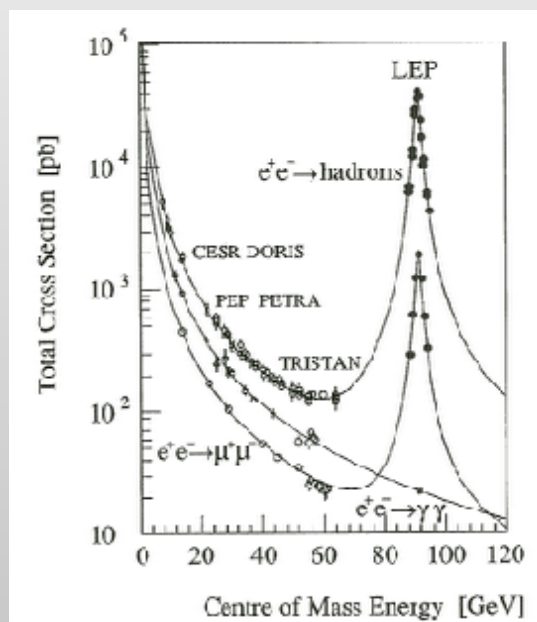
105 GeV



- carica elettrica
- sapore leptonico indiv.

La *risonanza* tradisce la produzione del *mediatore*.

Magari scopriremo così un nuovo *mediatore*.



Domande per i più motivati:
 perché la sezione d'urto $e^+e^- \rightarrow \text{hadrons}$ è più grande di quella $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$?
 sai calcolare a priori il rapporto?
 e perché quella $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma$ si comporta diversamente?

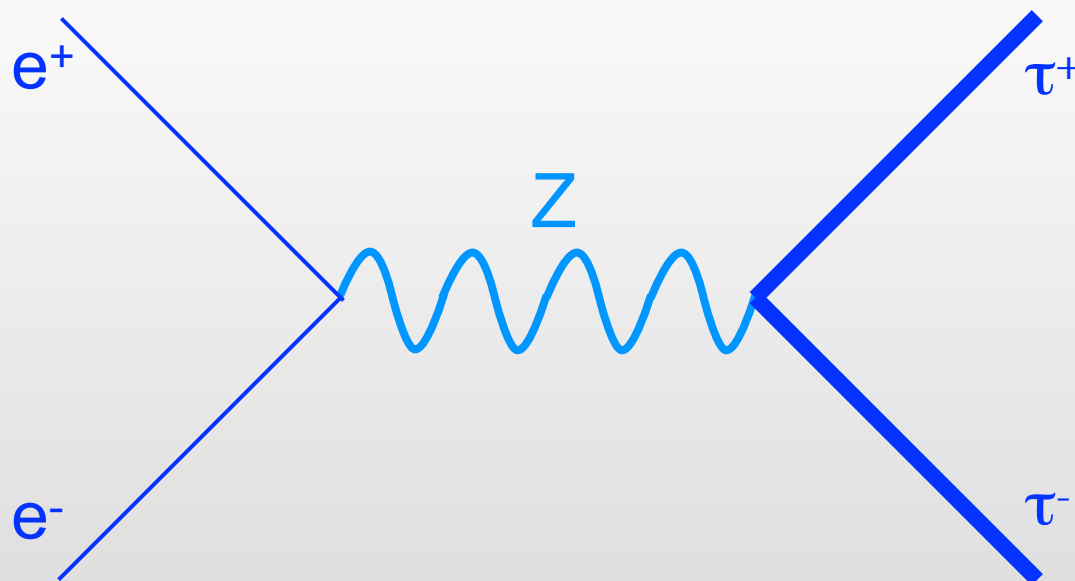


I diagrammi di Feynman al lavoro

Esempio 1: collisione e^+e^-

(semirigoroso)

LEP
105 GeV



- carica elettrica*
- sapore leptonic indiv.*

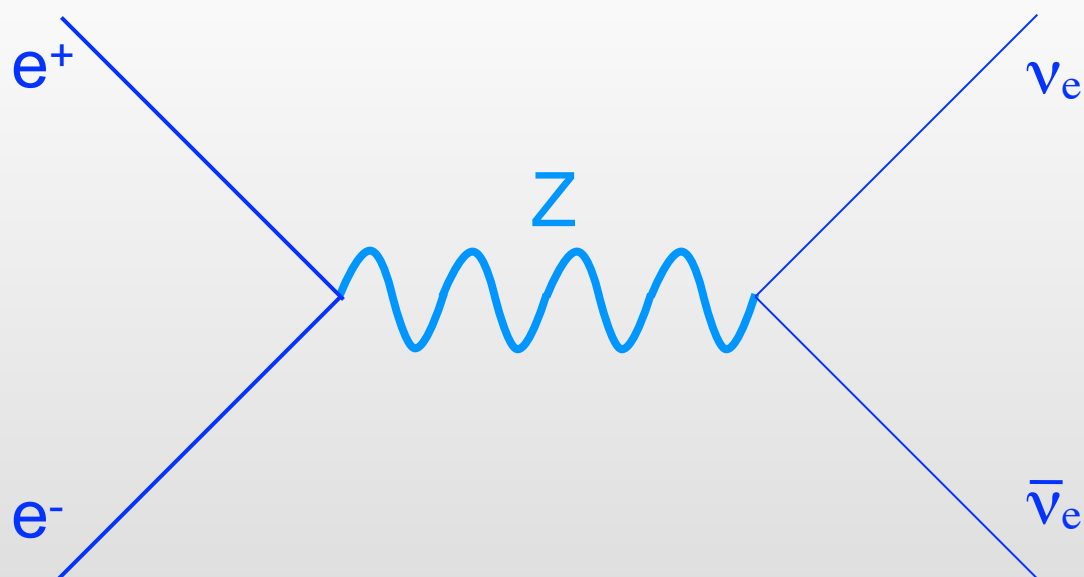


I diagrammi di Feynman al lavoro

Esempio 1: collisione e^+e^-

(semirigoroso)

LEP
105 GeV



- carica elettrica*
- sapore leptonic indiv.*

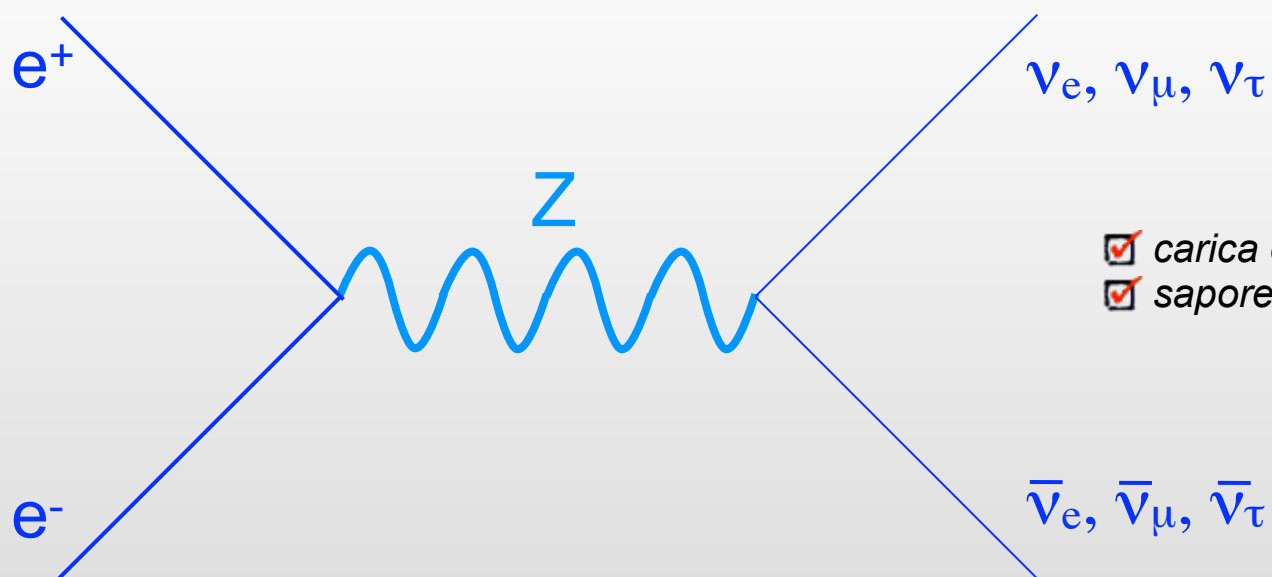


I diagrammi di Feynman al lavoro

Esempio 1: collisione e^+e^-

(semirigoroso)

LEP
105 GeV



- carica elettrica*
- sapore leptonic indiv.*

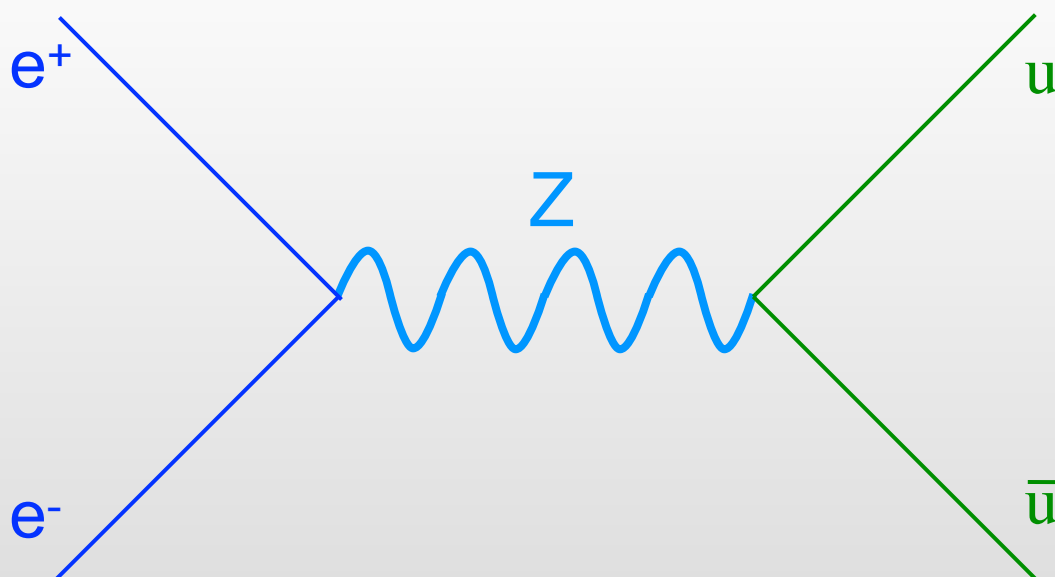


I diagrammi di Feynman al lavoro

Esempio 1: collisione e^+e^-

(semirigoroso)

LEP
105 GeV



- carica elettrica*
- sapore leptonic indiv.*
- colore*
- sapore barionico tot.*

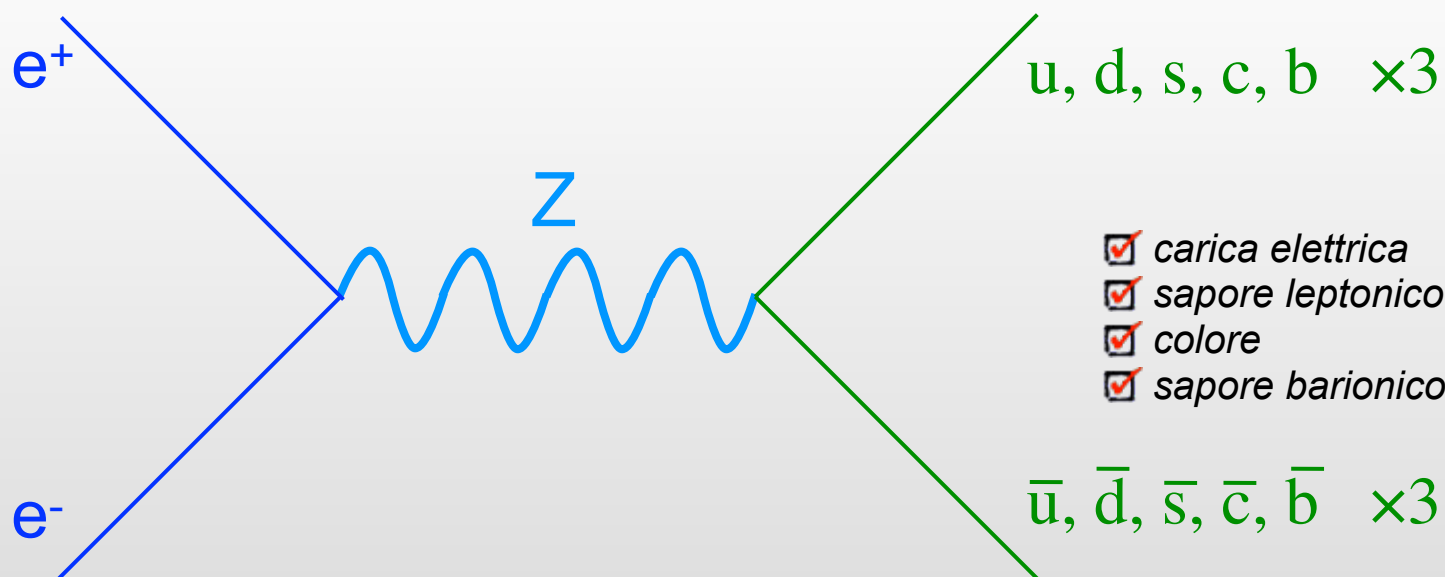


I diagrammi di Feynman al lavoro

Esempio 1: collisione e^+e^-

(semirigoroso)

LEP
105 GeV



- carica elettrica*
- sapore leptonic indiv.*
- colore*
- sapore barionico tot.*

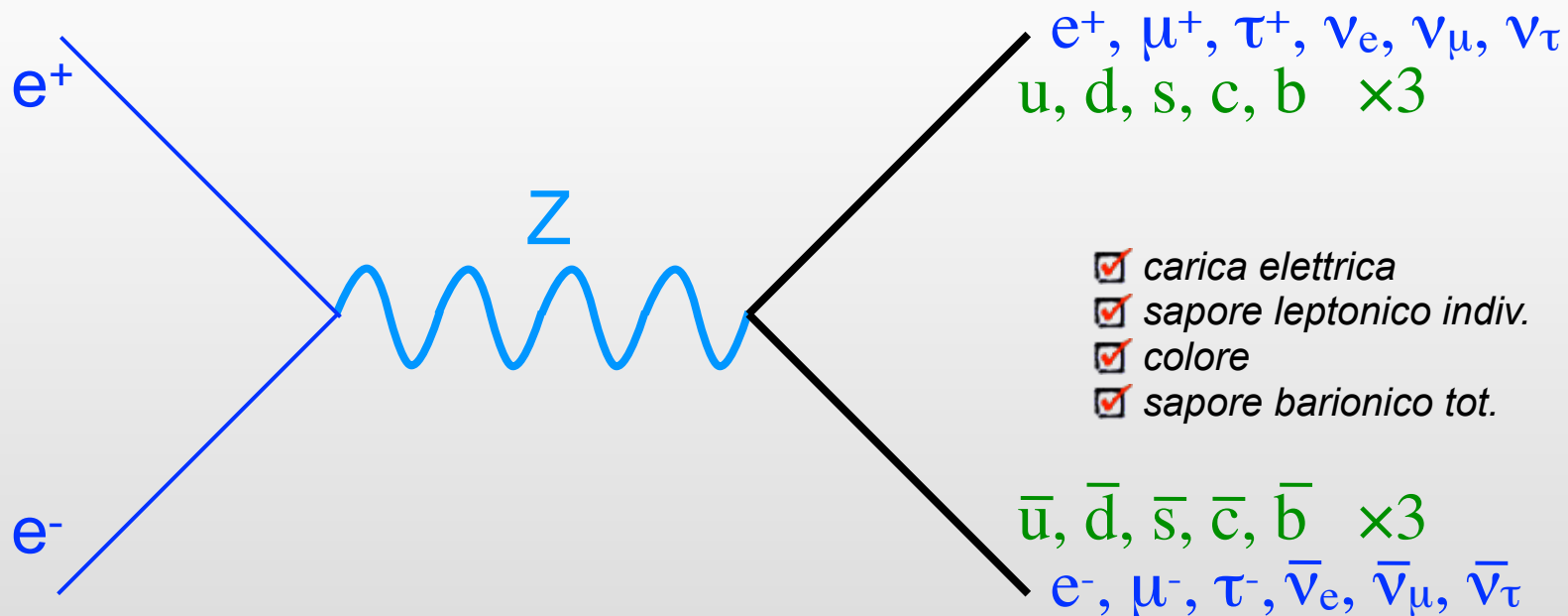


I diagrammi di Feynman al lavoro

Esempio 1: collisione e^+e^-

(semirigoroso)

