

Le Modèle Standard de la Physique des Particules

G. Moutaka

L2C, UMR5221, CNRS & UM

Summer camp L2 - 2018

Marseille le 11 Juin '18

Plan

Plan

- **Introduction:** avertissement

Plan

- **Introduction:** avertissement
- **De quoi est fait le monde?** Zoologie du Modèle Standard:
 - les particules de matière
 - les champs
 - les quatre interactions

Plan

- **Introduction:** avertissement
- **De quoi est fait le monde?** Zoologie du Modèle Standard:
 - les particules de matière
 - les champs
 - les quatre interactions
- **Concepts Théoriques**

Plan

- **Introduction:** avertissement
- **De quoi est fait le monde?** Zoologie du Modèle Standard:
 - les particules de matière
 - les champs
 - les quatre interactions
- **Concepts Théoriques**
- **Succès & Problèmes**

Introduction: avertissement

Introduction: avertissement

- Certains concepts de base vous apparaîtront (peut-être) pas familiers

Introduction: avertissement

- Certains concepts de base vous apparaîtront (peut-être) pas familiers
- c'est comme si on essayait de comprendre les subtilités d'un poème écrit en chinois sans connaître cette langue!

Introduction: avertissement

- Certains concepts de base vous apparaîtront (peut-être) pas familiers
- c'est comme si on essayait de comprendre les subtilités d'un poème écrit en chinois sans connaître cette langue!
- n'hésitez donc pas à m'interrompre avec des questions!

Introduction: avertissement

- Certains concepts de base vous apparaîtront (peut-être) pas familiers
- c'est comme si on essayait de comprendre les subtilités d'un poème écrit en chinois sans connaître cette langue!
- n'hésitez donc pas à m'interrompre avec des questions!
- des compléments au tableau...

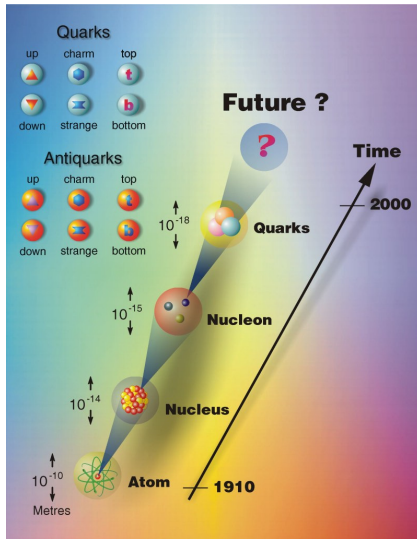
quelle physique?

quelle physique?

- lois et phénomènes se produisant à des échelles de distance $< 10^{-16} - 10^{-19} - (10^{-35})$ mètres ...
[physique des particules]

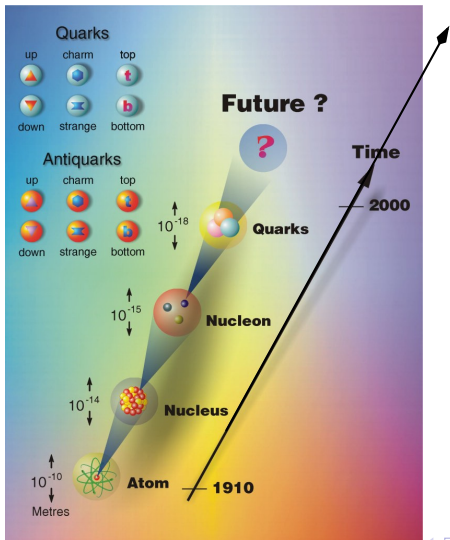
quelle physique?

- lois et phénomènes se produisant à des échelles de distance $< 10^{-16} - 10^{-19} - (10^{-35})$ mètres ...
[physique des particules]



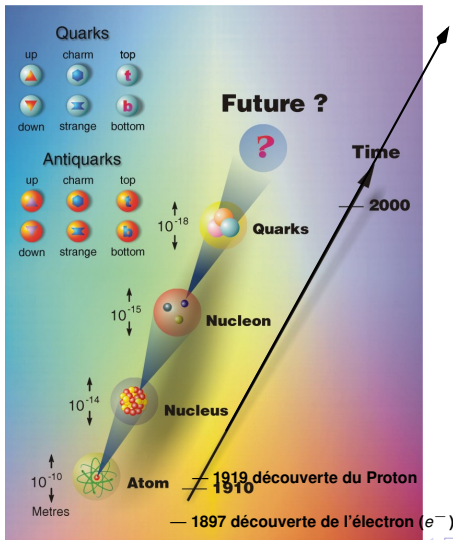
quelle physique?

- lois et phénomènes se produisant à des échelles de distance $< 10^{-16} - 10^{-19} - (10^{-35})$ mètres ...
[physique des particules]



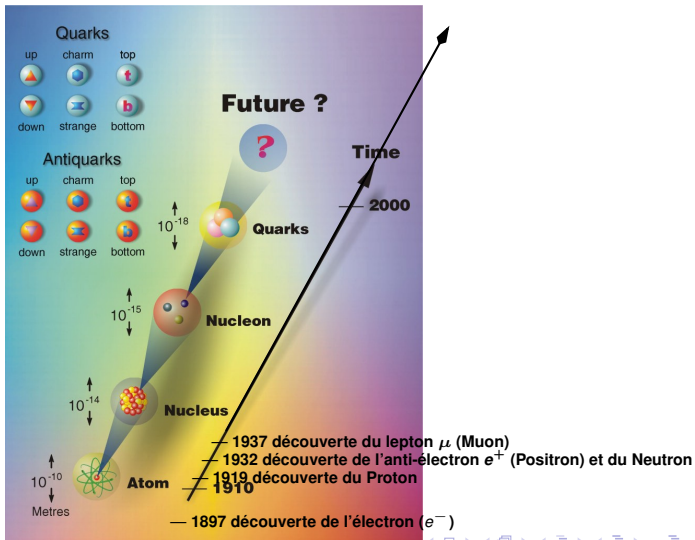
quelle physique?

- lois et phénomènes se produisant à des échelles de distance $< 10^{-16} - 10^{-19} - (10^{-35})$ mètres ...
[physique des particules]



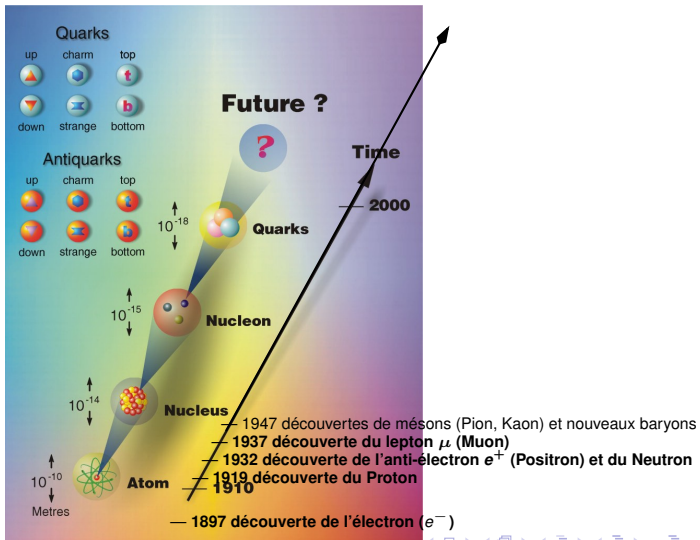
quelle physique?

- lois et phénomènes se produisant à des échelles de distance $< 10^{-16} - 10^{-19} - (10^{-35})$ mètres ...
[physique des particules]



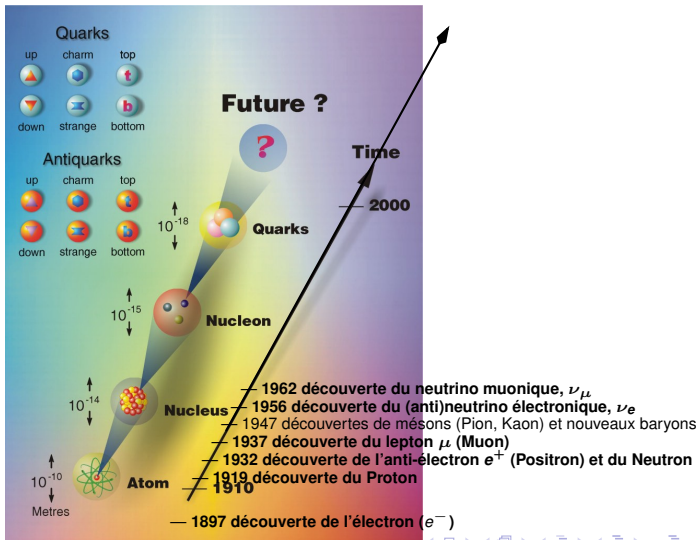
quelle physique?

- lois et phénomènes se produisant à des échelles de distance $< 10^{-16} - 10^{-19} - (10^{-35})$ mètres ...
[physique des particules]



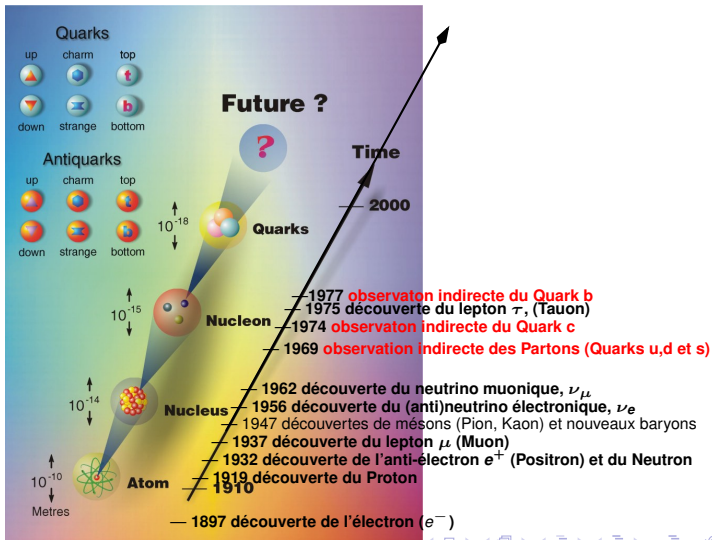
quelle physique?

