

# Physique subatomique

## Théorie quantique des champs

La QFT est une théorie très réductionniste. L'idée est de comprendre le monde à partir de l'échelle la plus petite possible.

### Remarque (Historique/Paradigme)

Démocrite à la première théorie "réductionniste". Il pense que les atomes sont agencé de manière aléatoire (non divine). Il pense que tout les atomes sont différents. Un théorie qui s'y oppose est la théorie des élément qui viennent seulement en 4 types mais ou tout est continue.

Ces deux théorie on été "combinée" par Dalton qui parlait d'atome d'un nombre de type fini.

En théorie quantique des champs est très continue. Des champs émane les particules et non le contraire.

Il existe une correspondance en QFT entre les types de particules (ex. électrons). et les champs. Il y a deux grandes catégories de champs (particules donc) : les fermions (qui ont un spin demi-entier) et les bosons (qui ont un spin entier). Les fermions sont beaucoup moins "classiques" que les bosons.

Familles				
	Q	1	2	3
Leptons	0	$\nu_e$	$\nu_\mu$	$\nu_\tau$
	-1	e	$\mu$	$\tau$
Quarks	$\frac{2}{3}$	u	c	t
	$-\frac{1}{3}$	d	s	b

FIGURE 1 – fermions

Il est impossible d'isoler un quark seul. On ne peut qu'observer des combinaisons de quarks.

Tout les fermions sont décrits par l'équation de Dirac. Au contraire, les bosons sont décrits par des théories de Gauge. Bien que ces transformation de Gauge soient présenté comme relativement peut importante dans le cadre de l'électromagnétiste,

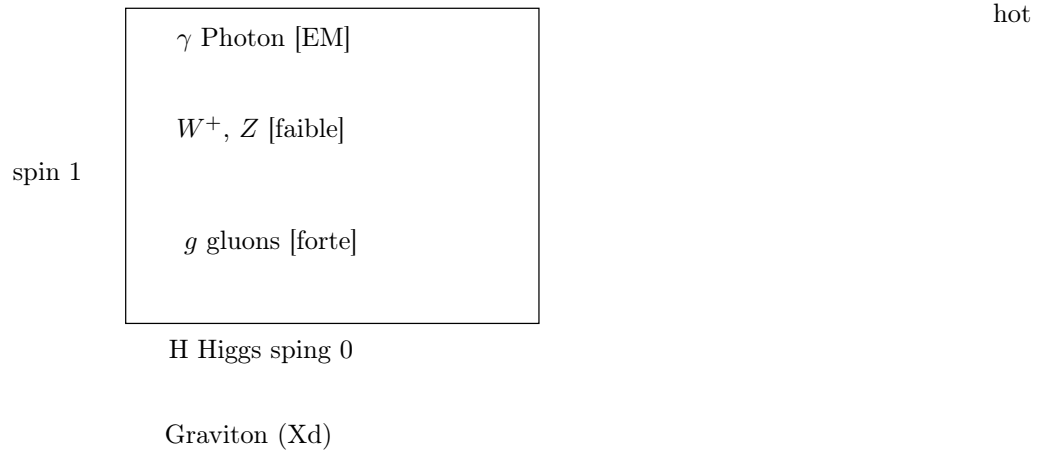


FIGURE 2 – bosons

c'est le fondement de la QFT.

Toutes les particules en QFT ont une antiparticule qui leur est associée, bien que les bosons soient pour la plupart leur propre anti-particule (sauf  $W^+ \leftrightarrow W^-$ )

Les champs sont toujours dans leur état fondamental, sauf lorsqu'il y a des particules. L'exception à cette règle est le champ de Higgs qui a une valeur constante non-nulle.

## Les masses

### Remarque (unités)

On n'utilise pas le système SI dans le cadre de la QFT. Les masses sont plutôt exprimées en MeV. On utilise également souvent les unités naturelles ( $c = 1$ ,  $\hbar = 1$ ). Le fait que  $c = 1 \implies$  on ne fait pas de différence entre longueur et temps.  $\hbar = 1 \implies E = \omega$ . Comme tout peut finalement s'exprimer en énergie on prend une unité d'énergie : le MeV.

$(q, q, q) \leftrightarrow$  baryons (sont des fermions)

proton  $\rightarrow uud \sim 238 \text{ MeV} \sim 1 \text{ GeV}$

neutron  $\rightarrow udd \sim 237 \text{ MeV}$

mesons  $\rightarrow q\bar{q}$  (sont des bosons)

pions  $\pi^0 : u\bar{u} \quad \pi^+ : u\bar{d} \quad \pi^- : \bar{u}d$

Les muons : on deux cents fois la masses de l'électron.