LEP
105 GeV



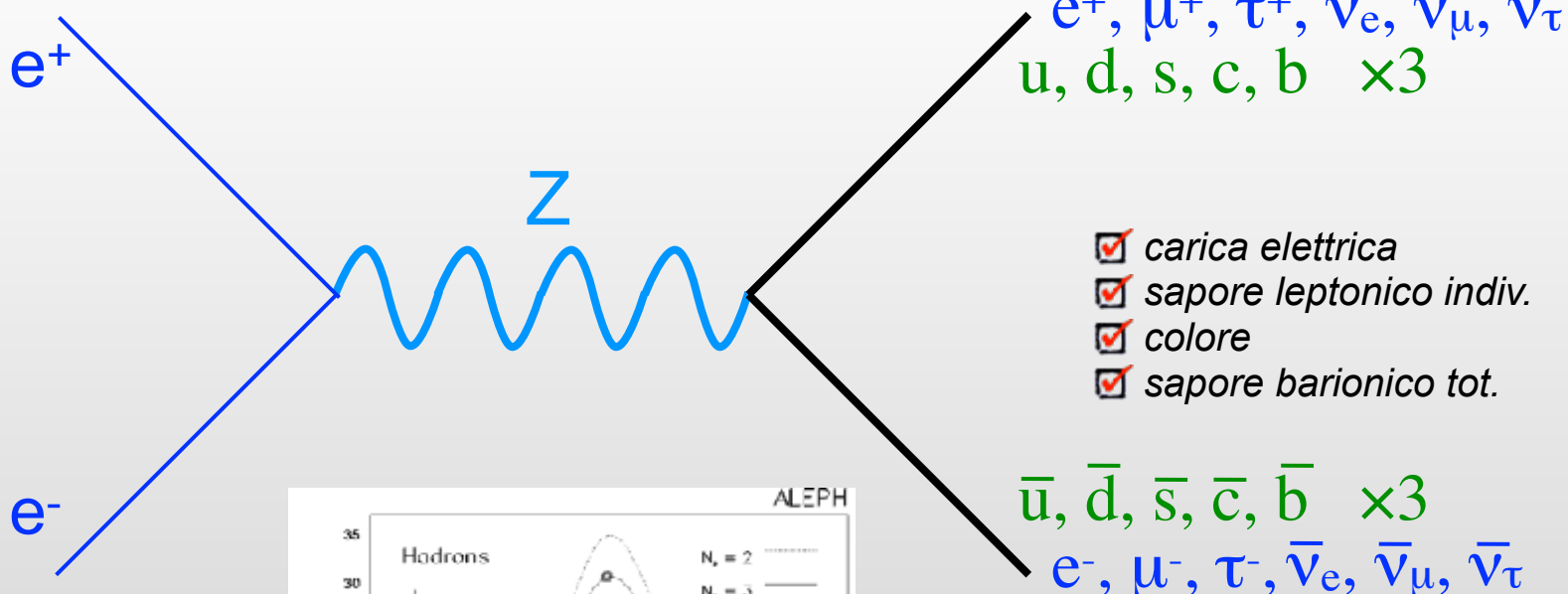


I diagrammi di Feynman al lavoro

Esempio 1: collisione e^+e^-

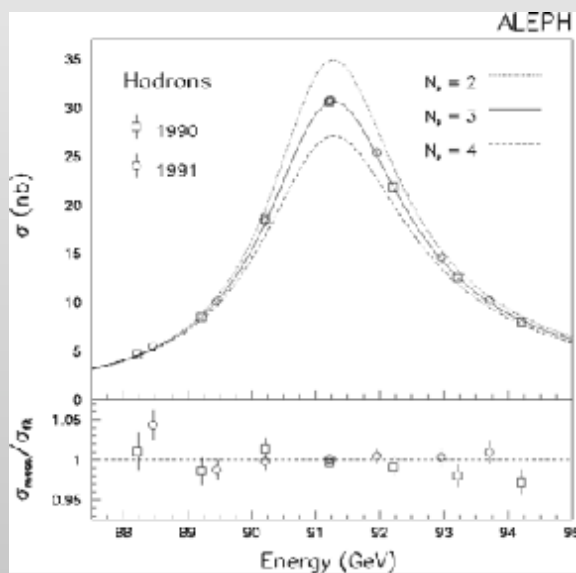
(semirigoroso)

LEP
105 GeV



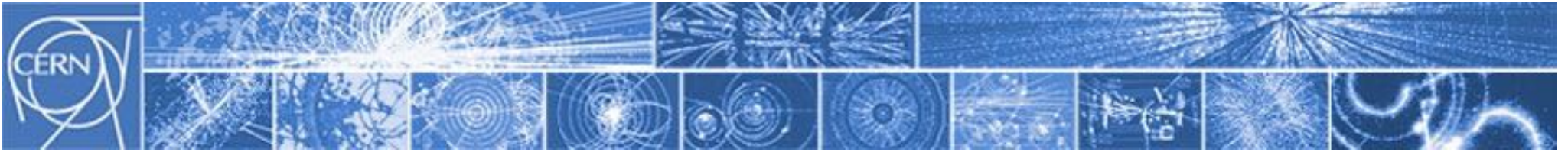
La *larghezza* della Z
permette di determinare
il numero di famiglie:

più canali aperti =
decadimento più veloce =
più larga



⇒ 3 famiglie!

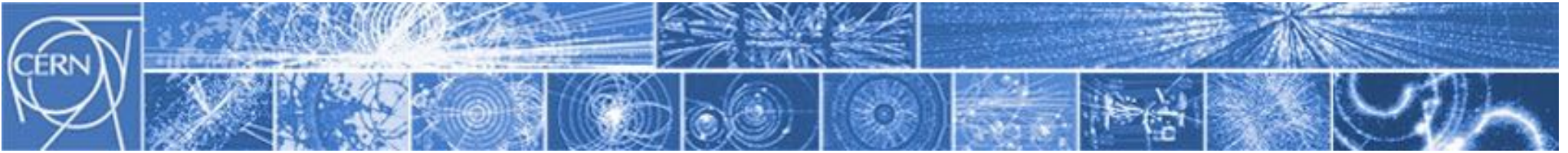
(a meno che il quarto neutrino
non abbia massa $> \sim 45$ GeV)



I diagrammi di Feynman al lavoro

Esempio 2: collisione $p\bar{p}$

(semirigoroso)

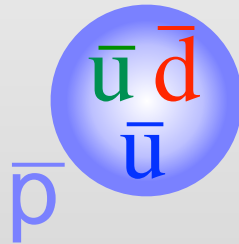
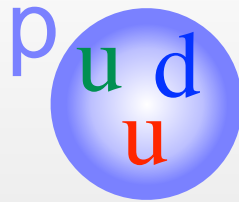


I diagrammi di Feynman al lavoro

Esempio 2: collisione $p\bar{p}$

(semirigoroso)

TeVatron
2 TeV

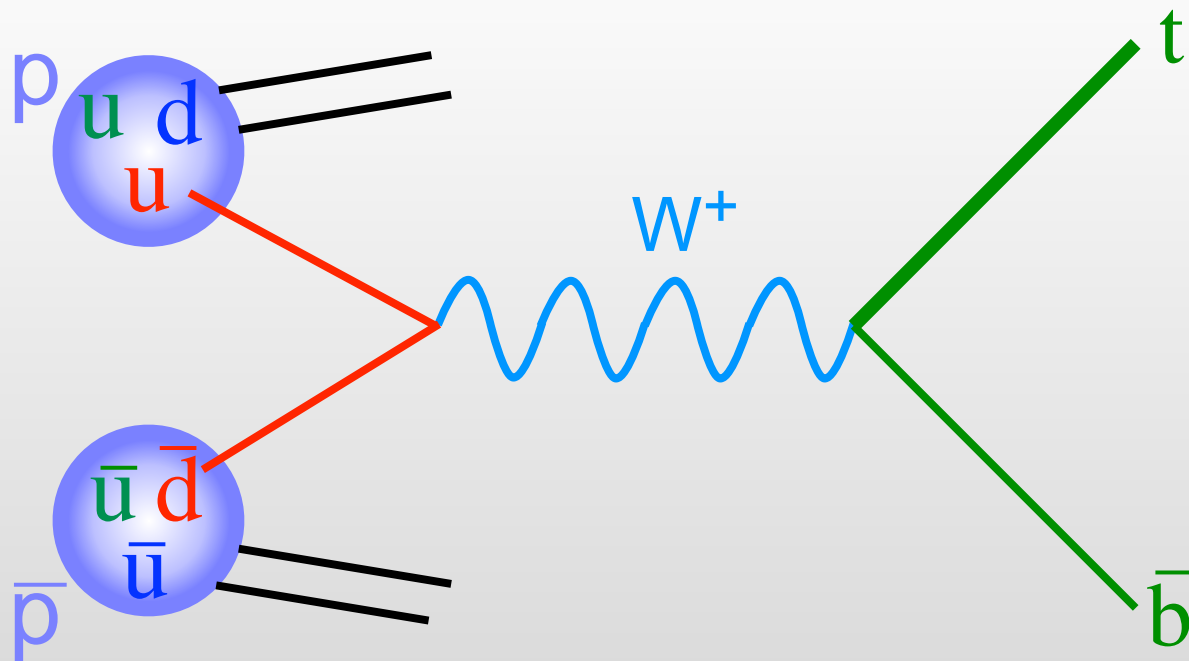




I diagrammi di Feynman al lavoro

Esempio 2: collisione $p\bar{p} \rightarrow$ produzione di quark top
(semirigoroso)

TeVatron
2 TeV



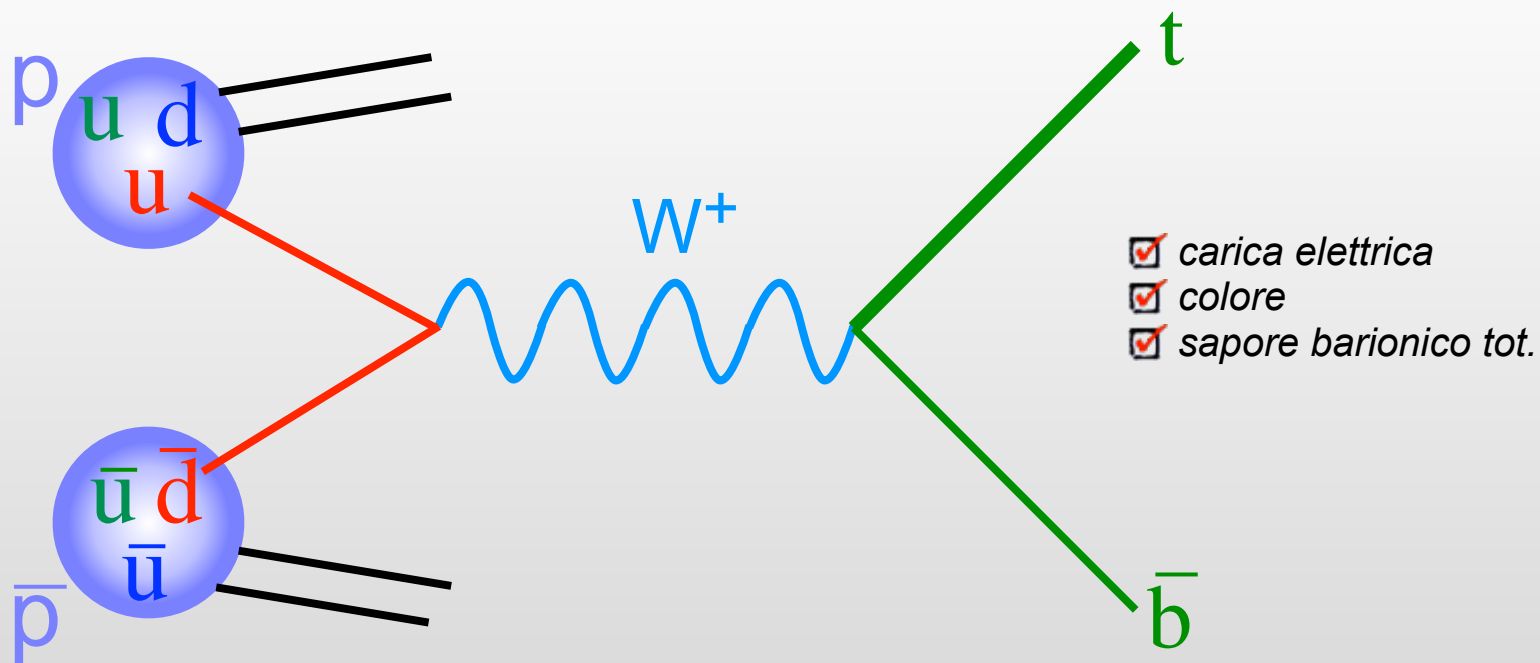
Nota: non è il canale più efficace per produrre un top quark al Tevatron, ma vabbè.