- lois et phénomènes se produisant à des échelles de distance $< 10^{-16} - 10^{-19} - (10^{-35})$ mètres ...
[physique des particules]



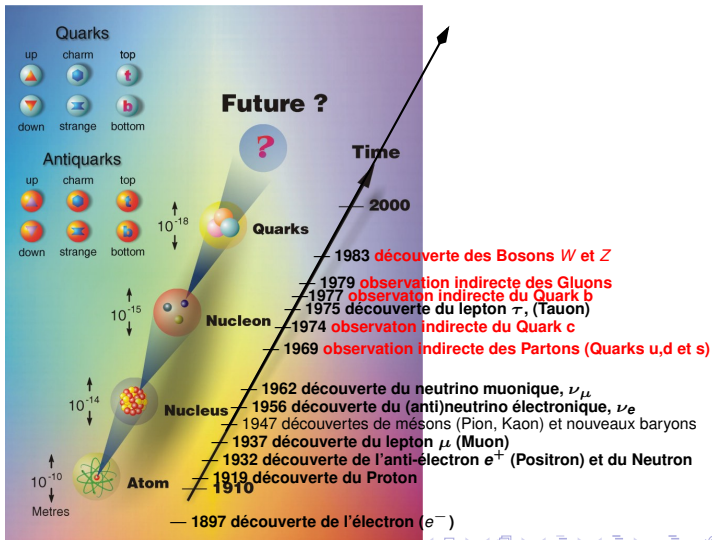
quelle physique?

- lois et phénomènes se produisant à des échelles de distance $< 10^{-16} - 10^{-19} - (10^{-35})$ mètres ...
[physique des particules]



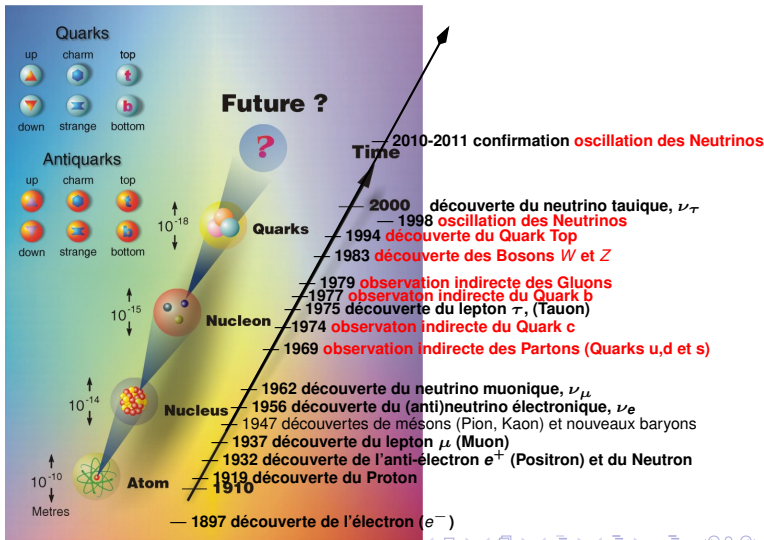
quelle physique?

- lois et phénomènes se produisant à des échelles de distance $< 10^{-16} - 10^{-19} - (10^{-35})$ mètres ...
[physique des particules]



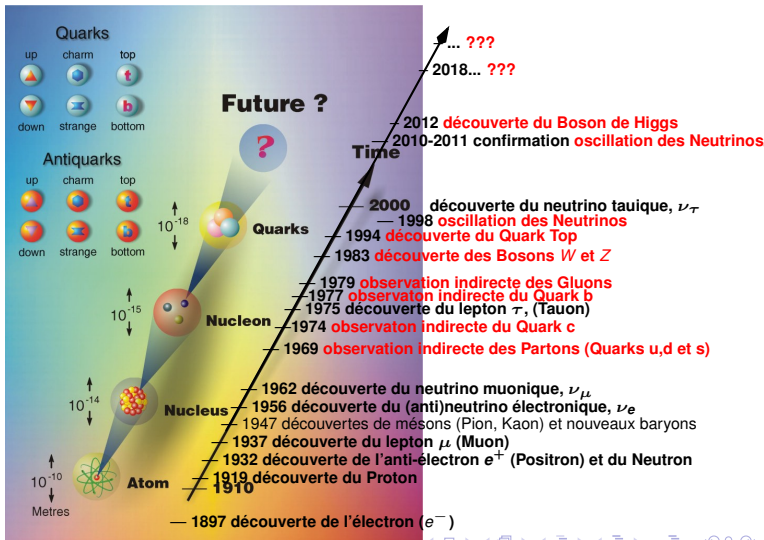
quelle physique?

- lois et phénomènes se produisant à des échelles de distance $< 10^{-16} - 10^{-19} - (10^{-35})$ mètres ...
[physique des particules]



quelle physique?

- lois et phénomènes se produisant à des échelles de distance $< 10^{-16} - 10^{-19} - (10^{-35})$ mètres ...
[physique des particules]



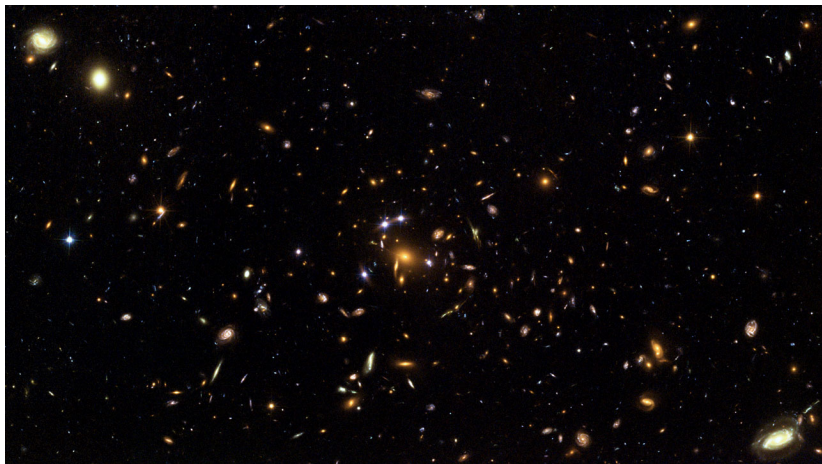
quelle physique?

- *lois et phénomènes se produisant à des échelles de distance $< 10^{-16} - 10^{-19} - (10^{-35})$ mètres ...*
[physique des particules]

quelle physique?

- lois et phénomènes se produisant à des échelles de distance $< 10^{-16} - 10^{-19} - (10^{-35})$ mètres ...
[physique des particules]
- lois et phénomènes se produisant à des échelles de distance $> 10^{19} - 10^{22} - 10^{26}$ mètres...
[cosmologie]

quelle physique?



quelle physique?

- lois et phénomènes se produisant à des échelles de distance $< 10^{-16} - 10^{-19} - (10^{-35})$ mètres ...
[physique des particules]
- lois et phénomènes se produisant à des échelles de distance $> 10^{19} - 10^{22} - 10^{26}$ mètres ...
[cosmologie]

quelle physique?

- lois et phénomènes se produisant à des échelles de distance $< 10^{-16} - 10^{-19} - (10^{-35})$ mètres ...
[physique des particules]
- lois et phénomènes se produisant à des échelles de distance $> 10^{19} - 10^{22} - 10^{26}$ mètres ...
[cosmologie]

liens entre les deux!?

quelle physique?

- lois et phénomènes se produisant à des échelles de distance $< 10^{-16} - 10^{-19} - (10^{-35})$ mètres ...
[physique des particules]
- lois et phénomènes se produisant à des échelles de distance $> 10^{19} - 10^{22} - 10^{26}$ mètres ...
[cosmologie]

liens entre les deux!?

Modèle Standard de la physique des particules

? ⇕ ?

Modèle Standard de la cosmologie

problématique

- physique des particules

problématique

- physique des particules

- 1 *quatre interactions 'fondamentales': ont-elles une origine commune? bien qu'ayant des portées spatiales très différentes? (e.g. infinie comparée à $10^{-18} m$!)*

problématique

- physique des particules

- 1 *quatre interactions 'fondamentales': ont-elles une origine commune? bien qu'ayant des portées spatiales très différentes? (e.g. infinie comparée à 10^{-18} m !)*
- 2 *origine des masses des particules "élémentaires" ?*

problématique

- physique des particules

- 1 *quatre interactions 'fondamentales': ont- elles une origine commune? bien qu'ayant des portées spatiales très différentes? (e.g. infinie comparée à $10^{-18} m$!)*
- 2 *origine des masses des particules "élémentaires" ?*
- 3,4... *plusieurs autres questions esthétiques, spécifiques au Modèle Standard...*

problématique

- physique des particules

- 1 *quatre interactions 'fondamentales': ont- elles une origine commune? bien qu'ayant des portées spatiales très différentes? (e.g. infinie comparée à $10^{-18} m$!)*
- 2 *origine des masses des particules "élémentaires" ?*
- 3,4... *plusieurs autres questions esthétiques, spécifiques au Modèle Standard...*

outils → *la Relativité restreinte & la Mécanique Quantique*

problématique

- physique des particules

- 1 *quatre interactions 'fondamentales': ont- elles une origine commune? bien qu'ayant des portées spatiales très différentes? (e.g. infinie comparée à $10^{-18} m$!)*
- 2 *origine des masses des particules "élémentaires" ?*
- 3,4... *plusieurs autres questions esthétiques, spécifiques au Modèle Standard...*

outils → *la Relativité restreinte & la Mécanique Quantique*
concepts centraux → *Symétrie & brisure spontanée de symétrie*

problématique

- physique des particules

- 1 *quatre interactions 'fondamentales': ont- elles une origine commune? bien qu'ayant des portées spatiales très différentes? (e.g. infinie comparée à $10^{-18} m$!)*
- 2 *origine des masses des particules "élémentaires" ?*
- 3,4... *plusieurs autres questions esthétiques, spécifiques au Modèle Standard...*

outils → la Relativité restreinte & la Mécanique Quantique
concepts centraux → Symétrie & brisure spontanée de symétrie

la notion de vide perd son sens classique ⇒ *le vide est plein*

Les particules et les champs

$$1 \text{ GeV}/c^2 = 10^3 \text{ MeV}/c^2 = 10^6 \text{ keV}/c^2 = 10^9 \text{ eV}/c^2 = 1.7827 \times 10^{-24} \text{ grammes}$$