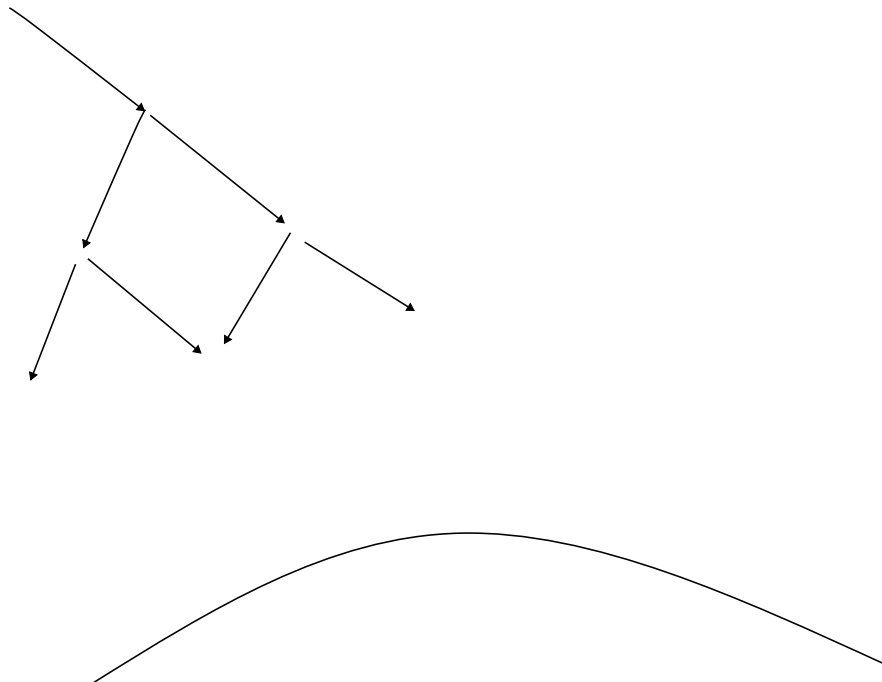


FIGURE 3 – pluie

## Rappels sur la relativité

quadrivecteur :

$$x = (t, x, y, z)$$

$$x^\mu = [t, x, y, z]$$

$$p^\mu = [E, p]$$

$$k^\mu = [\omega, k] = \frac{1}{\hbar} p^\mu$$

$$j^\mu = [p, \vec{j}]$$

$$\partial_\mu = [\frac{\partial}{\partial t}, \nabla]$$

$$A'^\mu = \Lambda^\mu_\nu A^\nu \text{ Contravariant}$$

$$A'_\mu = (\Lambda^{-1})^\nu_\mu A_\nu \text{ Covariant}$$

$$A_{\mu\nu} = g_{\nu\mu} A^\nu \quad A^\mu = g^{\nu\mu} A_\nu$$

Où  $g$  est le tenseur métrique.

Quadri-vecteur :

$$\partial_{\mu\nu} j^\mu(x) = \partial'_\mu j'^\mu \text{ scalaire (donc invariant)}$$

## Action je crois

$$S = \int_{t_i}^{t_f} dt \frac{1}{2} m \mathbf{v}^2(T) \quad \text{non-relativiste}$$

$$\rightarrow -m \int_A^V d\tau = -m \int_A^B dt \sqrt{1 - \mathbf{v}^2} = -m \int_A^B dt \left\{ 1 - \frac{1}{2} \mathbf{v}^2 + \frac{12}{\mathbf{v}^2} - \dots \right\} = -m(t_B - T_a) + \frac{1}{2} \int_A^B d\tau m \mathbf{v}^2 - \dots$$

$$L = -m \sqrt{1 - \mathbf{v}^2}$$

$$\mathbf{p} = \frac{\partial L}{\partial \mathbf{v}} = \frac{m \mathbf{v}}{\sqrt{1 - \mathbf{v}^2}}$$

$$H = \mathbf{p} d\mathbf{v} - L = \frac{m \mathbf{v}^2}{\sqrt{1 - v^2}} + m \sqrt{1 - v^2} = \frac{m}{\sqrt{1 - \mathbf{v}^2}} = \sqrt{\mathbf{p}^2 + m^2}$$

### 4-impulsion

$$p^\mu = (E, \mathbf{p}) = m u^\mu$$

$$u^\mu = \frac{dx^\mu}{d\tau} = \left( \frac{dt}{d\tau}, \frac{d\mathbf{r}}{d\tau} \right) = \left( \frac{1}{\sqrt{1 - v^2}}, \frac{\mathbf{v}}{\sqrt{1 - v^2}} \right)$$