I diagrammi di Feynman al lavoro

Esempio 2: collisione $p\bar{p} \rightarrow$ produzione di quark top
(semirigoroso)

TeVatron
2 TeV



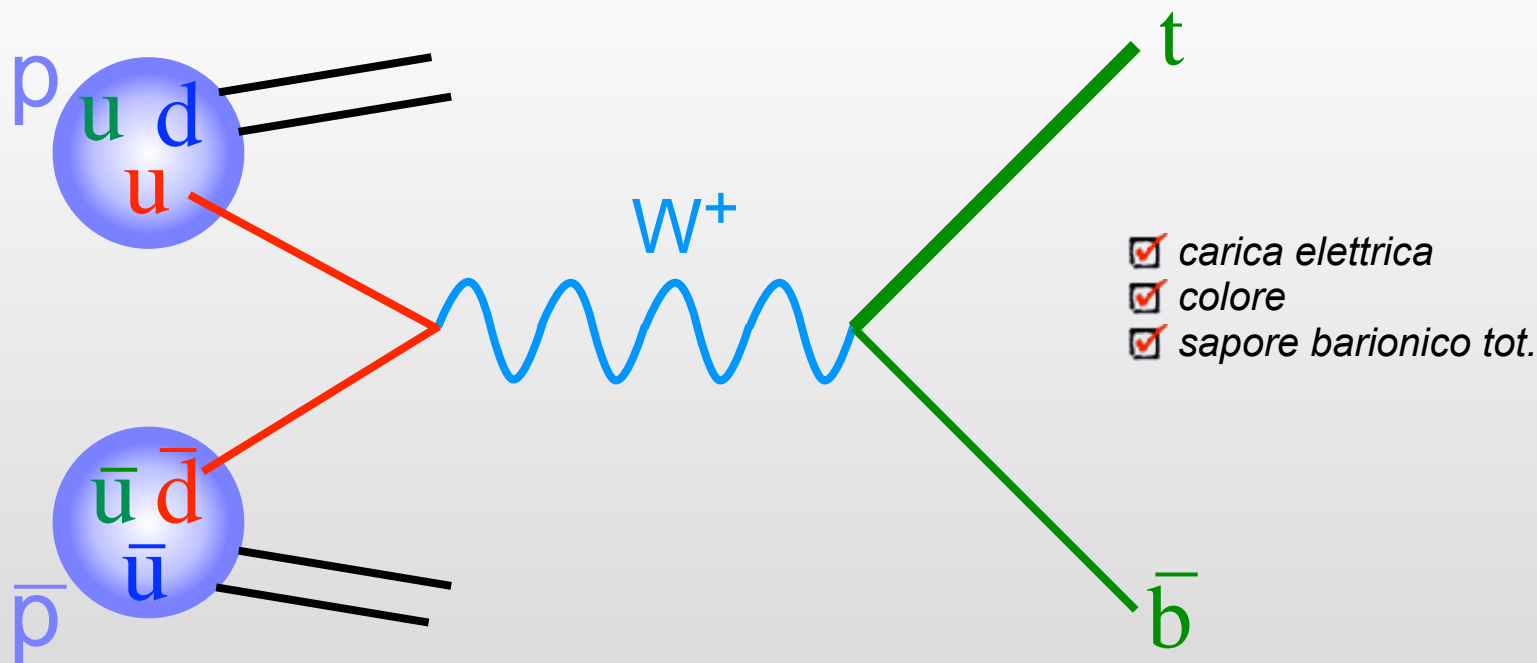
Nota: non è il canale più efficace per produrre un top quark al Tevatron, ma vabbè.



I diagrammi di Feynman al lavoro

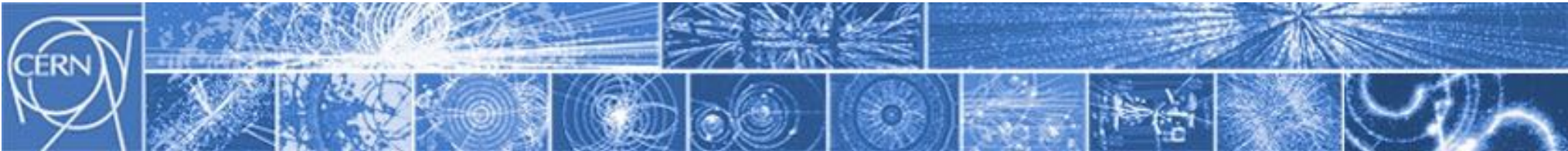
Esempio 2: collisione $p\bar{p} \rightarrow$ produzione di quark top
(semirigoroso)

TeVatron
2 TeV



Ogni q porta una frazione del momento del p : serve una grande energia.

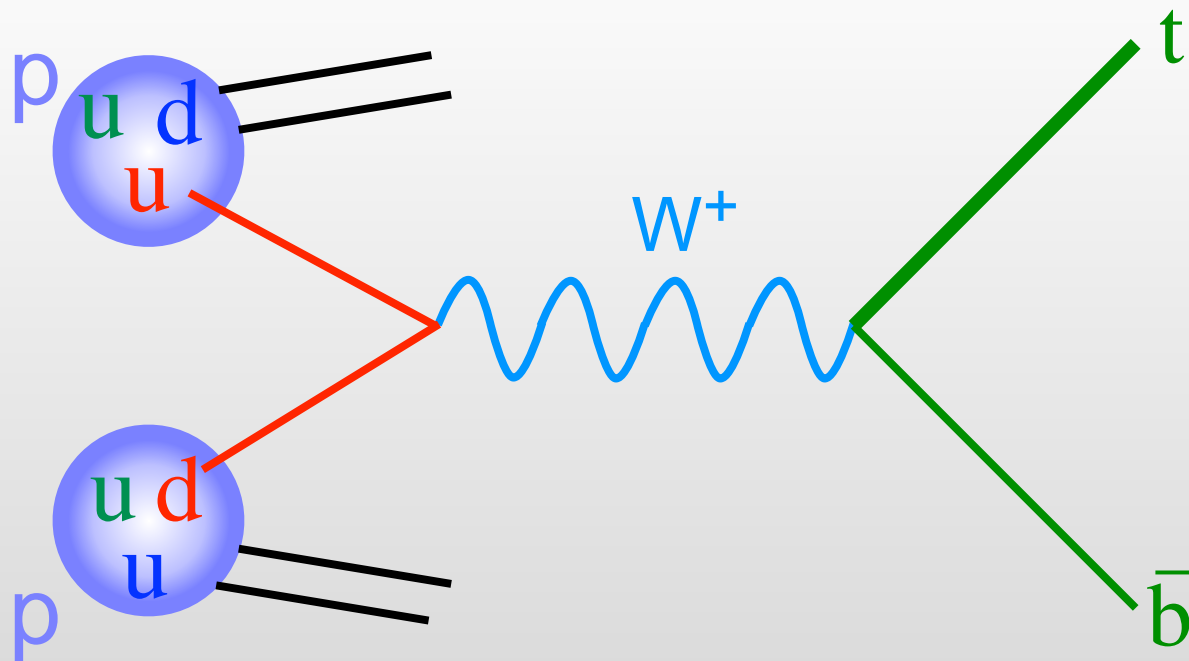
Magari scopriremo così una nuova particella pesante (un *nuovo 'quark'*?).



I diagrammi di Feynman al lavoro

Esempio 2b: collisione $pp \rightarrow$ produzione di quark top
(semirigoroso)

LHC
'14 TeV'



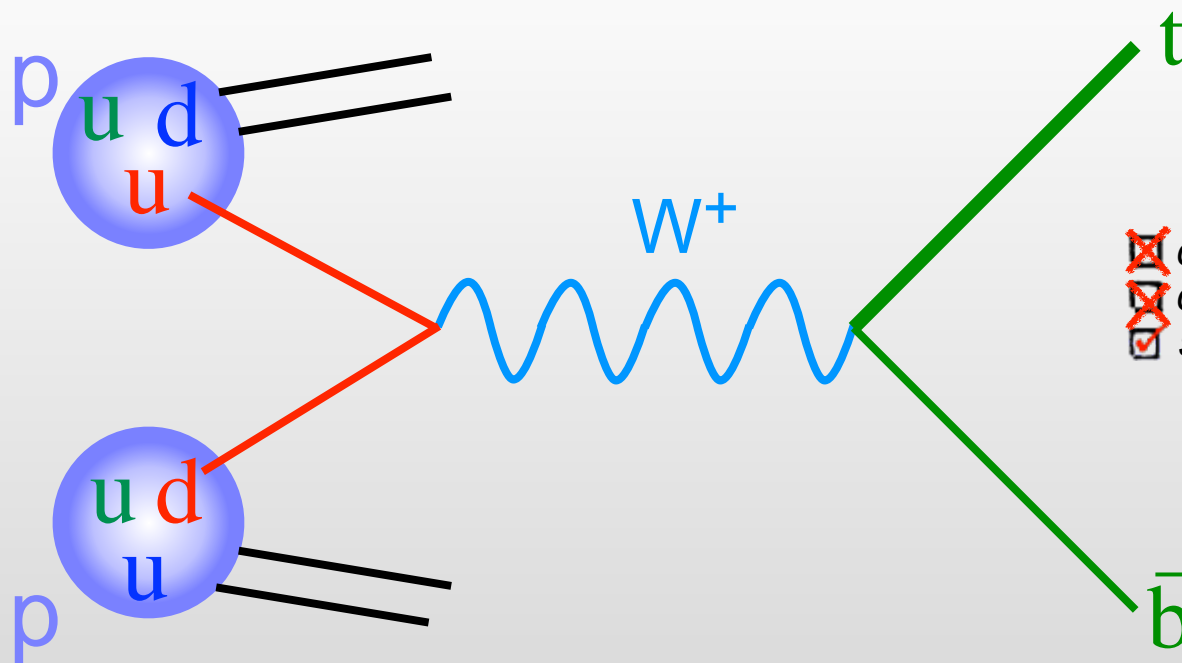


I diagrammi di Feynman al lavoro

Esempio 2b: collisione pp → produzione di quark top

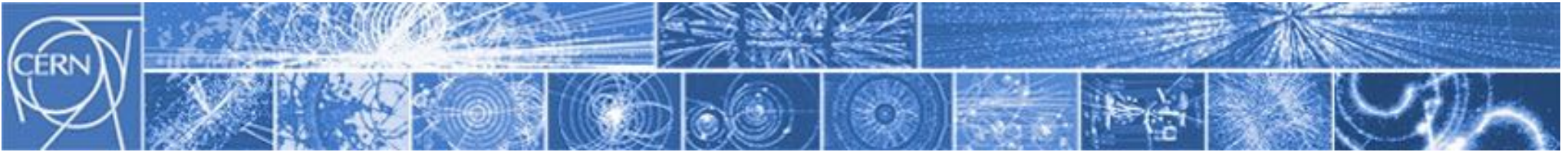
(semirigoroso)

LHC
'14 TeV'



- carica elettrica
- colore
- sapore barionico tot.

?!?

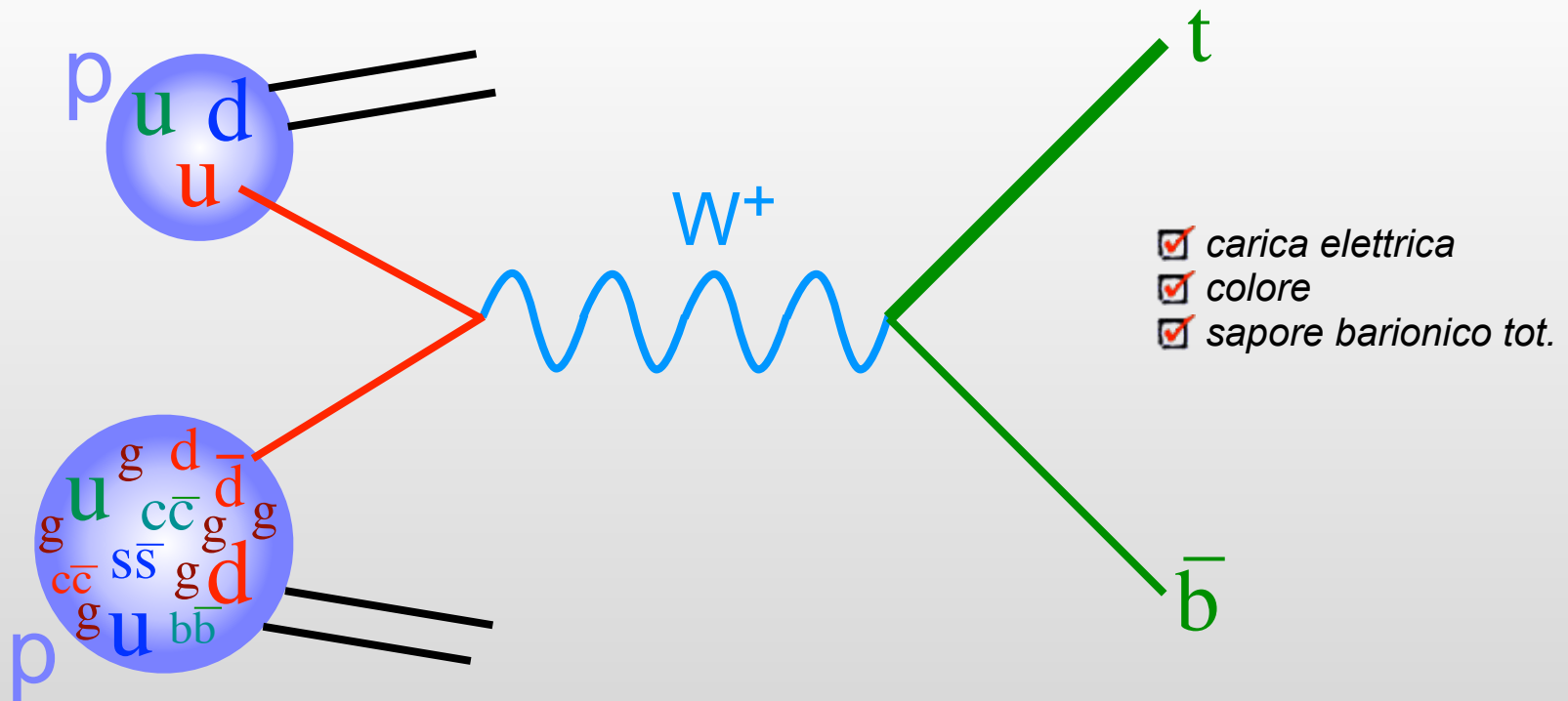


I diagrammi di Feynman al lavoro

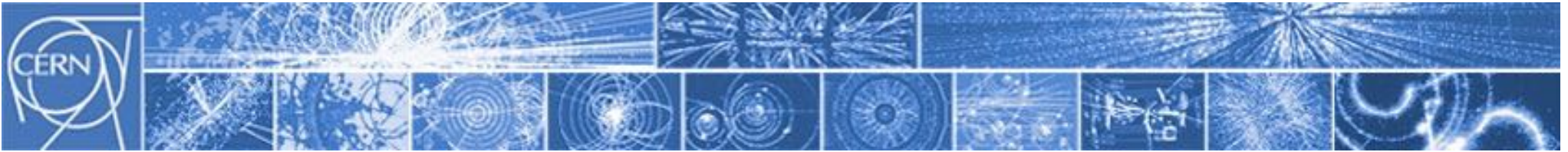
Esempio 2b: collisione pp → produzione di quark top

(semirigoroso)

LHC
'14 TeV'



Un protone 'contiene' *quarks*, *antiquarks* di tutti i sapori (del *mare*, vs *valenza*), e *gluoni*, secondo una certa *distribuzione di probabilità*, funzione dell'energia.