Les particules et les champs

<i>Les Leptons</i>	<i>masse</i>	<i>charge élec.</i>	<i>spin</i>
<i>electron</i>	$(0.5109989461 \pm 0.0000000031) \times 10^{-3} \text{ GeV}/c^2$	-1	$\frac{1}{2}$
<i>muon</i>	$(105.6583745 \pm 0.0000024) \times 10^{-3} \text{ GeV}/c^2$	-1	$\frac{1}{2}$
<i>tau</i>	$(1.77686 \pm 0.00012) \text{ GeV}/c^2$	-1	$\frac{1}{2}$
<i>neutrinos e, μ, τ</i>	'> 0'	0	$\frac{1}{2}$

$$1 \text{ GeV}/c^2 = 10^3 \text{ MeV}/c^2 = 10^6 \text{ keV}/c^2 = 10^9 \text{ eV}/c^2 = 1.7827 \times 10^{-24} \text{ grammes}$$

Les particules et les champs

<i>Les Leptons</i>	<i>masse</i>	<i>charge élec.</i>	<i>spin</i>
<i>electron</i>	$(0.5109989461 \pm 0.0000000031) \times 10^{-3} \text{ GeV}/c^2$	-1	$\frac{1}{2}$
<i>muon</i>	$(105.6583745 \pm 0.0000024) \times 10^{-3} \text{ GeV}/c^2$	-1	$\frac{1}{2}$
<i>tau</i>	$(1.77686 \pm 0.00012) \text{ GeV}/c^2$	-1	$\frac{1}{2}$
<i>neutrinos e, μ, τ</i>	'> 0'	0	$\frac{1}{2}$

<i>Les Quarks</i>	<i>masse</i>	<i>charge élec.</i>	<i>spin</i>
<i>u "up"</i>	$\sim 2.2 \times 10^{-3} \text{ GeV}/c^2$	$+\frac{2}{3}$	$\frac{1}{2}$
<i>d "down"</i>	$\sim 4.7 \times 10^{-3} \text{ GeV}/c^2$	$-\frac{1}{3}$	$\frac{1}{2}$
<i>c "charmé"</i>	$\sim 1.27 \text{ GeV}/c^2$	$+\frac{2}{3}$	$\frac{1}{2}$
<i>s "étrange"</i>	$\sim .96 \text{ GeV}/c^2$	$-\frac{1}{3}$	$\frac{1}{2}$
<i>t "top"</i>	$173 - 174 \text{ GeV}/c^2$	$+\frac{2}{3}$	$\frac{1}{2}$
<i>b "bottom"</i>	$4 - 5 \text{ GeV}/c^2$	$-\frac{1}{3}$	$\frac{1}{2}$

$$1 \text{ GeV}/c^2 = 10^3 \text{ MeV}/c^2 = 10^6 \text{ keV}/c^2 = 10^9 \text{ eV}/c^2 = 1.7827 \times 10^{-24} \text{ grammes}$$

Les particules et les champs

<i>Les Leptons</i>	<i>masse</i>	<i>charge élec.</i>	<i>spin</i>
<i>electron</i>	$(0.5109989461 \pm 0.0000000031) \times 10^{-3} \text{ GeV}/c^2$	-1	$\frac{1}{2}$
<i>muon</i>	$(105.6583745 \pm 0.0000024) \times 10^{-3} \text{ GeV}/c^2$	-1	$\frac{1}{2}$
<i>tau</i>	$(1.77686 \pm 0.00012) \text{ GeV}/c^2$	-1	$\frac{1}{2}$
<i>neutrinos e, μ, τ</i>	'> 0'	0	$\frac{1}{2}$

<i>Les Quarks</i>	<i>masse</i>	<i>charge élec.</i>	<i>spin</i>
<i>u "up"</i>	$\sim 2.2 \times 10^{-3} \text{ GeV}/c^2$	$+\frac{2}{3}$	$\frac{1}{2}$
<i>d "down"</i>	$\sim 4.7 \times 10^{-3} \text{ GeV}/c^2$	$-\frac{1}{3}$	$\frac{1}{2}$
<i>c "charmé"</i>	$\sim 1.27 \text{ GeV}/c^2$	$+\frac{2}{3}$	$\frac{1}{2}$
<i>s "étrange"</i>	$\sim .96 \text{ GeV}/c^2$	$-\frac{1}{3}$	$\frac{1}{2}$
<i>t "top"</i>	$173 - 174 \text{ GeV}/c^2$	$+\frac{2}{3}$	$\frac{1}{2}$
<i>b "bottom"</i>	$4 - 5 \text{ GeV}/c^2$	$-\frac{1}{3}$	$\frac{1}{2}$

<i>les Bosons de Jauge</i>	<i>masse</i>	<i>charge élec.</i>	<i>spin</i>
<i>le photon</i>	$0 (< 10^{-18} \text{ eV})$	$0 (< 10^{-35})$	1
<i>les gluons</i>	0	0	1
<i>le boson Z⁰</i>	$91.1876 \pm 0.0021 \text{ GeV}/c^2$	0	1
<i>les bosons W[±]</i>	$80.385 \pm 0.015 \text{ GeV}/c^2$	± 1	1

$$1 \text{ GeV}/c^2 = 10^3 \text{ MeV}/c^2 = 10^6 \text{ keV}/c^2 = 10^9 \text{ eV}/c^2 = 1.7827 \times 10^{-24} \text{ grammes}$$

Les particules et les champs

<i>Les Leptons</i>	<i>masse</i>	<i>charge élec.</i>	<i>spin</i>
<i>electron</i>	$(0.5109989461 \pm 0.0000000031) \times 10^{-3} \text{ GeV}/c^2$	-1	$\frac{1}{2}$
<i>muon</i>	$(105.6583745 \pm 0.0000024) \times 10^{-3} \text{ GeV}/c^2$	-1	$\frac{1}{2}$
<i>tau</i>	$(1.77686 \pm 0.00012) \text{ GeV}/c^2$	-1	$\frac{1}{2}$
<i>neutrinos e, μ, τ</i>	'> 0'	0	$\frac{1}{2}$

<i>Les Quarks</i>	<i>masse</i>	<i>charge élec.</i>	<i>spin</i>
<i>u "up"</i>	$\sim 2.2 \times 10^{-3} \text{ GeV}/c^2$	$+\frac{2}{3}$	$\frac{1}{2}$
<i>d "down"</i>	$\sim 4.7 \times 10^{-3} \text{ GeV}/c^2$	$-\frac{1}{3}$	$\frac{1}{2}$
<i>c "charmé"</i>	$\sim 1.27 \text{ GeV}/c^2$	$+\frac{2}{3}$	$\frac{1}{2}$
<i>s "étrange"</i>	$\sim .96 \text{ GeV}/c^2$	$-\frac{1}{3}$	$\frac{1}{2}$
<i>t "top"</i>	$173 - 174 \text{ GeV}/c^2$	$+\frac{2}{3}$	$\frac{1}{2}$
<i>b "bottom"</i>	$4 - 5 \text{ GeV}/c^2$	$-\frac{1}{3}$	$\frac{1}{2}$

<i>les Bosons de Jauge</i>	<i>masse</i>	<i>charge élec.</i>	<i>spin</i>
<i>le photon</i>	$0 (< 10^{-18} \text{ eV})$	$0 (< 10^{-35})$	1
<i>les gluons</i>	0	0	1
<i>le boson Z⁰</i>	$91.1876 \pm 0.0021 \text{ GeV}/c^2$	0	1
<i>les bosons W[±]</i>	$80.385 \pm 0.015 \text{ GeV}/c^2$	± 1	1

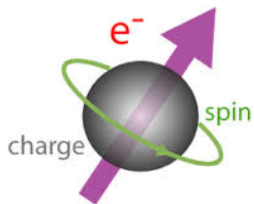
	<i>masse</i>	<i>charge élec.</i>	<i>spin</i>
<i>le Boson de Higgs</i>	$125.09 \pm 0.24 \text{ GeV}/c^2$	0	0

$$1 \text{ GeV}/c^2 = 10^3 \text{ MeV}/c^2 = 10^6 \text{ keV}/c^2 = 10^9 \text{ eV}/c^2 = 1.7827 \times 10^{-24} \text{ grammes}$$

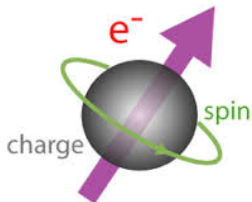
La charge électrique, on "sait" ce que c'est,

La charge électrique, on "sait" ce que c'est,
...et le spin?

La charge électrique, on "sait" ce que c'est,
...et le spin?

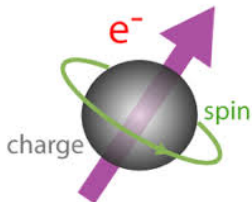


La charge électrique, on "sait" ce que c'est,
...et le spin?



tout se passe comme si l'électron pivotait
sur lui-même comme une toupie...

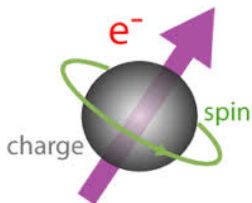
La charge électrique, on "sait" ce que c'est,
...et le spin?



tout se passe comme si l'électron pivotait
sur lui-même comme une toupie...

⇒ en présence d'un champ magnétique
il se comporte comme un petit aimant

La charge électrique, on "sait" ce que c'est,
...et le spin?

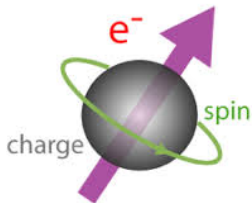


tout se passe comme si l'électron pivotait
sur lui-même comme une toupie...

⇒ en présence d'un champ magnétique
il se comporte comme un petit aimant

en fait il ne pivote **PAS** dans l'espace!

La charge électrique, on "sait" ce que c'est,
...et le spin?



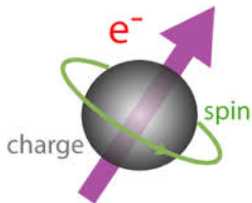
tout se passe comme si l'électron pivotait
sur lui-même comme une toupie...

⇒ en présence d'un champ magnétique
il se comporte comme un petit aimant

en fait il ne pivote **PAS** dans l'espace!

le spin, (comme la charge électrique et d'autres charges)
est un attribut intrinsèque: *un nombre (quantique) interne*

La charge électrique, on "sait" ce que c'est,
...et le spin?



tout se passe comme si l'électron pivotait
sur lui-même comme une toupie...

⇒ en présence d'un champ magnétique
il se comporte comme un petit aimant

en fait il ne pivote **PAS** dans l'espace!

Le spin, (comme la charge électrique et d'autres charges)
est un attribut intrinsèque: *un nombre (quantique) interne*

on appelle *fermions* les particules de spin $\frac{1}{2}, \frac{3}{2}, \frac{5}{2}, \dots$

on appelle *bosons* les particules de spin 0, 1, 2, ...

Les quatre interactions fondamentales

Les quatre interactions fondamentales

Nom	particules la subissant	charge	véhiculée par
électromagnétique	particules chargées	charge électrique	le photon
faible	les leptons & quark	charge faible	les bosons Z^0 et W^\pm
forte	les quarks	couleur	les 8 Gluons
gravitationnelle	toutes	masse	le Graviton (?)

Les quatre interactions fondamentales

Nom	particules la subissant	charge	véhiculée par
électromagnétique	particules chargées	charge électrique	le photon
faible	les leptons & quark	charge faible	les bosons Z^0 et W^\pm
forte	les quarks	couleur	les 8 Gluons
gravitationnelle	toutes	masse	le Graviton (?)

Nom	portée	intensités relatives (à basse énergie)
électromagnétique	infinie	10^{-2}
faible	10^{-18} mètres	10^{-5}
forte	10^{-15} mètres	1
gravitationnelle	infinie	10^{-39}

La portée d'une interaction

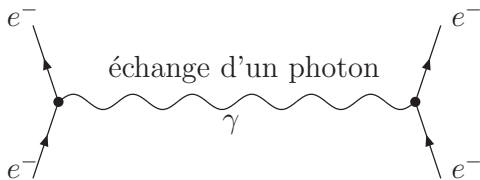
La portée d'une interaction



“interaction Tennis” longue portée
(balle, 60 grammes)

La portée d'une interaction

interaction électromagnétique

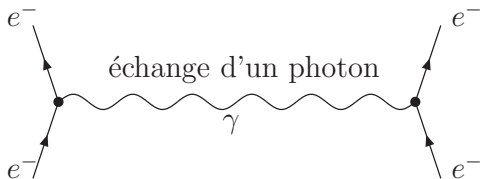


masse du photon, $m_\gamma = 0$

\Rightarrow portée **infinie**

La portée d'une interaction

interaction électromagnétique

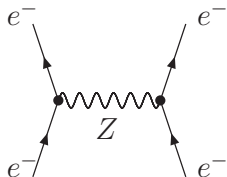


masse du photon, $m_\gamma = 0$

\Rightarrow portée **infinie**

interaction faible

échange d'un Boson faible



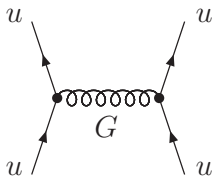
masse du Boson Z^0 , $m_Z \simeq 91 \text{ GeV}/c^2$

\Rightarrow portée très courte $\sim 10^{-18}$ mètres

La portée de l'interaction forte?

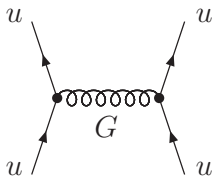
La portée de l'interaction forte?

échange d'un Gluon



La portée de l'interaction forte?

échange d'un Gluon

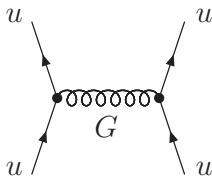


masse des Gluons, $m_G = 0$

et pourtant très courte portée $\sim 10^{-15}$ mètres ?

La portée de l'interaction forte?

échange d'un Gluon



masse des Gluons, $m_G = 0$

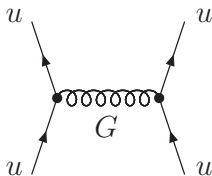
et pourtant très courte portée $\sim 10^{-15}$ mètres ?

en fait l'interaction est tellement forte

que des états liés se forment à courtes distances

La portée de l'interaction forte?

échange d'un Gluon



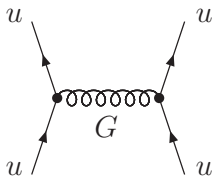
masse des Gluons, $m_G = 0$

et pourtant très courte portée $\sim 10^{-15}$ mètres ?

en fait l'interaction est tellement forte
que des états liés se forment à courtes distances
 \Rightarrow effet d'écran

La portée de l'interaction forte?

échange d'un Gluon



masse des Gluons, $m_G = 0$

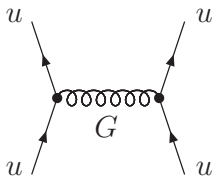
et pourtant très courte portée $\sim 10^{-15}$ mètres ?

en fait l'interaction est tellement forte
que des états liés se forment à courtes distances
 \Rightarrow effet d'écran



La portée de l'interaction forte?

échange d'un Gluon

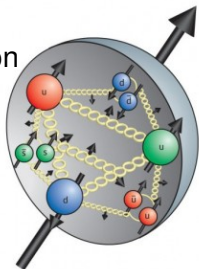


masse des Gluons, $m_G = 0$

et pourtant très courte portée $\sim 10^{-15}$ mètres ?

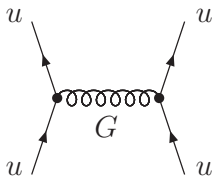
en fait l'interaction est tellement forte
que des états liés se forment à courtes distances
 \Rightarrow effet d'écran

le proton



La portée de l'interaction forte?

échange d'un Gluon

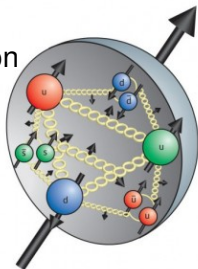


masse des Gluons, $m_G = 0$

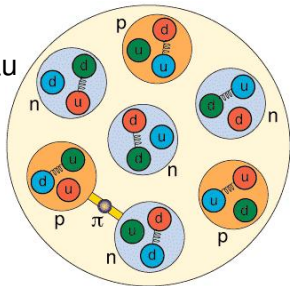
et pourtant très courte portée $\sim 10^{-15}$ mètres ?

en fait l'interaction est tellement forte
que des états liés se forment à courtes distances
 \Rightarrow effet d'écran

le proton

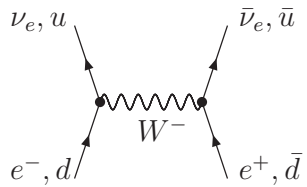


un noyau

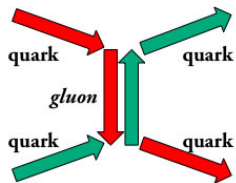
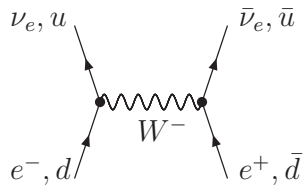


Symétries

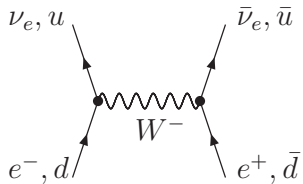
Symétries



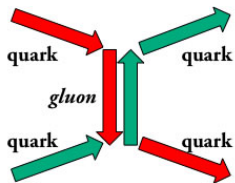
Symétries



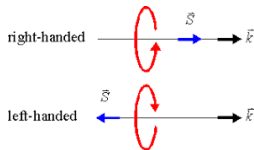
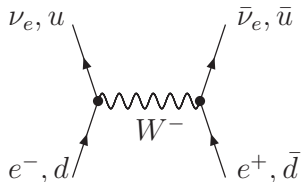
Symétries



$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e^- \end{pmatrix}_L, \begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}_L$$

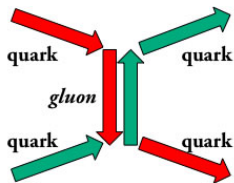


Symétries

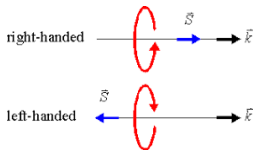
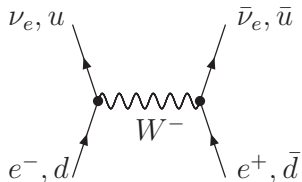