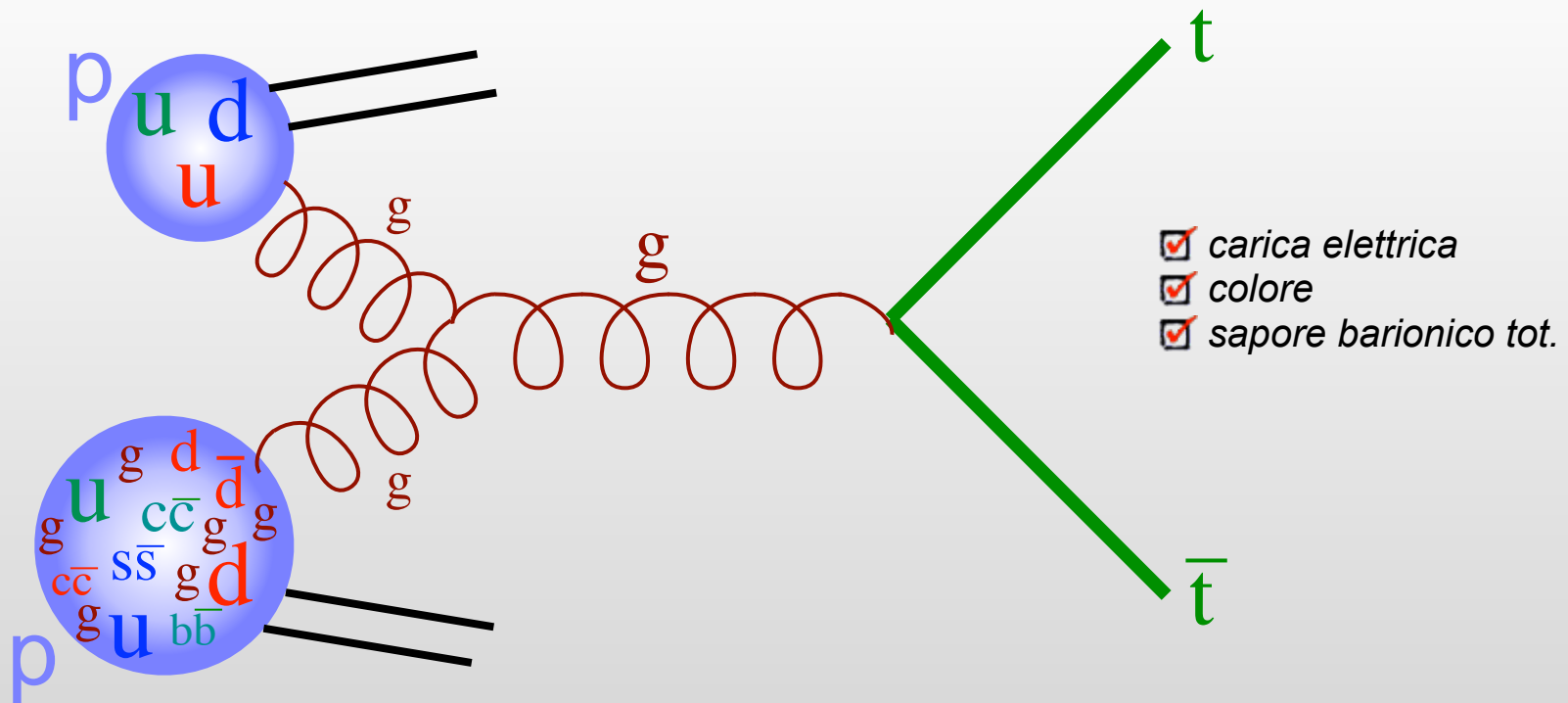


I diagrammi di Feynman al lavoro

Esempio 2b: collisione pp → produzione di quark top

(semirigoroso)

LHC
'14 TeV'



Un protone 'contiene' *quarks*, *antiquarks* di tutti i sapori (del *mare*, vs *valenza*), e *gluoni*, secondo una certa *distribuzione di probabilità*, funzione dell'energia.

By the way, ecco uno dei canali più efficaci per produrre un top quark a LHC.

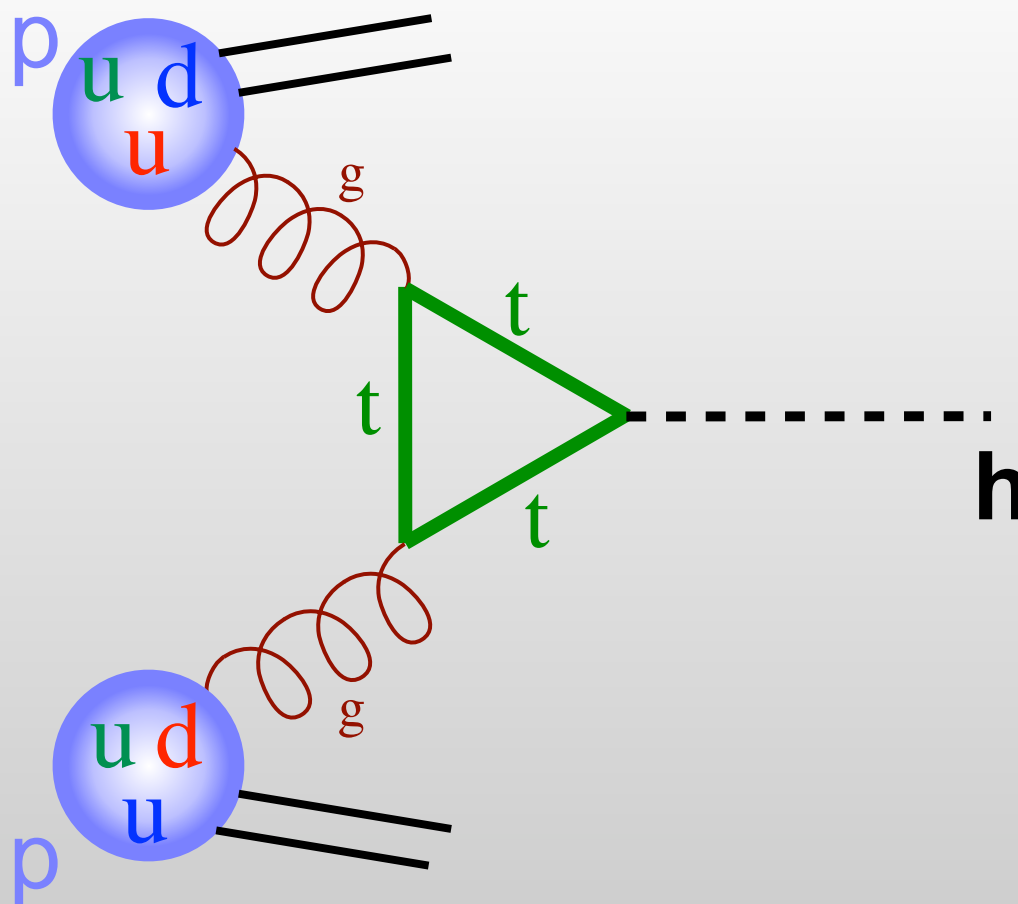


I diagrammi di Feynman al lavoro

Esempio 3: collisione $pp \rightarrow$ produzione di higgs

(semirigoroso)

LHC
'14 TeV'



- carica elettrica
- colore
- sapore barionico tot.

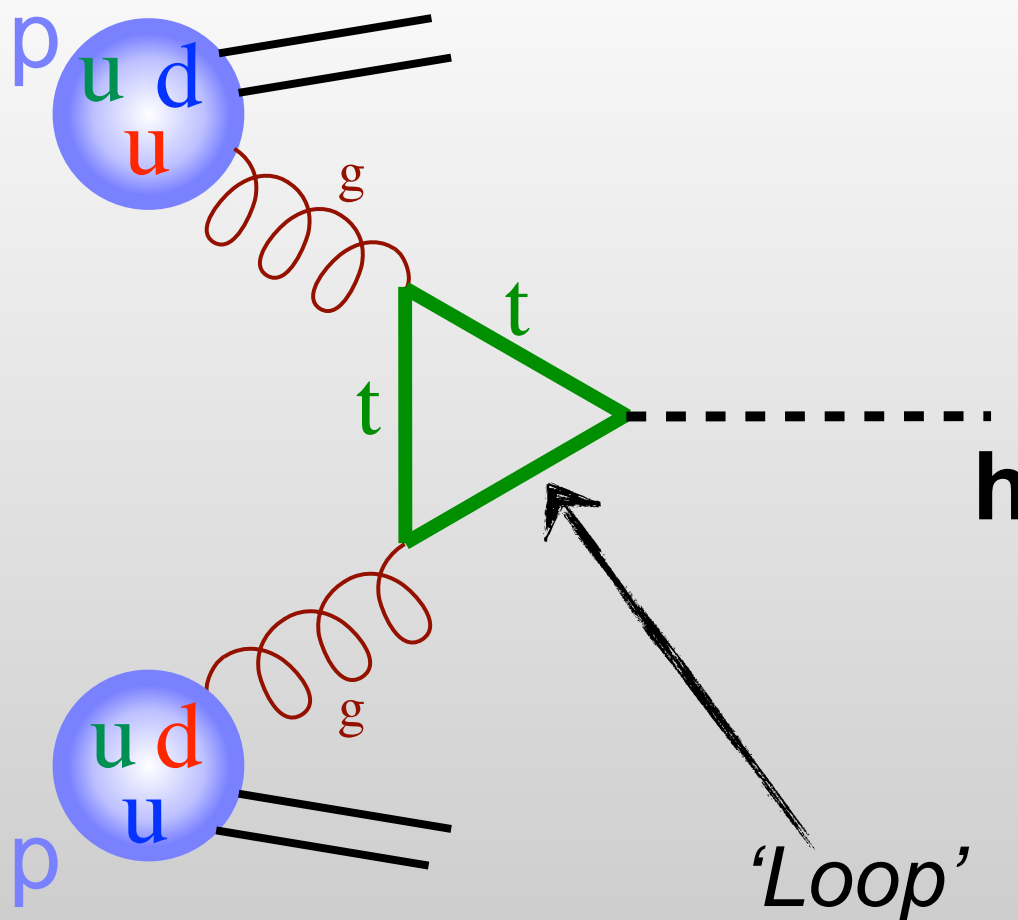


I diagrammi di Feynman al lavoro

Esempio 3: collisione $pp \rightarrow$ produzione di higgs

(semirigoroso)

LHC
'14 TeV'



- carica elettrica
- colore
- sapore barionico tot.

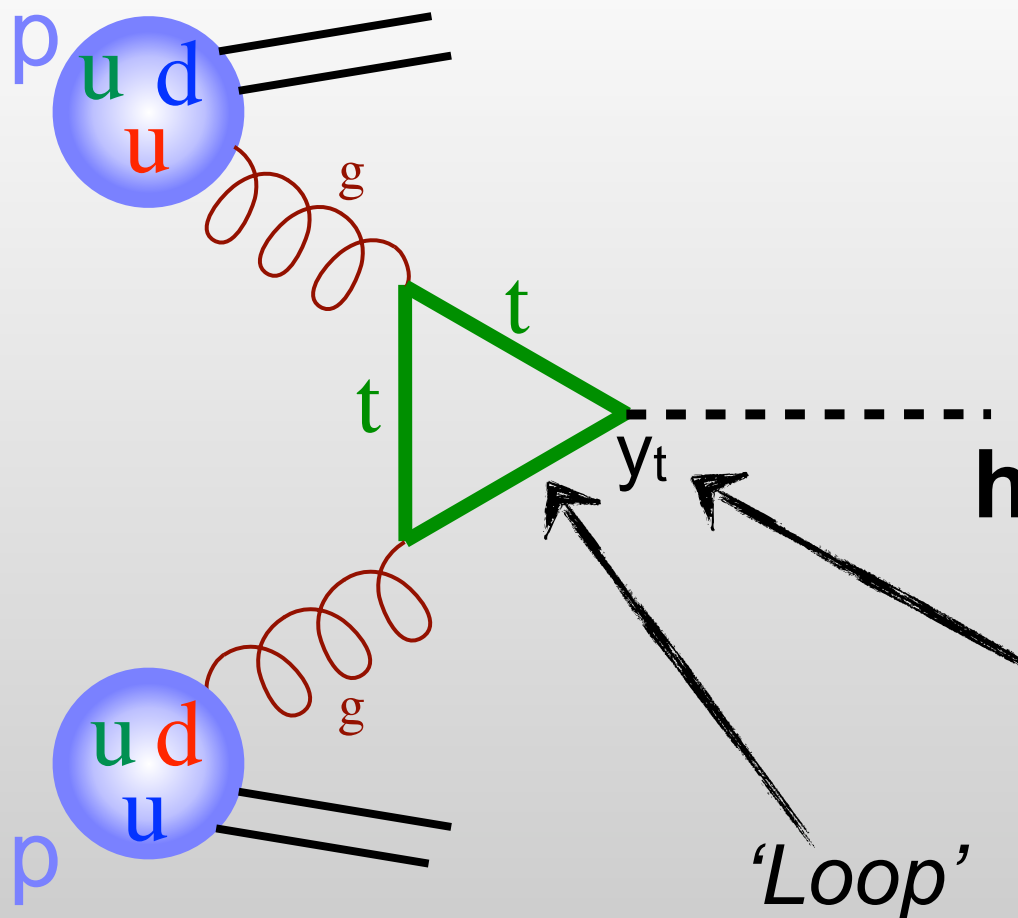


I diagrammi di Feynman al lavoro

Esempio 3: collisione $pp \rightarrow$ produzione di higgs

(semirigoroso)

LHC
'14 TeV'



- carica elettrica
- colore
- sapore barionico tot.



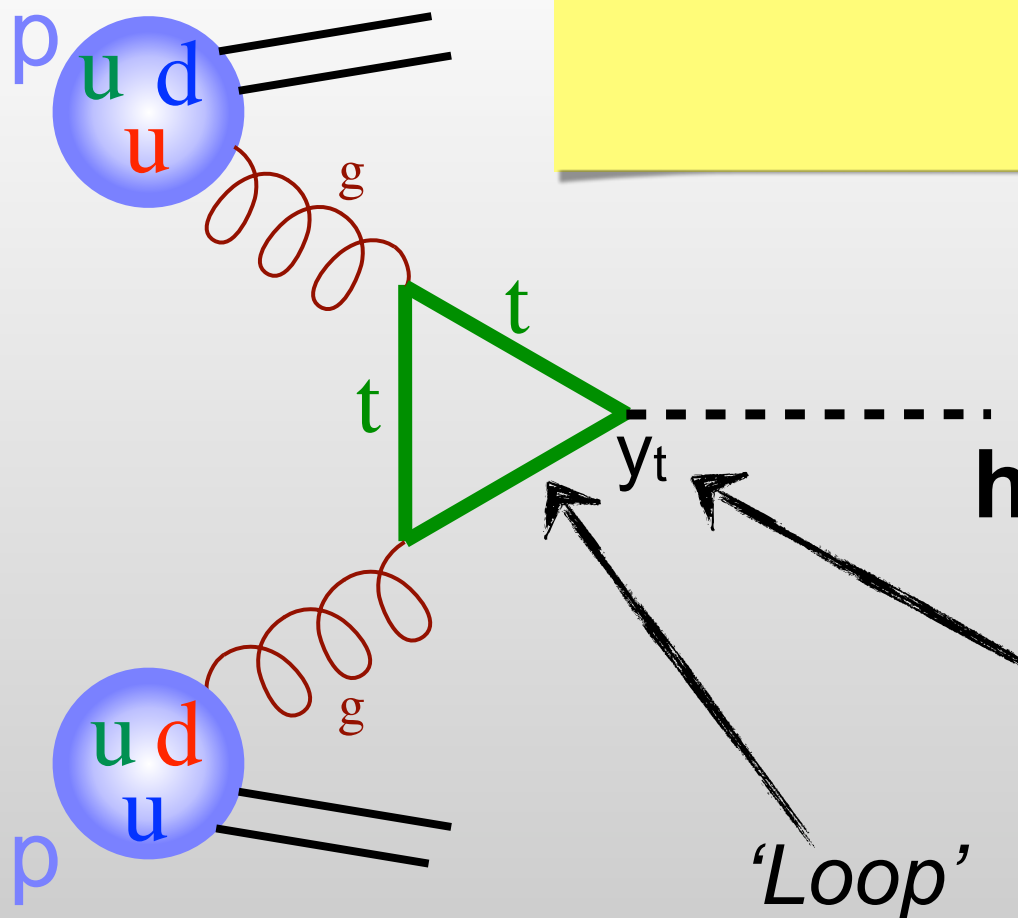
I diagrammi di Feynman al lavoro

Esempio 3: collisione $pp \rightarrow$ produzione di higgs

(semirigoroso)

Q: Ma quindi alla fin fine si può fare un po' tutto?

LHC
'14 TeV'



- carica elettrica
- colore
- sapore barionico tot.

'accoppiamento'

'Loop'



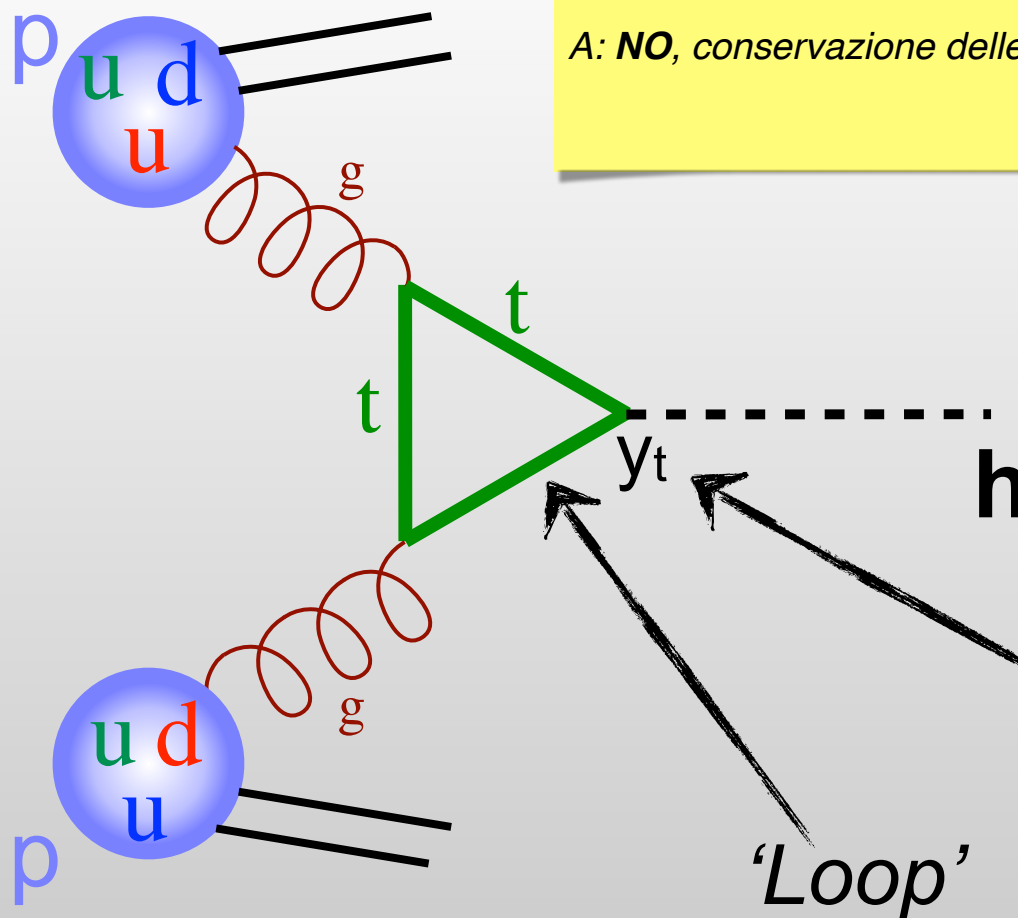
I diagrammi di Feynman al lavoro

Esempio 3: collisione $pp \rightarrow$ produzione di higgs

(semirigoroso)

Q: Ma quindi alla fin fine si può fare un po' tutto?
A: **NO**, conservazione delle cariche...

LHC
'14 TeV'



- carica elettrica
- colore
- sapore barionico tot.

'accoppiamento'

'Loop'



I diagrammi di Feynman al lavoro

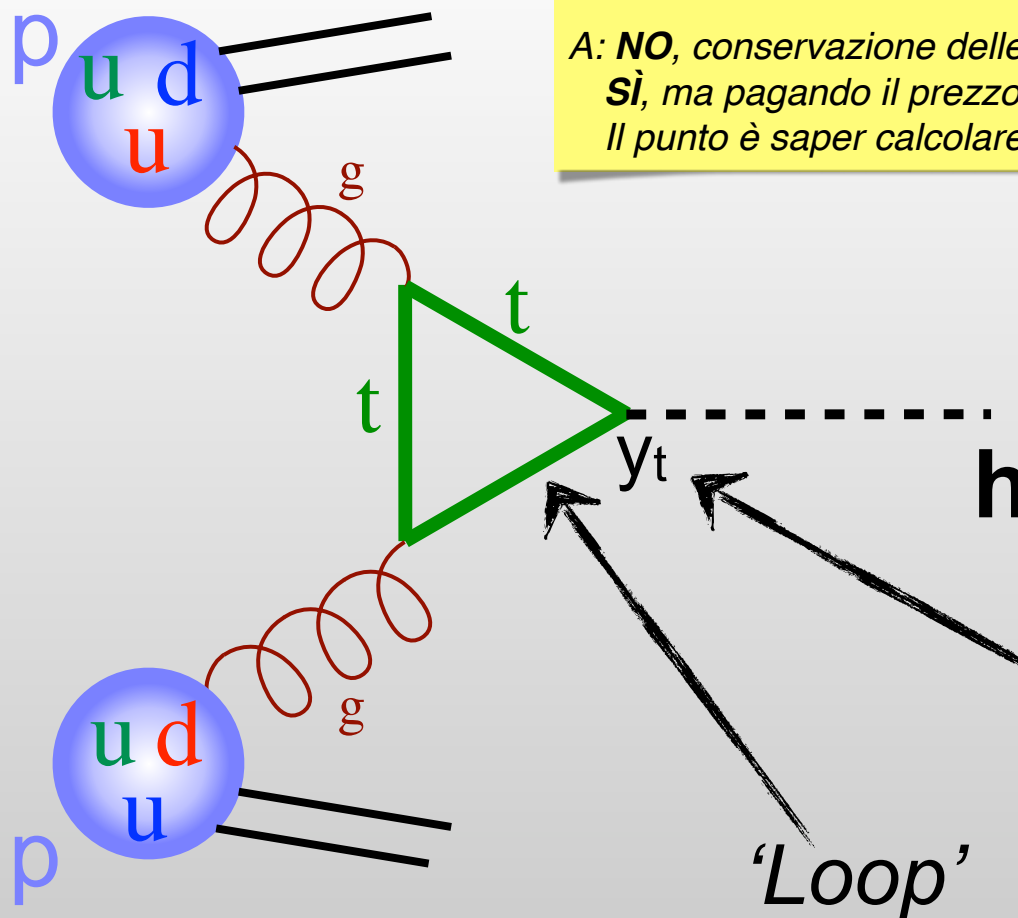
Esempio 3: collisione $pp \rightarrow$ produzione di higgs

(semirigoroso)

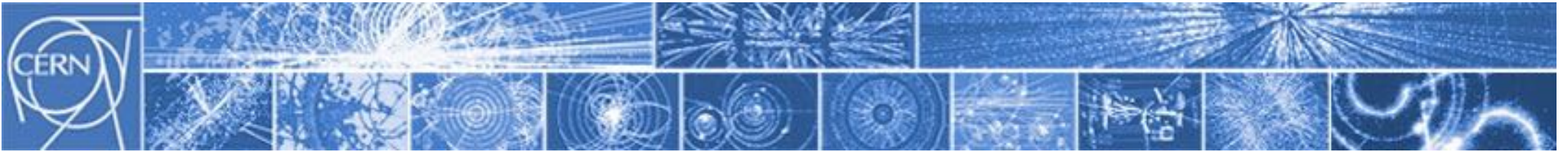
Q: Ma quindi alla fin fine si può fare un po' tutto?

A: **NO**, conservazione delle cariche...
Sì, ma pagando il prezzo della rarità (processo 'soppresso'...)
 Il punto è saper calcolare i vari processi.

LHC
'14 TeV'



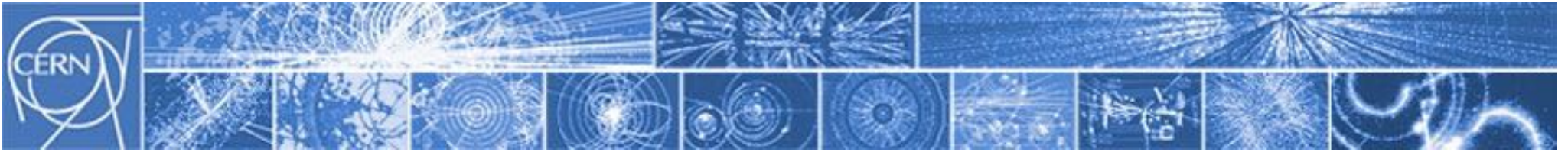
- carica elettrica
- colore
- sapore barionico tot.



I diagrammi di Feynman al lavoro

Esempio 4: decadimento del muone

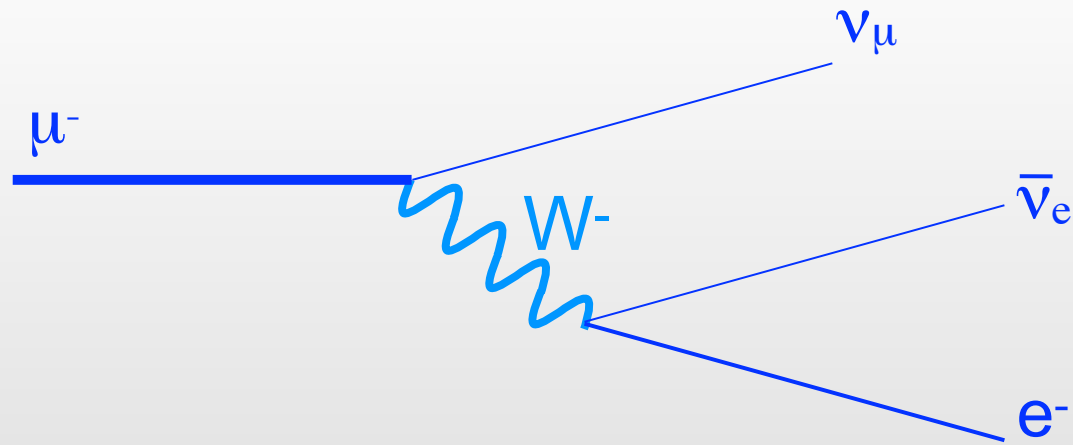
(piuttosto rigoroso: ma per i dettagli ci vorrebbe un intero corso di QFT!)



I diagrammi di Feynman al lavoro

Esempio 4: decadimento del muone

(piuttosto rigoroso: ma per i dettagli ci vorrebbe un intero corso di QFT!)

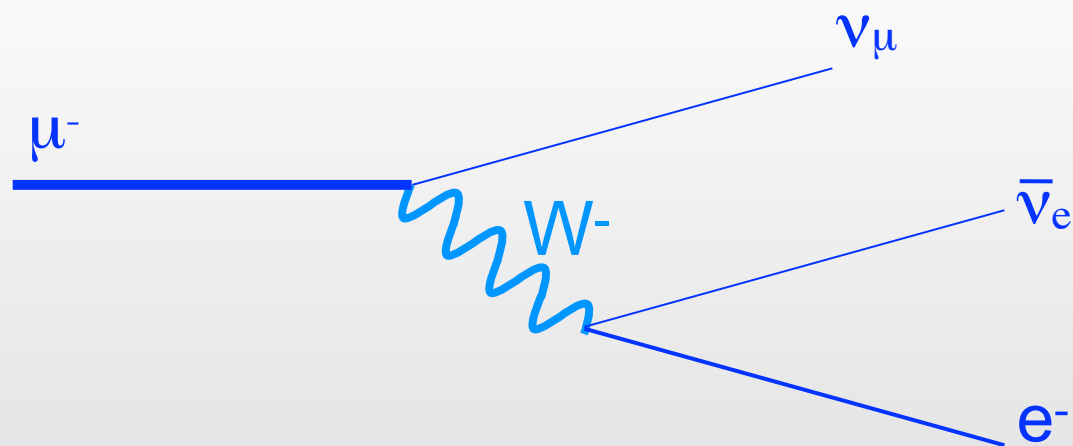




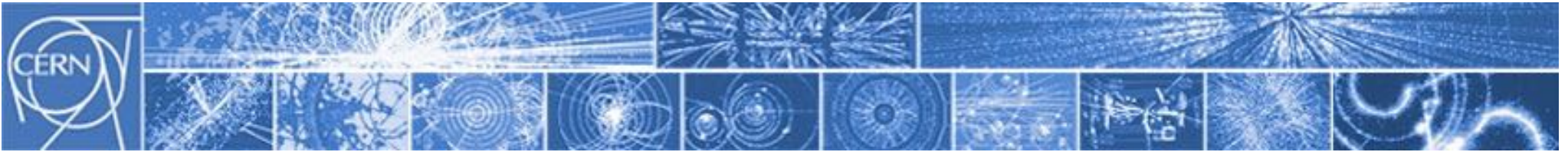
I diagrammi di Feynman al lavoro

Esempio 4: decadimento del muone

(piuttosto rigoroso: ma per i dettagli ci vorrebbe un intero corso di QFT!)