$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e^- \end{pmatrix}_L, \quad \begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}_L$$

$L =$ chiralité gauche

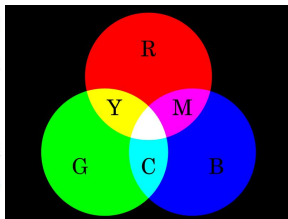
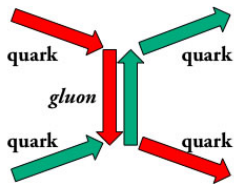


Symétries

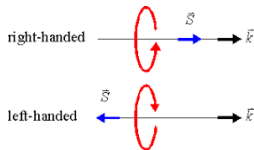
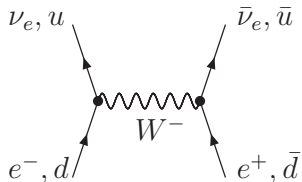


$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e^- \end{pmatrix}_L, \begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}_L$$

$L =$ chiralité gauche

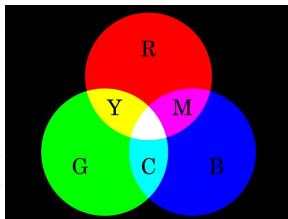
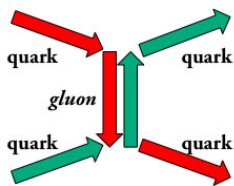


Symétries



$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e^- \end{pmatrix}_L, \begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}_L$$

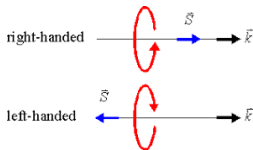
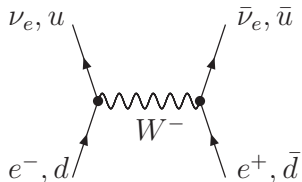
$L =$ chiralité gauche



$$\begin{pmatrix} u \\ u \\ u \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} d \\ d \\ d \end{pmatrix}$$

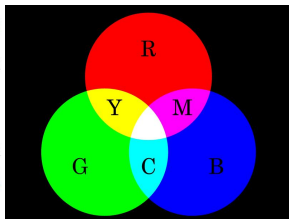
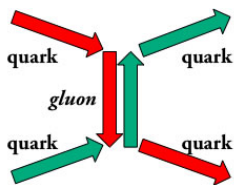
8 Gluons

Symétries



$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e^- \end{pmatrix}_L, \begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}_L \rightarrow SU(2)$$

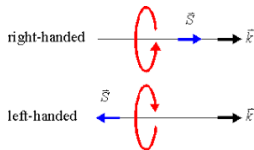
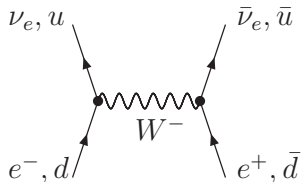
$L = \text{chiralité gauche}$



$$\begin{pmatrix} u \\ u \\ u \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} d \\ d \\ d \end{pmatrix}$$

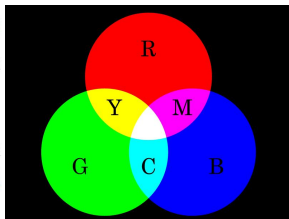
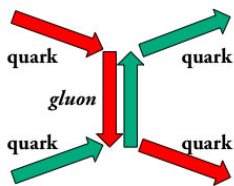
8 Gluons

Symétries



$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e^- \end{pmatrix}_L, \begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}_L \rightarrow SU(2)$$

$L =$ chiralité gauche



$$\begin{pmatrix} u \\ u \\ u \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} d \\ d \\ d \end{pmatrix} \rightarrow SU(3)$$

8 Gluons

un problème théorique

un problème théorique

préliminaires

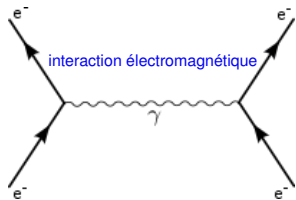
un problème théorique

préliminaires

interaction électromagnétique

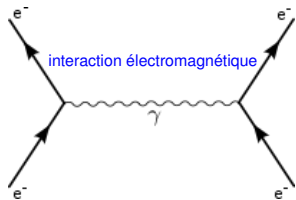
un problème théorique

préliminaires



un problème théorique

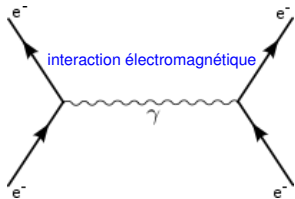
préliminaires



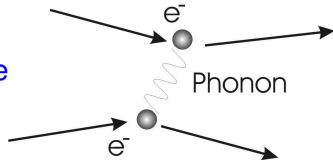
analogue de

un problème théorique

préliminaires

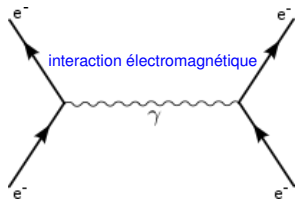


analogue de

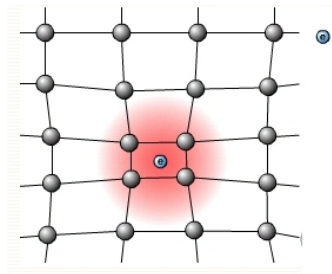
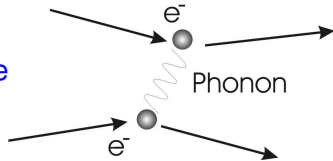


un problème théorique

préliminaires

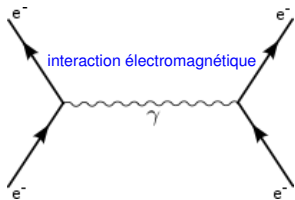


analogue de

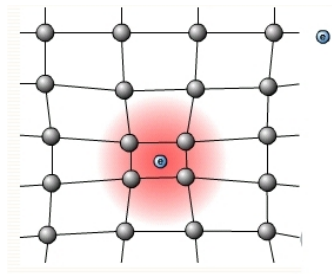
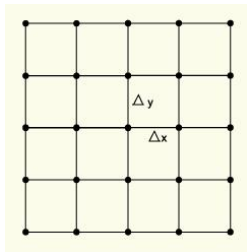
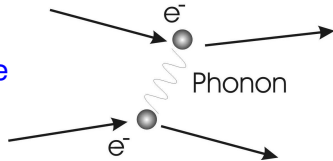


un problème théorique

préliminaires

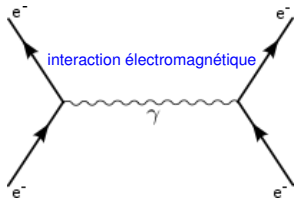


analogue de

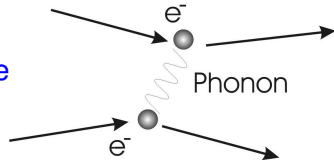


un problème théorique

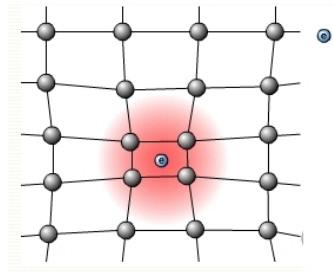
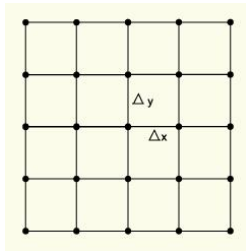
préliminaires



analogue de

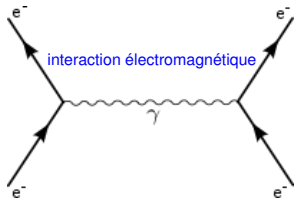


réseau d'atomes
non-relativiste

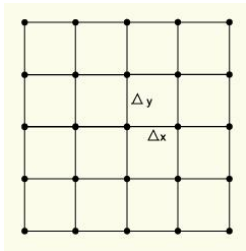


un problème théorique

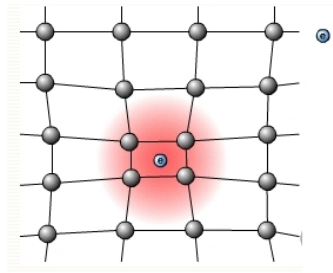
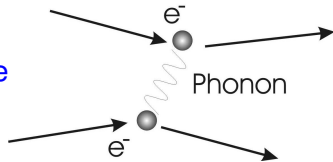
préliminaires



espace-temps
relativiste et $\Delta x, \Delta y \rightarrow 0$

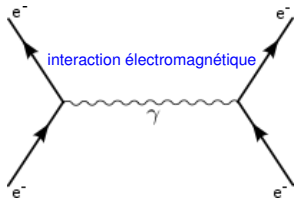


analogue de

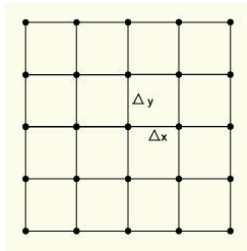


un problème théorique

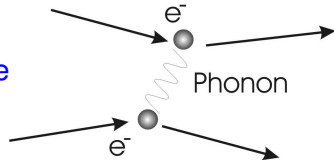
préliminaires



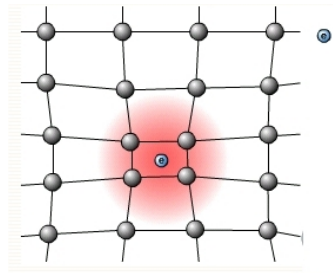
electron & photon
sont des 'quasi-particules'



analogue de



electron est une particule
phonon une quasi-particule



un problème théorique

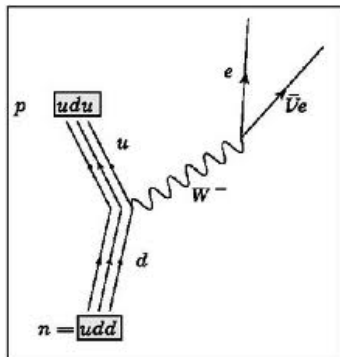
préliminaires

désintégration beta, $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$

un problème théorique

préliminaires

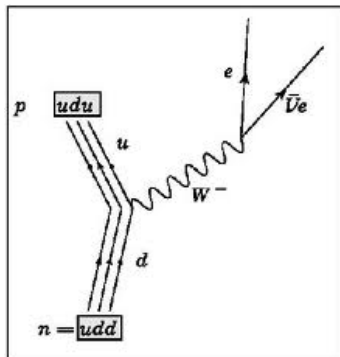
désintégration beta, $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$



un problème théorique

préliminaires

désintégration beta, $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$

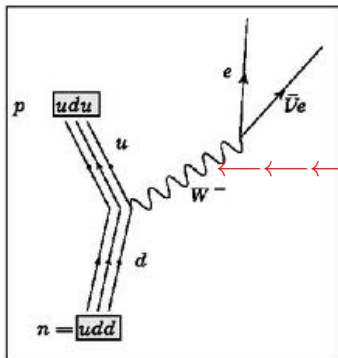


interaction faible, très courte portée, $\sim 10^{-16}$ cm

un problème théorique

préliminaires

désintégration beta, $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$



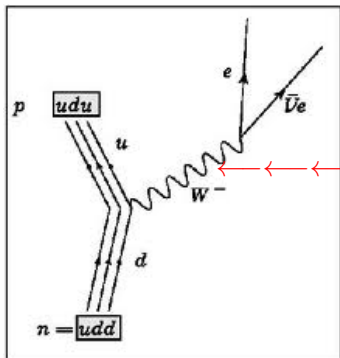
un 'photon' massif

interaction faible, très courte portée, $\sim 10^{-16}$ cm

un problème théorique

préliminaires

désintégration beta, $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$



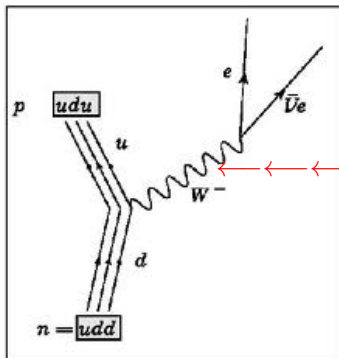
un 'photon' massif
 $m_W \simeq 80 \text{ GeV}/c^2$, $m_Z \simeq 91 \text{ GeV}/c^2$,
(CERN, 1983)

interaction faible, très courte portée, $\sim 10^{-16} \text{ cm}$

un problème théorique

préliminaires

désintégration beta, $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$



un 'photon' massif
 $m_W \simeq 80 \text{ GeV}/c^2$, $m_Z \simeq 91 \text{ GeV}/c^2$,
(CERN, 1983)

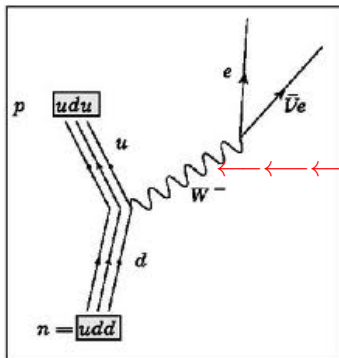
interaction faible, très courte portée, $\sim 10^{-16} \text{ cm}$

la théorie décrit très bien ces phénomènes à basse énergie

un problème théorique

préliminaires

désintégration beta, $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$



un 'photon' massif
 $m_W \simeq 80\text{GeV}/c^2$, $m_Z \simeq 91\text{GeV}/c^2$,
(CERN, 1983)

interaction faible, très courte portée, $\sim 10^{-16}\text{cm}$

la théorie décrit très bien ces phénomènes à basse énergie
mais un problème grave apparaît si on monte en énergie!

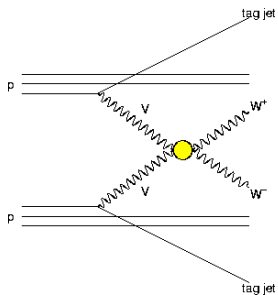
Diffusion à hautes énergies...

Diffusion à hautes énergies...

...de bosons de spin 1, massifs?

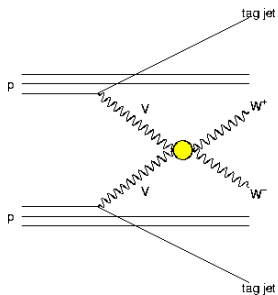
Diffusion à hautes énergies...

...de bosons de spin 1, massifs?



Diffusion à hautes énergies...

...de bosons de spin 1, massifs?

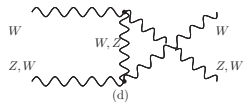
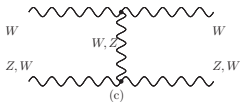
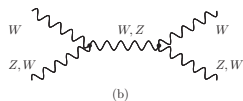
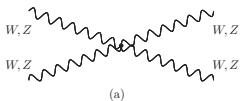


un zoom sur la boule jaune

Diffusion à hautes énergies...

...de bosons de spin 1, massifs?

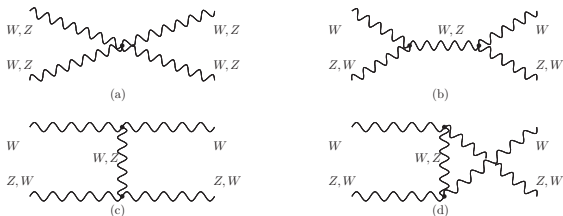
un zoom sur la boule jaune



Diffusion à hautes énergies...

...de bosons de spin 1, massifs?

un zoom sur la boule jaune



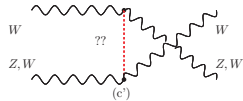
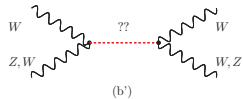
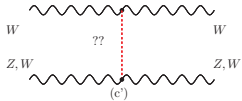
le calcul montre que: si $E \gg m_W c^2, m_Z c^2$,
la probabilité pour cette collision est > 1 !! INCOHERENCE théorique!

Diffusion à hautes énergies...

il y a donc quelque chose qui manque!

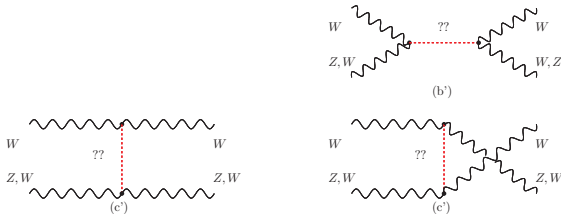
Diffusion à hautes énergies...

il y a donc quelque chose qui manque!



Diffusion à hautes énergies...

il y a donc quelque chose qui manque!



⇒ postuler un état intermédiaire supplémentaire de spin 0, électriquement neutre et couplage $\sim m_W, m_Z$

la contrainte d'unitarité + la 'simplicité'



un boson scalaire neutre avec couplages bien définis

la contrainte d'unitarité + la 'simplicité'



un boson scalaire neutre avec couplages bien définis

seule sa masse est théoriquement inconnue
mais $\lesssim \mathcal{O}(1\text{Teraelectronvolt}) = 10^3\text{GeV}/c^2$

la contrainte d'unitarité + la 'simplicité'



un boson scalaire neutre avec couplages bien définis

seule sa masse est théoriquement inconnue
mais $\lesssim \mathcal{O}(1\text{Teraelectronvolt}) = 10^3\text{GeV}/c^2$

nous l'appellerons '*boson de Higgs*'

la contrainte d'unitarité + la 'simplicité'



un boson scalaire neutre avec couplages bien définis

seule sa masse est théoriquement inconnue
mais $\lesssim \mathcal{O}(1\text{Teraelectronvolt}) = 10^3\text{GeV}/c^2$

nous l'appellerons '*boson de Higgs*'

il donne la masse aux particules élémentaires
unifie les interactions électromagnétique et faible,
au prix de rendre le vide compliqué!

Notre monde: Le Modèle Standard des particules "élémentaires"

Notre monde: Le Modèle Standard des particules "élémentaires"

$$\left(\begin{array}{c} \nu_e \\ e^- \end{array} \right)_L \quad \left(\begin{array}{c} u \\ d \end{array} \right)_L \quad \left(\begin{array}{c} u \\ d \end{array} \right)_L \quad \left(\begin{array}{c} u \\ d \end{array} \right)_L$$

$$e_R^- \quad u_R, d_R \quad u_R, d_R \quad u_R, d_R$$

Notre monde: Le Modèle Standard des particules "élémentaires"

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e^- \end{pmatrix}_L \quad \begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}_L \quad \begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}_L \quad \begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}_L$$

$$e^-_R \quad u_R, d_R \quad u_R, d_R \quad u_R, d_R$$

$$\begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu^- \end{pmatrix}_L \quad \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix}_L \quad \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix}_L \quad \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix}_L$$

$$\mu^-_R \quad c_R, s_R \quad c_R, s_R \quad c_R, s_R$$

Notre monde: Le Modèle Standard des particules "élémentaires"

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e^- \end{pmatrix}_L \quad \begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}_L \quad \begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}_L \quad \begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}_L$$

$$e^-_R \quad u_R, d_R \quad u_R, d_R \quad u_R, d_R$$

$$\begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu^- \end{pmatrix}_L \quad \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix}_L \quad \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix}_L \quad \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix}_L$$

$$\mu^-_R \quad c_R, s_R \quad c_R, s_R \quad c_R, s_R$$

$$\begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau^- \end{pmatrix}_L \quad \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}_L \quad \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}_L \quad \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}_L$$

$$\tau^-_R \quad t_R, b_R \quad t_R, b_R \quad t_R, b_R$$

Notre monde: Le Modèle Standard des particules "élémentaires"