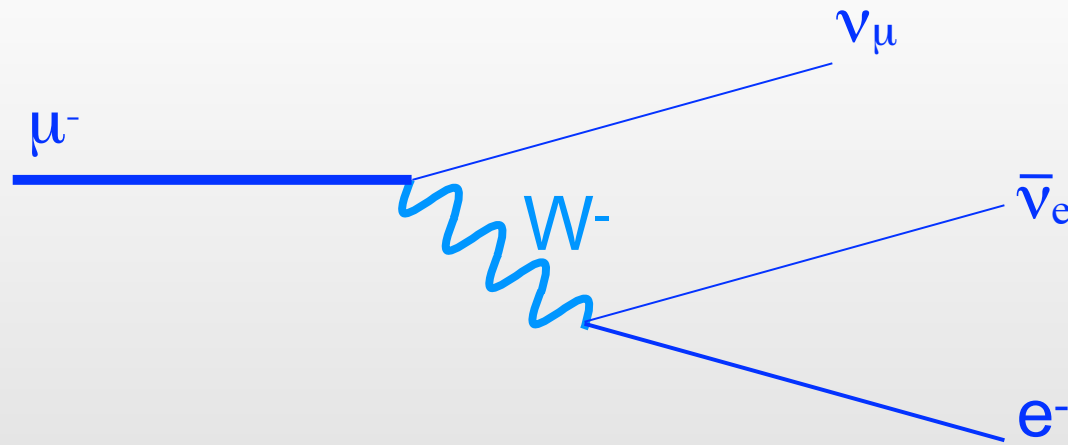
$$\mathcal{L} \simeq -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu} + i\bar{\Psi}\not{D}\Psi + y_{ij}\Psi_i\Psi_j\phi + |D_\mu\phi|^2 - V(\phi)$$



I diagrammi di Feynman al lavoro

Esempio 4: decadimento del muone

(piuttosto rigoroso: ma per i dettagli ci vorrebbe un intero corso di QFT!)



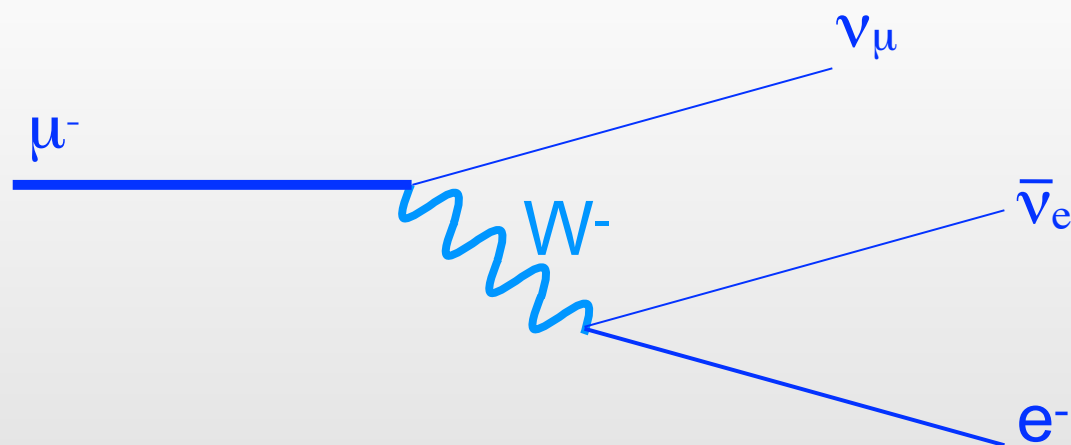
$$\mathcal{L} \simeq -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} + i\bar{\Psi} \not{D} \Psi + y_{ij} \Psi_i \Psi_j \phi + |D_\mu \phi|^2 - V(\phi)$$



I diagrammi di Feynman al lavoro

Esempio 4: decadimento del muone

(piuttosto rigoroso: ma per i dettagli ci vorrebbe un intero corso di QFT!)



$$\mathcal{L} \simeq -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu}$$

$$+i\bar{\Psi} \not{D} \Psi$$

$$+y_{ij} \Psi_i \Psi_j \phi$$

$$+|D_\mu \phi|^2 - V(\phi)$$

$$\Psi = \begin{pmatrix} \mu \\ \nu_\mu \end{pmatrix}_L = \begin{pmatrix} \mu \\ \nu_\mu \end{pmatrix} \frac{1 - \gamma_5}{2}$$

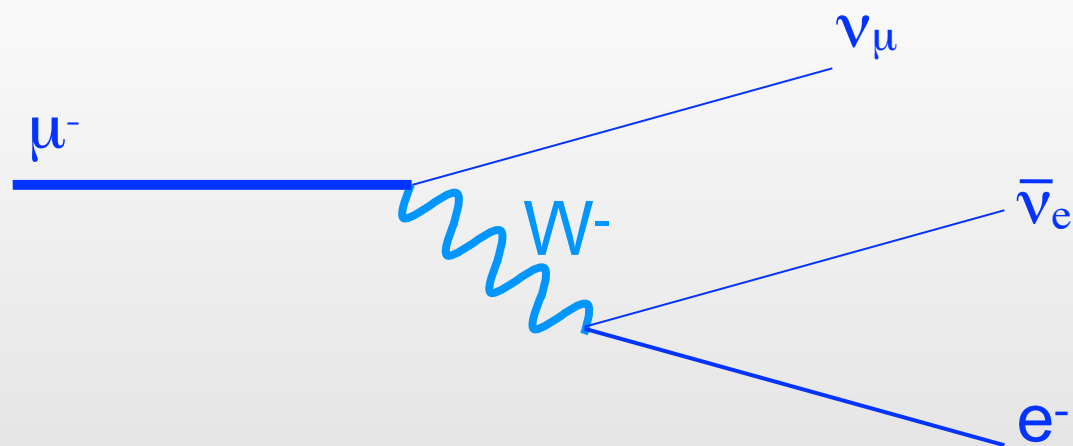
$$\not{D} = \gamma D \supset \gamma \left(-i \frac{g}{\sqrt{2}} W^- \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \right)$$



I diagrammi di Feynman al lavoro

Esempio 4: decadimento del muone

(piuttosto rigoroso: ma per i dettagli ci vorrebbe un intero corso di QFT!)



$$\mathcal{L} \simeq -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu}$$

$$+i\bar{\Psi} \not{D} \Psi$$

$$+y_{ij} \Psi_i \Psi_j \phi$$

$$+|D_\mu \phi|^2 - V(\phi)$$

$$\Psi = \begin{pmatrix} \mu \\ \nu_\mu \end{pmatrix}_L = \begin{pmatrix} \mu \\ \nu_\mu \end{pmatrix} \frac{1 - \gamma_5}{2}$$

$$\not{D} = \gamma D \supset \gamma \left(-i \frac{g}{\sqrt{2}} W^- \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \right)$$

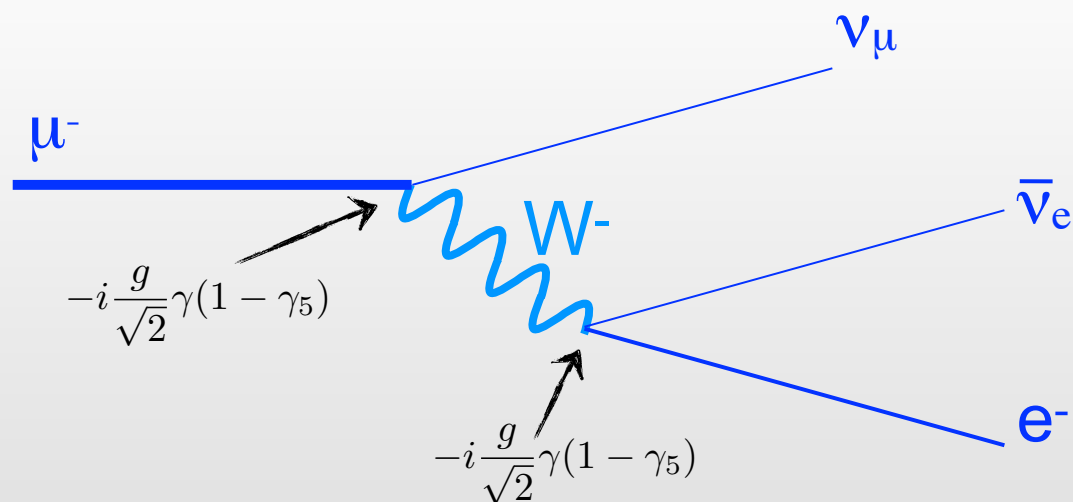
$$\simeq \nu_\mu \left(-i \frac{g}{\sqrt{2}} \right) \gamma (1 - \gamma_5) W^- \mu$$



I diagrammi di Feynman al lavoro

Esempio 4: decadimento del muone

(piuttosto rigoroso: ma per i dettagli ci vorrebbe un intero corso di QFT!)



$$\mathcal{L} \simeq -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu}$$

$$+i\bar{\Psi} \not{D} \Psi$$

$$+y_{ij} \Psi_i \Psi_j \phi$$

$$+|D_\mu \phi|^2 - V(\phi)$$

$$\Psi = \begin{pmatrix} \mu \\ \nu_\mu \end{pmatrix}_L = \begin{pmatrix} \mu \\ \nu_\mu \end{pmatrix} \frac{1 - \gamma_5}{2}$$

$$\not{D} = \gamma D \supset \gamma \left(-i \frac{g}{\sqrt{2}} W^- \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \right)$$

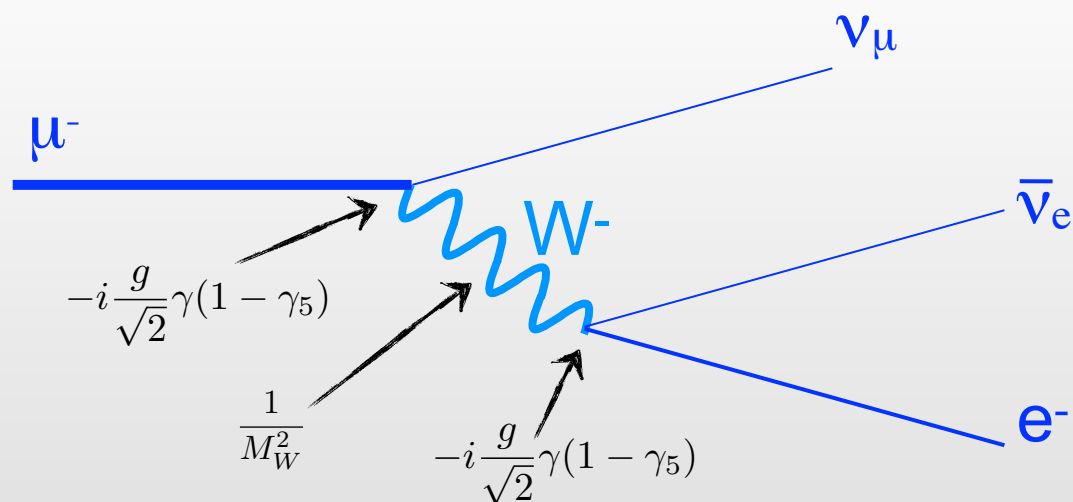
$$\simeq \nu_\mu \left(-i \frac{g}{\sqrt{2}} \right) \gamma(1 - \gamma_5) W^- \mu$$



I diagrammi di Feynman al lavoro

Esempio 4: decadimento del muone

(piuttosto rigoroso: ma per i dettagli ci vorrebbe un intero corso di QFT!)



$$\mathcal{L} \simeq -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu}$$

$$+i\bar{\Psi} \not{D} \Psi$$

$$+y_{ij} \Psi_i \Psi_j \phi$$

$$+|D_\mu \phi|^2 - V(\phi)$$

$$\Psi = \begin{pmatrix} \mu \\ \nu_\mu \end{pmatrix}_L = \begin{pmatrix} \mu \\ \nu_\mu \end{pmatrix} \frac{1-\gamma_5}{2}$$

$$\not{D} = \gamma D \supset \gamma \left(-i\frac{g}{\sqrt{2}} W^- \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \right)$$

$$\text{[light blue box]} \simeq \nu_\mu \left(-i\frac{g}{\sqrt{2}} \right) \gamma(1-\gamma_5) W^- \mu$$

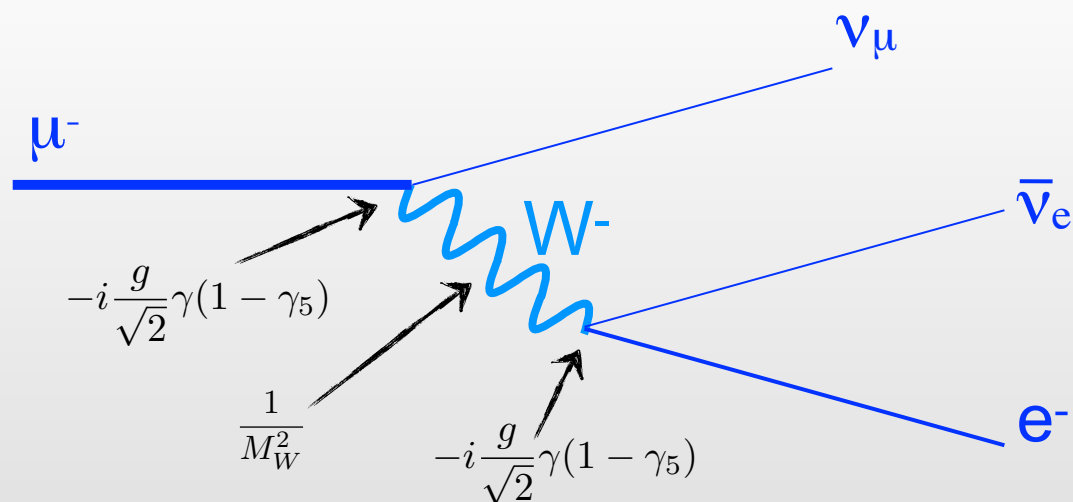
$$\text{[wavy line]} \propto \frac{1}{M_W^2 - p^2} \rightarrow \frac{1}{M_W^2}$$



I diagrammi di Feynman al lavoro

Esempio 4: decadimento del muone

(piuttosto rigoroso: ma per i dettagli ci vorrebbe un intero corso di QFT!)



$$\mathcal{L} \simeq -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} + i\bar{\Psi} \not{D} \Psi + y_{ij} \Psi_i \Psi_j \phi + |D_\mu \phi|^2 - V(\phi)$$

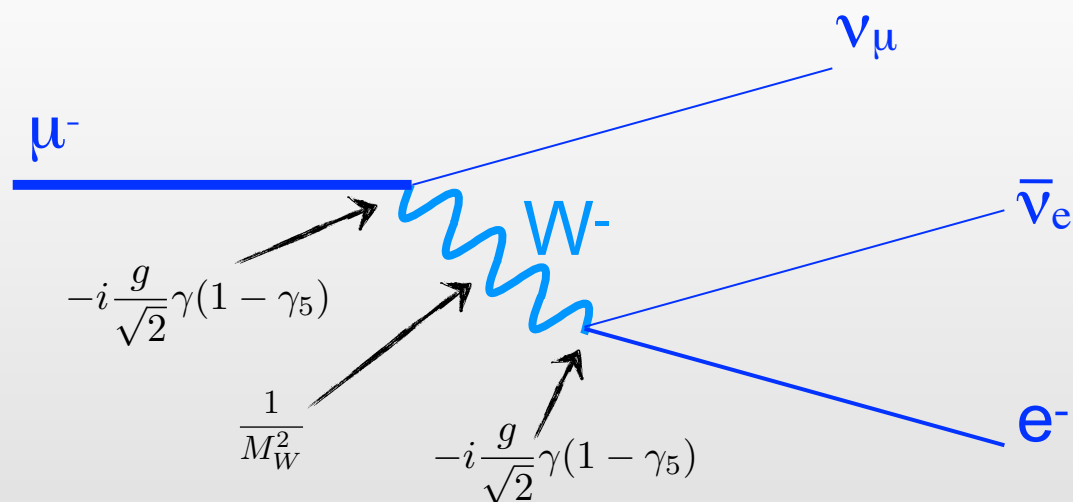
ampiezza: $|\mathcal{M}| \propto \frac{g^2}{2} [\nu_\mu \gamma(1 - \gamma_5) \mu] \frac{1}{M_W^2} [e \gamma(1 - \gamma_5) \nu_e]$