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e^- \end{pmatrix}_L \quad \begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}_L \quad \begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}_L \quad \begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}_L$$

$$e^-_R \quad u_R, d_R \quad u_R, d_R \quad u_R, d_R$$

$$\begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu^- \end{pmatrix}_L \quad \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix}_L \quad \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix}_L \quad \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix}_L$$

$$\mu^-_R \quad c_R, s_R \quad c_R, s_R \quad c_R, s_R$$

$$\begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau^- \end{pmatrix}_L \quad \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}_L \quad \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}_L \quad \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}_L$$

$$\tau^-_R \quad t_R, b_R \quad t_R, b_R \quad t_R, b_R$$

γ le photon

(boson de jauge, véhicule de l'interaction électromagnétique)

Z^0, W^\pm

(bosons de jauge, véhicules de l'interaction faible)

$G^a (a = 1, \dots, 8)$

(bosons de jauge véhicules de l'interaction forte)

Notre monde: Le Modèle Standard des particules "élémentaires"

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e^- \end{pmatrix}_L \quad \begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}_L \quad \begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}_L \quad \begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}_L$$

$$e^-_R \quad u_R, d_R \quad u_R, d_R \quad u_R, d_R$$

$$\begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu^- \end{pmatrix}_L \quad \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix}_L \quad \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix}_L \quad \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix}_L$$

$$\mu^-_R \quad c_R, s_R \quad c_R, s_R \quad c_R, s_R$$

$$\begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau^- \end{pmatrix}_L \quad \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}_L \quad \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}_L \quad \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}_L$$

$$\tau^-_R \quad t_R, b_R \quad t_R, b_R \quad t_R, b_R$$

γ le photon

(boson de jauge, véhicule de l'interaction électromagnétique)

Z^0, W^\pm

(bosons de jauge, véhicules de l'interaction faible)

$G^a (a = 1, \dots, 8)$

(bosons de jauge véhicules de l'interaction forte)

H le Boson de Higgs

(génère les masses unitarise l'interaction faible)

Notre monde: Le Modèle Standard des particules "élémentaires"

$$\left(\begin{array}{c} \nu_e \\ e^- \end{array} \right)_L \quad \left(\begin{array}{c} u \\ d \end{array} \right)_L \quad \left(\begin{array}{c} u \\ d \end{array} \right)_L \quad \left(\begin{array}{c} u \\ d \end{array} \right)_L$$

$$e_R^- \quad \nu_{eR} \quad u_R, d_R \quad u_R, d_R \quad u_R, d_R$$

$$\left(\begin{array}{c} \nu_\mu \\ \mu^- \end{array} \right)_L \quad \left(\begin{array}{c} c \\ s \end{array} \right)_L \quad \left(\begin{array}{c} c \\ s \end{array} \right)_L \quad \left(\begin{array}{c} c \\ s \end{array} \right)_L$$

$$\mu_R^- \quad \nu_{\mu R} \quad c_R, s_R \quad c_R, s_R \quad c_R, s_R$$

$$\left(\begin{array}{c} \nu_\tau \\ \tau^- \end{array} \right)_L \quad \left(\begin{array}{c} t \\ b \end{array} \right)_L \quad \left(\begin{array}{c} t \\ b \end{array} \right)_L \quad \left(\begin{array}{c} t \\ b \end{array} \right)_L$$

$$\tau_R^- \quad \nu_{\tau R} \quad t_R, b_R \quad t_R, b_R \quad t_R, b_R$$

γ le photon

(boson de jauge, véhicule de l'interaction électromagnétique)

Z^0, W^\pm

(bosons de jauge, véhicules de l'interaction faible)

$G^a (a = 1, \dots, 8)$

(bosons de jauge véhicules de l'interaction forte)

H le Boson de Higgs

(génère les masses unitarise l'interaction faible)

Ce modèle a été testé expérimentalement avec une très grande précision

Ce modèle a été testé expérimentalement avec une très grande précision

Il permet de décrire la plupart des phénomènes de la physique des particules

Ce modèle a été testé expérimentalement avec une très grande précision

Il permet de décrire la plupart des phénomènes de la physique des particules

Mais il a quelques défauts

Ce modèle a été testé expérimentalement avec une très grande précision

Il permet de décrire la plupart des phénomènes de la physique des particules

Mais il a quelques défauts

La recherche théorique et expérimentale continuent
pour découvrir ce qu'il y a au delà de ce modèle

Ce modèle a été testé expérimentalement avec une très grande précision

Il permet de décrire la plupart des phénomènes de la physique des particules

Mais il a quelques défauts

La recherche théorique et expérimentale continuent
pour découvrir ce qu'il y a au delà de ce modèle

vous en entendrez parler davantage durant la semaine...

Notre monde: Le problème de l'hierarchie des masses

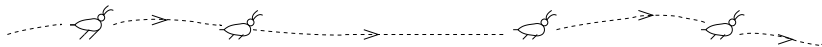
Notre monde: Le problème de l'hierarchie des masses

La fourmi et l'éléphant

Notre monde: Le problème de l'hierarchie des masses

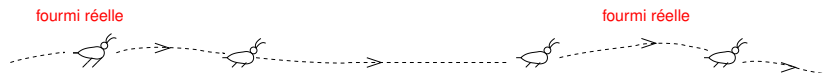
La fourmi et l'éléphant

fourmi réelle



Notre monde: Le problème de l'hierarchie des masses

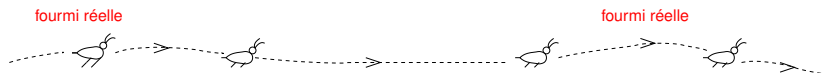
La fourmi et l'éléphant



Notre monde: Le problème de l'hierarchie des masses

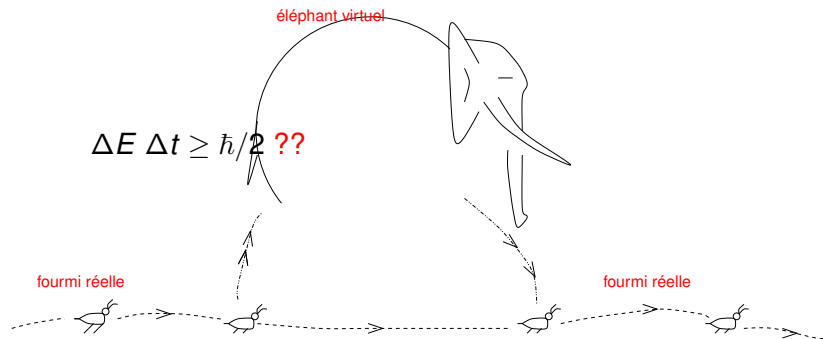
La fourmi et l'éléphant

$$\Delta E \Delta t \geq \hbar/2 ??$$



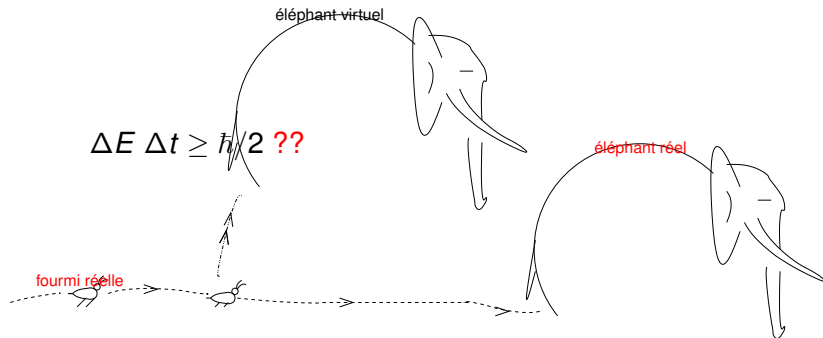
Notre monde: Le problème de l'hérarchie des masses

La fourmi et l'éléphant



Notre monde: Le problème de l'hérarchie des masses

La fourmi et l'éléphant



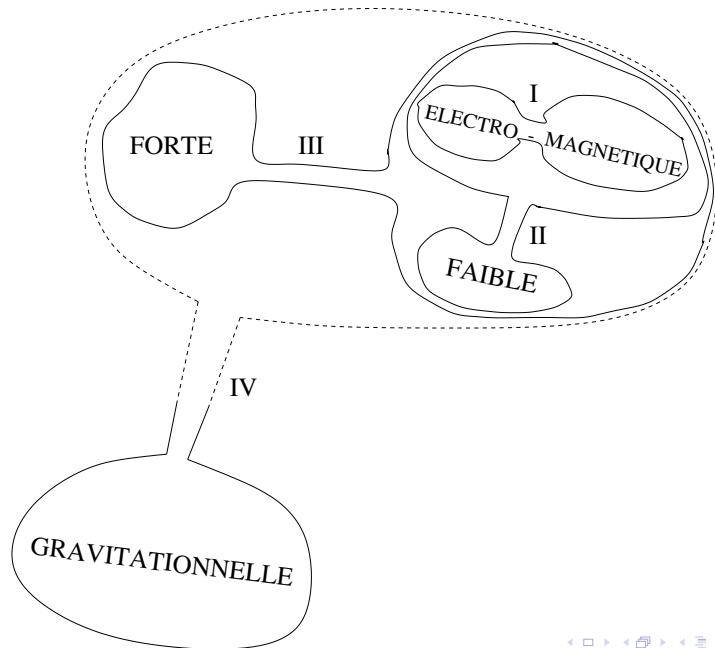
Sur le chemin de l'Unification?

"...quand des phénomènes considérés comme dus à des causes différentes étaient réduits à un seul principe, ils étaient presque tout le temps accompagnés par la découverte de phénomènes nouveaux, car une nouvelle approche dans la conception des causes suggère une multitude de nouvelles expériences à essayer et d'explications à vérifier."