I diagrammi di Feynman al lavoro

Esempio 4: decadimento del muone

(piuttosto rigoroso: ma per i dettagli ci vorrebbe un intero corso di QFT!)



$$\mathcal{L} \simeq -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} + i \bar{\Psi} \not{D} \Psi + y_{ij} \Psi_i \Psi_j \phi + |D_\mu \phi|^2 - V(\phi)$$

ampiezza: $|\mathcal{M}| \propto \frac{g^2}{2} [\nu_\mu \gamma(1 - \gamma_5) \mu] \frac{1}{M_W^2} [e \gamma(1 - \gamma_5) \nu_e]$

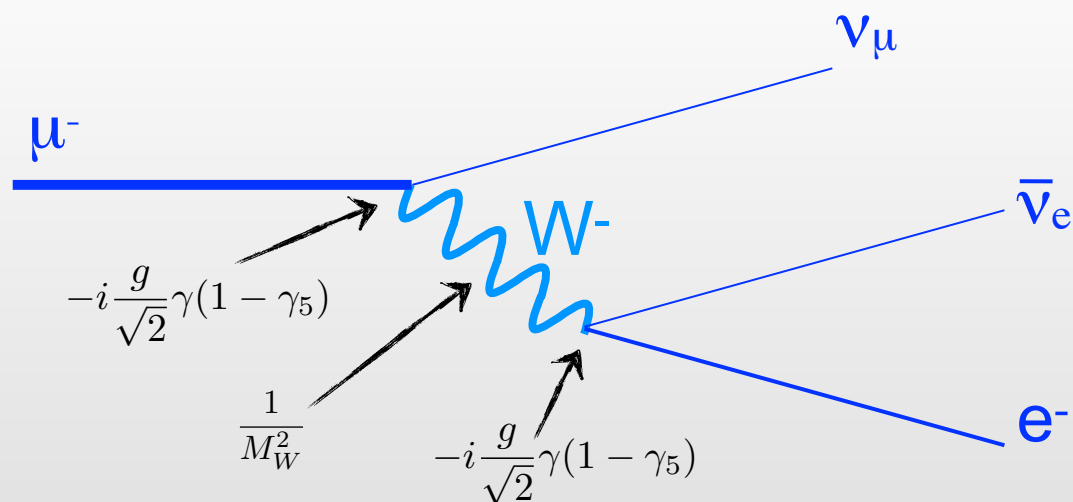
tasso di decadimento: $\Gamma \propto |\mathcal{M}|^2$



I diagrammi di Feynman al lavoro

Esempio 4: decadimento del muone

(piuttosto rigoroso: ma per i dettagli ci vorrebbe un intero corso di QFT!)



$$\mathcal{L} \simeq -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} + i \bar{\Psi} \not{D} \Psi + y_{ij} \Psi_i \Psi_j \phi + |D_\mu \phi|^2 - V(\phi)$$

ampiezza: $|\mathcal{M}| \propto \frac{g^2}{2} [\nu_\mu \gamma(1 - \gamma_5) \mu] \frac{1}{M_W^2} [e \gamma(1 - \gamma_5) \nu_e]$

“...dopo una serie di facili passaggi, si può facilmente dimostrare che...”

$$G_F = \frac{\sqrt{2} g^2}{8 M_W^2}$$

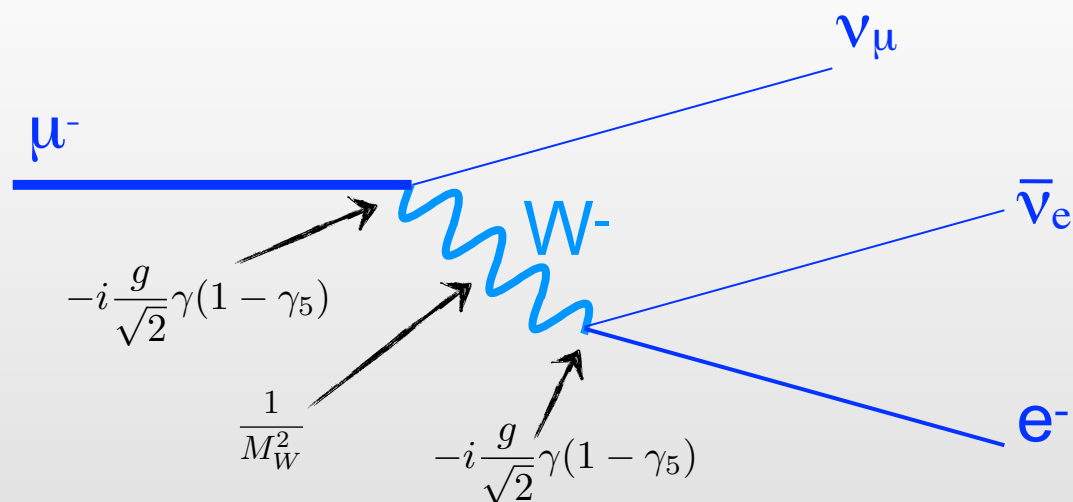
tasso di decadimento: $\Gamma = \frac{1}{192 \pi^3} G_F^2 m_\mu^5$



I diagrammi di Feynman al lavoro

Esempio 4: decadimento del muone

(piuttosto rigoroso: ma per i dettagli ci vorrebbe un intero corso di QFT!)



$$\mathcal{L} \simeq -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} + i \bar{\Psi} \not{D} \Psi + y_{ij} \Psi_i \Psi_j \phi + |D_\mu \phi|^2 - V(\phi)$$

ampiezza: $|\mathcal{M}| \propto \frac{g^2}{2} [\nu_\mu \gamma(1 - \gamma_5) \mu] \frac{1}{M_W^2} [e \gamma(1 - \gamma_5) \nu_e]$

“...dopo una serie di facili passaggi, si può facilmente dimostrare che...”

$$G_F = \frac{\sqrt{2} g^2}{8 M_W^2}$$

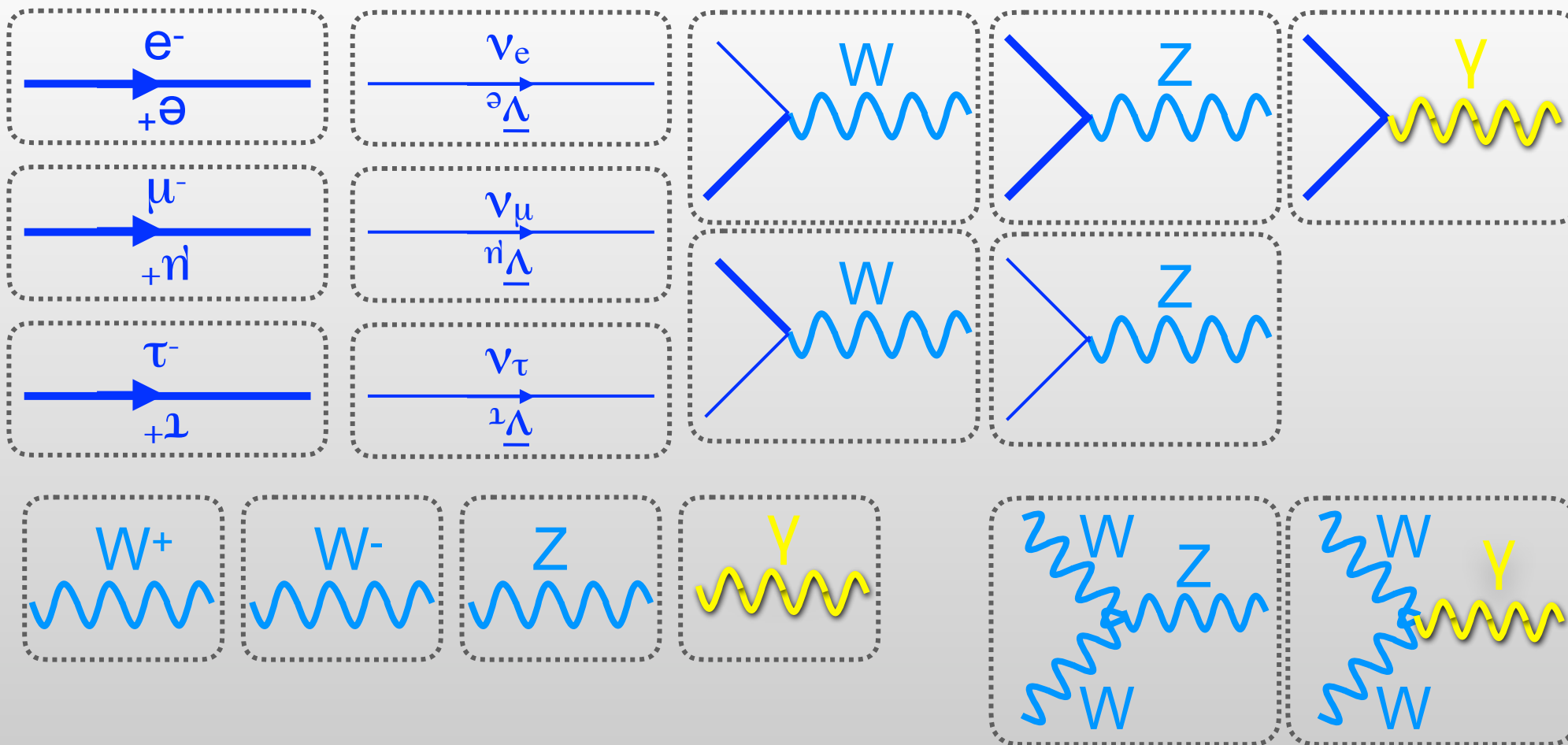
tasso di decadimento: $\Gamma = \frac{1}{192 \pi^3} G_F^2 m_\mu^5$

vita media: $\tau = 1/\Gamma = (2.19703 \pm 0.0004) \times 10^{-6}$ secondi



I diagrammi di Feynman al lavoro: gioco del domino *(un'idea di presentazione/masterclass?)*

EW Feynman rules



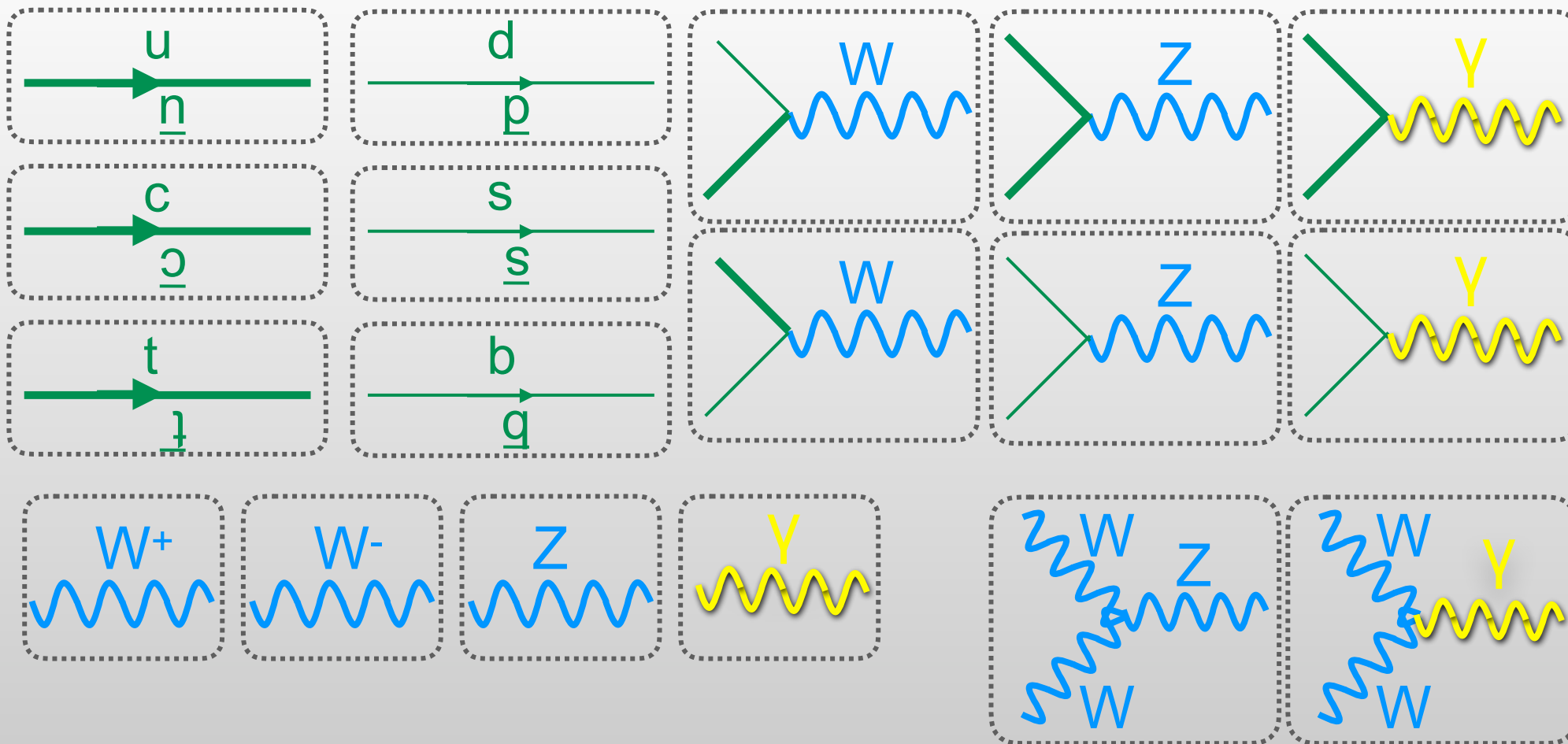
idea ripresa in:

J. Woithe, J. Wiener, F. Van der Veken, *Let's have a coffee with the Standard Model of particle physics!*, Phys. Educ. 52 (2017) 034001



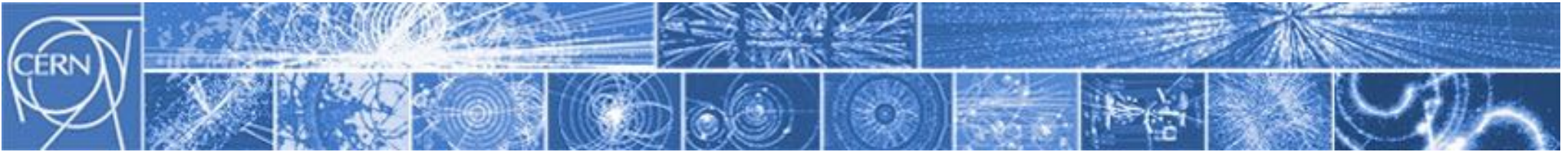
I diagrammi di Feynman al lavoro: gioco del domino *(un'idea di presentazione/masterclass?)*