André Marie Ampère (1775-1836)

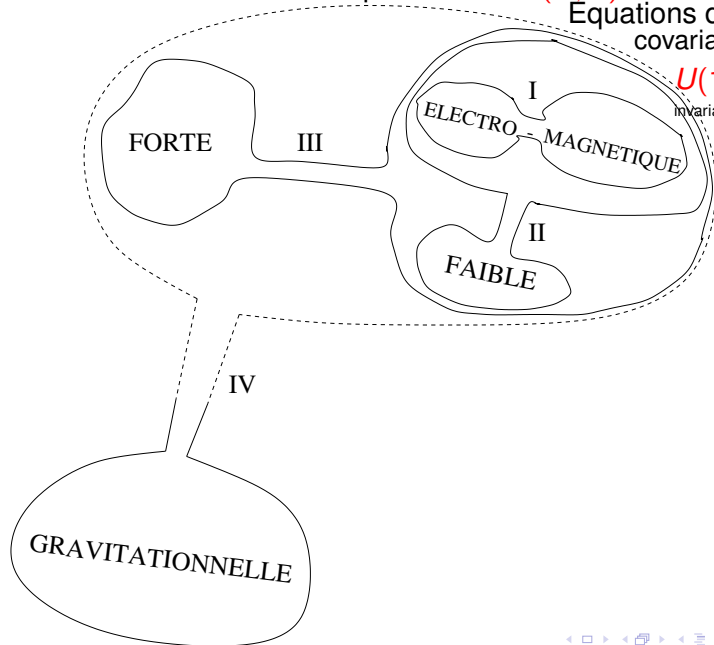
Sur le chemin de l'Unification?



Sur le chemin de l'Unification?

passerelle I (\vec{E}, \vec{B}) unifiés:
Equations de Maxwell
covariance de Lorentz

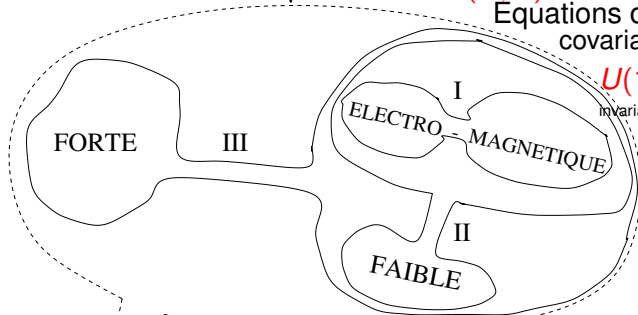
$U(1)$
invariance de jauge abélienne



Sur le chemin de l'Unification?

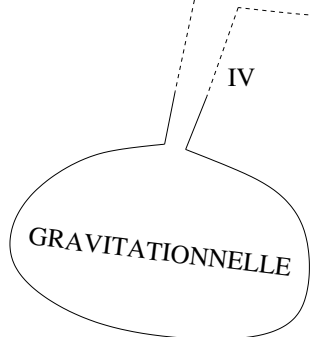
passerelle I (\vec{E}, \vec{B}) unifiés:
Equations de Maxwell
covariance de Lorentz

$U(1)$
invariance de jauge abélienne

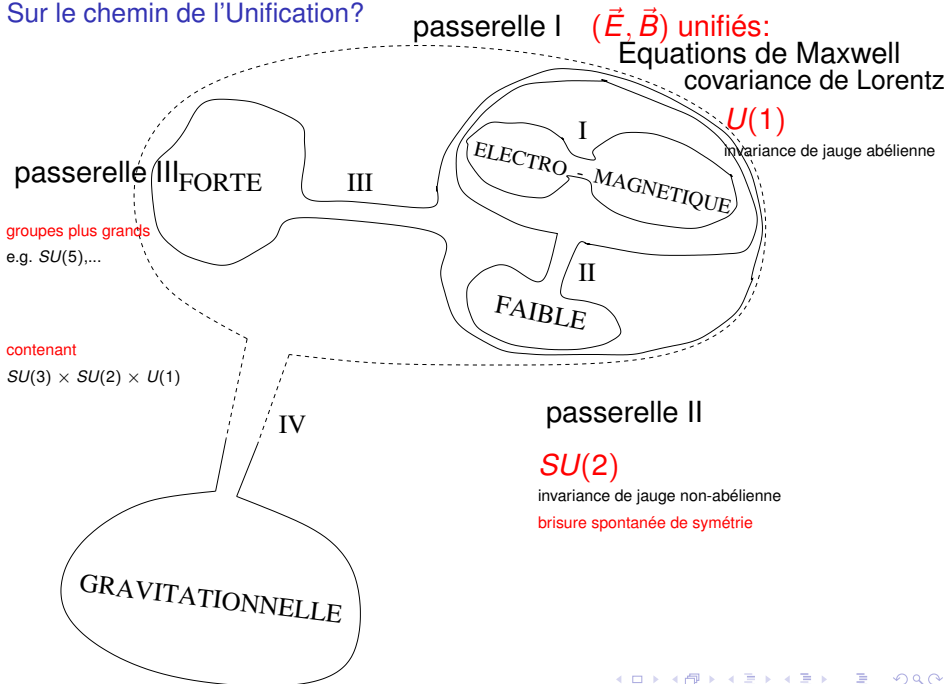


passerelle II

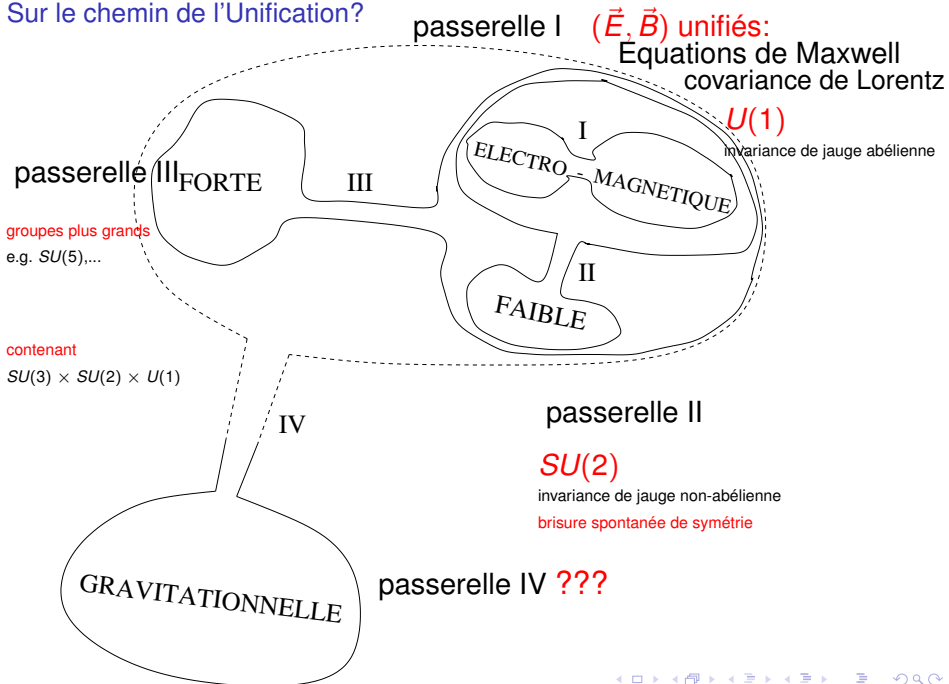
$SU(2)$
invariance de jauge non-abélienne
brisure spontanée de symétrie



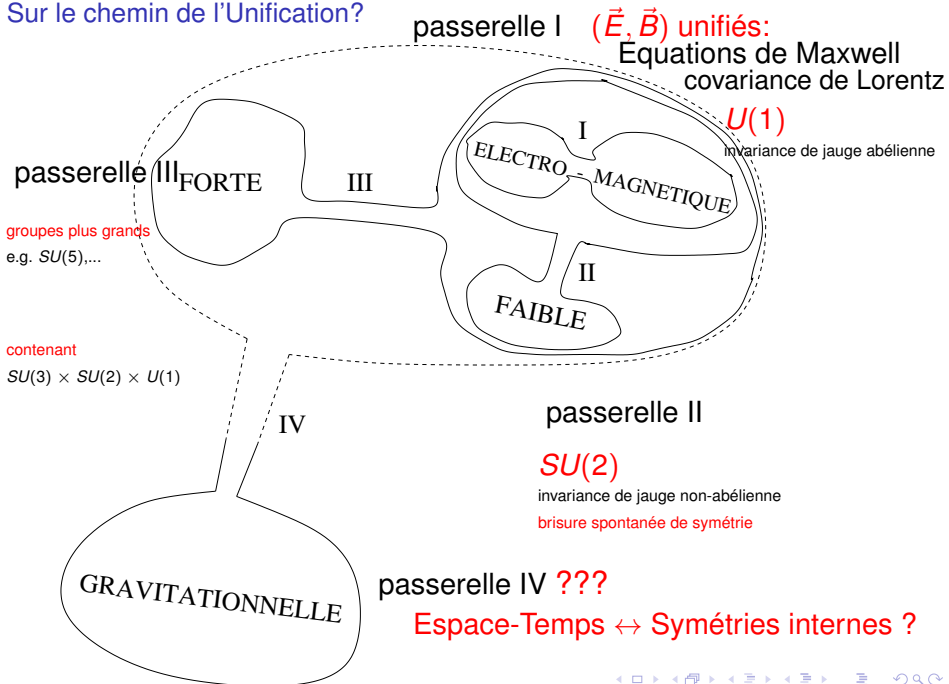
Sur le chemin de l'Unification?



Sur le chemin de l'Unification?



Sur le chemin de l'Unification?



collisionneurs