EW Feynman rules



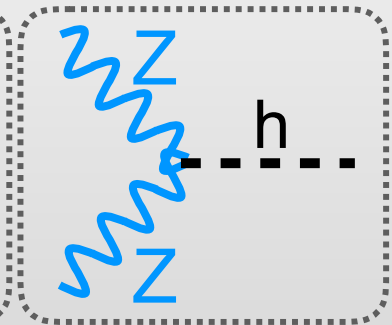
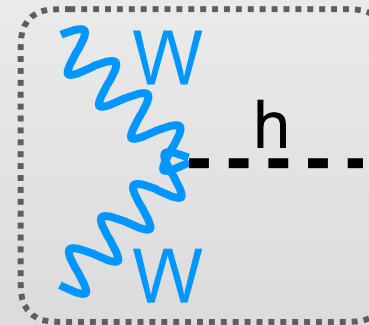
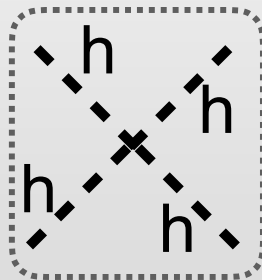
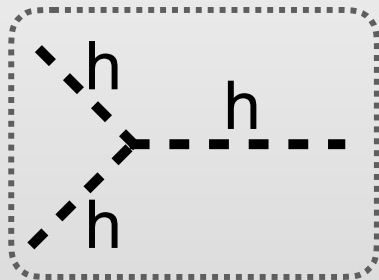
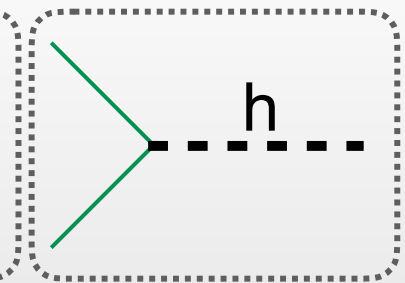
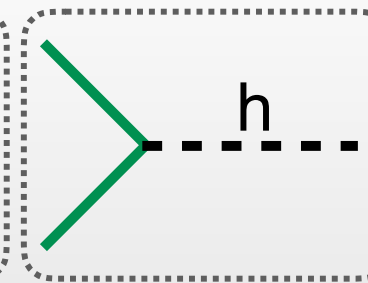
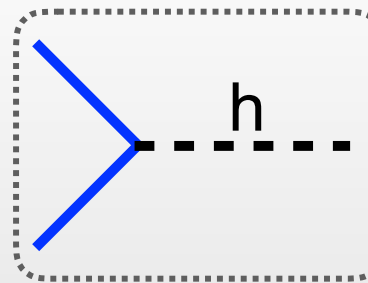
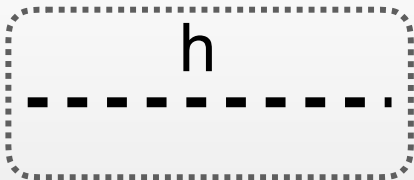
idea ripresa in:

J. Woithe, J. Wiener, F. Van der Veken, *Let's have a coffee with the Standard Model of particle physics!*, Phys. Educ. 52 (2017) 034001



I diagrammi di Feynman al lavoro: *gioco del domino* (un'idea di presentazione/masterclass?)

Feynman rules higgs sector



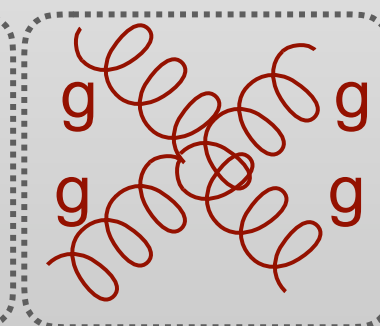
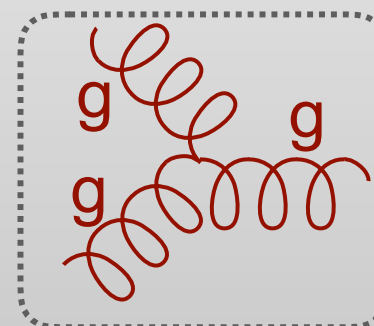
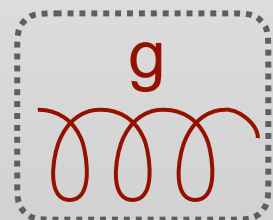
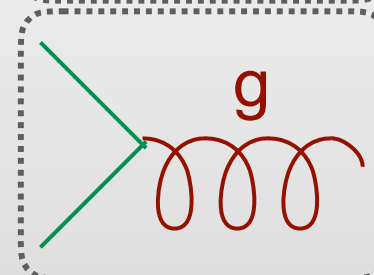
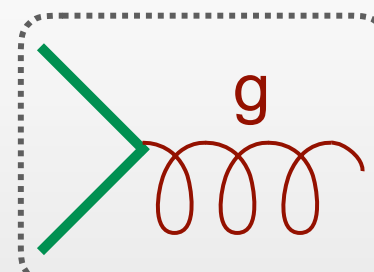
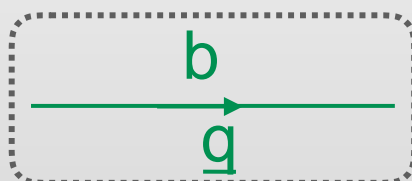
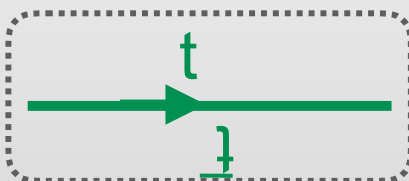
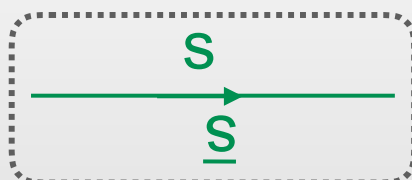
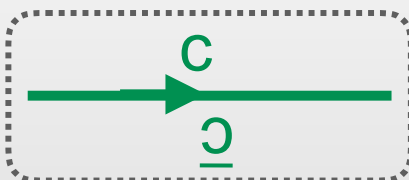
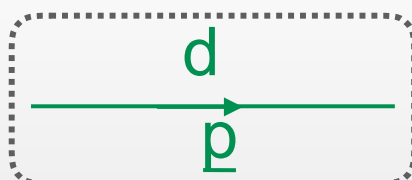
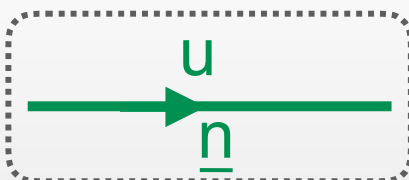
idea ripresa in:

J. Woithe, J. Wiener, F. Van der Veken, *Let's have a coffee with the Standard Model of particle physics!*, Phys. Educ. 52 (2017) 034001



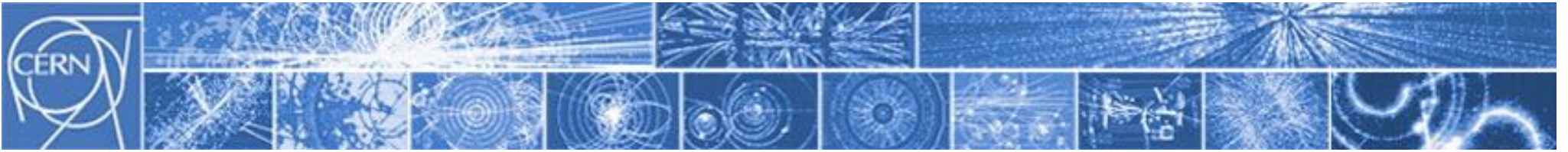
I diagrammi di Feynman al lavoro: *gioco del domino* (un'idea di presentazione/masterclass?)

QCD Feynman rules



idea ripresa in:

J. Woithe, J. Wiener, F. Van der Veken, *Let's have a coffee with the Standard Model of particle physics!*, Phys. Educ. 52 (2017) 034001



I diagrammi di Feynman al lavoro: *gioco del domino* (un'idea di presentazione/masterclass?)

Processi da riprodurre:

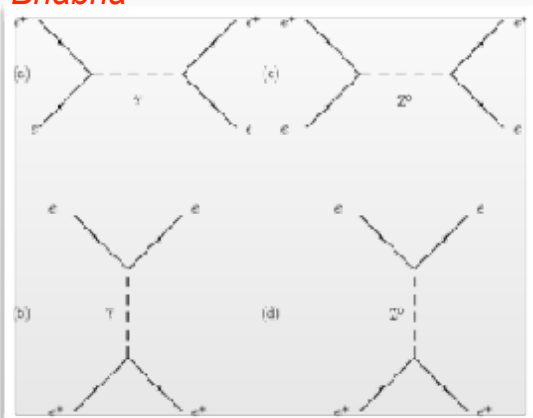
- Bhabha scattering: $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$ [hint: 4 diagrammi possibili (tree-level)]
- Decadimento beta: $(A,Z) \rightarrow (A,Z+1) e^- \bar{\nu}$
- Decadimento beta⁺: $(A,Z) \rightarrow (A,Z-1) e^+ \nu$
- Cattura K: $(A,Z) e^- \rightarrow (A,Z-1) \nu$
- Decadimento del muone
- Decadimento del top (semi-leptonico, hadronico)
- Scattering $e^+e^- \rightarrow W^+W^-$ [hint: 3 diagrammi possibili (tree-level)]
- Decadimento $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^+ \pi^-$ [hint: implica sia interazioni deboli che forti]
- ...



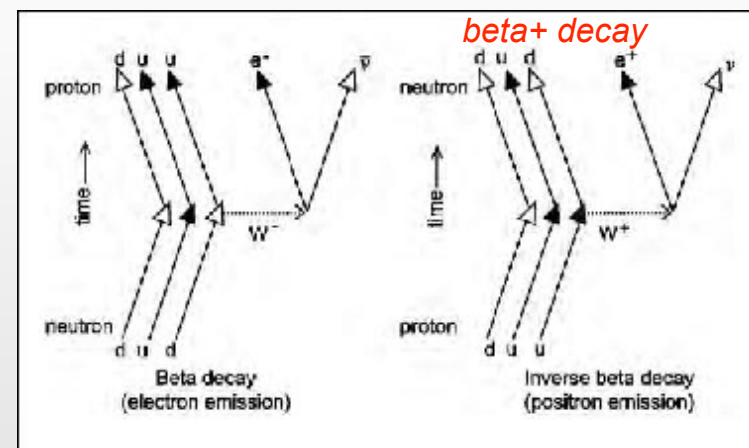
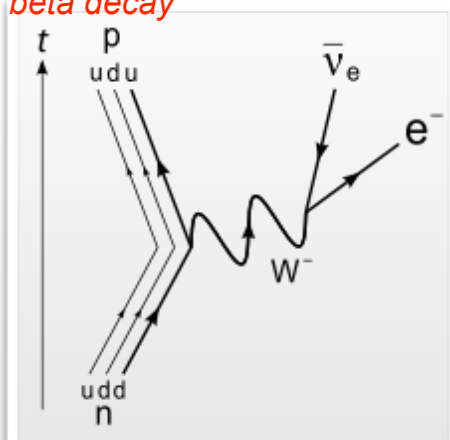
I diagrammi di Feynman al lavoro: *gioco del domino*

“Soluzioni”

Bhabha



beta decay



ee -> WW

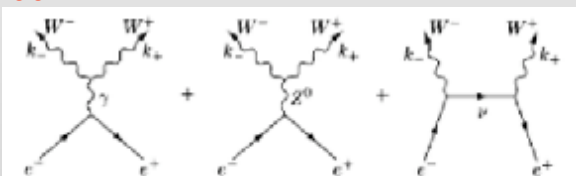
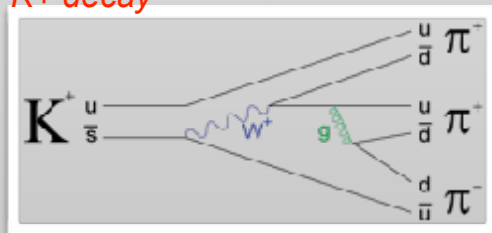
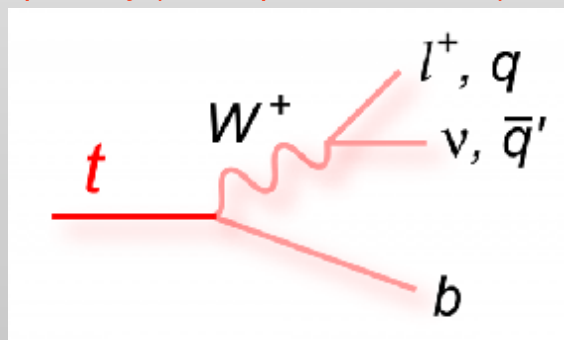


Figure 21.7. Diagrams contributing to $e^+e^- \rightarrow W^+W^-$ in the weak interaction gauge theory.

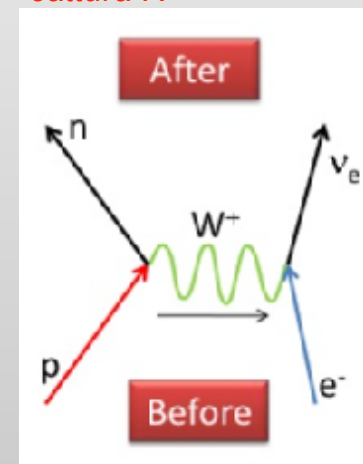
K+ decay

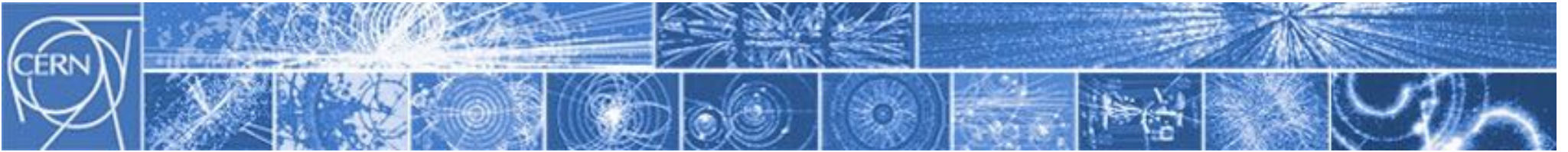


top decay (semileptonic, hadronic)



cattura K





I diagrammi di Feynman al lavoro: *gioco del domino* (un'idea di presentazione/masterclass?)

Processi da riprodurre:

- Bhabha scattering: $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$ [hint: 4 diagrammi possibili (tree-level)]
- Decadimento beta: $(A,Z) \rightarrow (A,Z+1) e^- \bar{\nu}$
- Decadimento beta⁺: $(A,Z) \rightarrow (A,Z-1) e^+ \nu$
- Cattura K: $(A,Z) e^- \rightarrow (A,Z-1) \nu$
- Decadimento del muone
- Decadimento del top (semi-leptonico, hadronico)
- Scattering $e^+e^- \rightarrow W^+W^-$ [hint: 3 diagrammi possibili (tree-level)]
- Decadimento $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^+ \pi^-$ [hint: implica sia interazioni deboli che forti]
- ...