Invariant associé au quadri-vecteur

$$p^\mu p_{\mu} = p^2 = E^2 - \mathbf{p}^2 = m^2 \overset{1}{\cancel{v^2}} = m^2$$

$$p^2 = m^2$$

$$\mathbf{v} = \frac{\mathbf{p}}{E}$$

$$\text{masse nulle} \rightarrow p^2 = 0 \rightarrow T = |\mathbf{p}|$$

$$p_\pi = (m_\pi, \mathbf{0})$$

$$p_\pi = p_\mu + p_\nu$$

$$p_\nu = p_\pi - p_\mu$$

$$p_\nu^2 = p_\pi^2 + p_\mu^2 - 2p_\pi p_\mu$$

$$0 = m_\pi^2 + m_\mu^2 - 2m_\pi E_\mu$$

$$E_\mu = \frac{m_\pi^2 + m_\mu^2}{2m_\pi}$$

$$E_{nu} = m_\pi - E_\mu = \frac{m_\pi^2 - m_\mu^2}{m_\pi} = |\mathbf{p}_\nu| = |\mathbf{p}_\nu|$$

$$|\mathbf{v}_\mu| = \frac{m_\pi^2 - m_\mu^2}{m_\pi^2 - m_\mu^2}$$

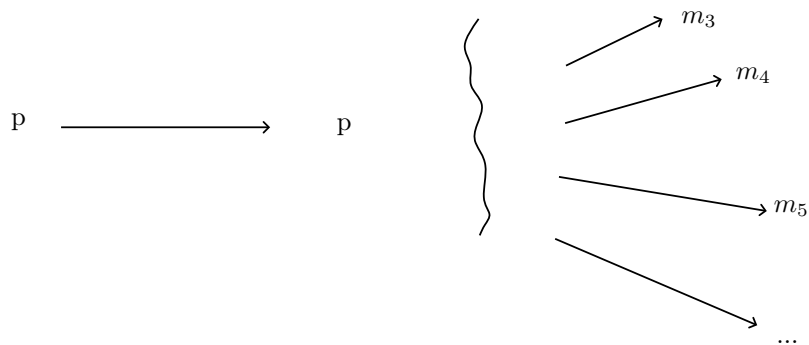


FIGURE 1 – proton incident

Énergie de seuil ? (Plus d'Énergie cinétique à la fin)

$$E = \sum_{i=3}^N m_i$$

$$p_1^\mu + p_2^\mu = \sum_{i=3}^N p_i^\mu$$

$$(p_1^\mu + p_2^\mu)^2 = \left[ \sum_{i=3}^N p_i^\mu \right]^2 = \left( \sum_{i=3}^N m_i \right)^2$$

au seuil  $p_i = (m_i, \mathbf{0})$

$$E_p = \frac{M_{\text{tot}}^2 - 2m_p^2}{2m_p}$$

L'énergie requise va comme le carré des masses.

#### Unités naturelles

$$\hbar c = 197 \text{MeV} \cdot \text{fm}$$

$$\frac{\hbar c}{m_e c^2} = \frac{197 \text{MeV} \cdot \text{fm}}{0,511 \text{MeV}} = 400 \text{fm} \quad \text{longueur d'onde de Compton}$$

Constante de structure fine

$$\alpha = \frac{e^2}{4\pi\hbar c} \sim \frac{1}{137}$$

#### Heaviside-Lorentz

$$\epsilon_0 = 1 \quad \mu_0 = 1$$

$$\frac{\alpha \hbar}{m_e c} = \frac{e^2}{4\pi m_e c^2} = \text{rayon classique de l'électron}$$

$$\frac{\hbar}{m_e \alpha c} = \frac{4\pi \hbar c \hbar}{e^2 m_e c} = \frac{4\pi \hbar^2}{m_e e^2} = \text{rayon de bohr}$$

onde plane

$$\psi(\mathbf{r}) = \frac{1}{\sqrt{\nu}} e^{i\mathbf{p} \cdot \mathbf{r}}$$

Condition au limite périodiques à l'univers (une boîte bien sûr)

$$e^{ip_x L_x} = 1$$

$$\mathbf{p} = 2\pi \left( \frac{n_x}{L_x}, \frac{n_y}{L_y}, \frac{n_z}{L_z} \right)$$

où  $n \in \mathbb{Z}$

$$\Delta p_x = \frac{2\pi}{L_x} \leftrightarrow \Delta n_x = 1$$

$$\Delta p_x \Delta p_y \Delta p_z = \frac{(2\pi)^3}{L_x L_y L_z} = \frac{(2\pi)^3}{\nu}$$

$$\sum_{\mathbf{p}} f_{\mathbf{p}} = \nu \int \frac{dP}{(2\pi)^3} f_{\mathbf{p}}$$

$$\langle \mathbf{p}' | \mathbf{p} \rangle = \delta_{\mathbf{p}\mathbf{p}'} \& \sum_{\mathbf{p}} |\mathbf{p}\rangle \langle \mathbf{p}| = \mathbb{1}$$

$$\langle \mathbf{r} | \mathbf{p} \rangle = \frac{1}{\sqrt{\nu}} e^{i\mathbf{p} \cdot \mathbf{r}}$$

$$\delta_{\mathbf{p}\mathbf{p}'} \rightarrow \frac{(2\pi)^3}{\nu} \delta(\mathbf{p} - \mathbf{p}')$$

$$\text{Normalisation continue} \begin{cases} \langle \mathbf{p}' | \mathbf{p} \rangle = (2\pi)^3 \delta(\mathbf{p} - \mathbf{p}') \\ \int \frac{d^3 P}{(2\pi)^3} \langle \mathbf{p} | \mathbf{p} \rangle = \mathbb{1} \end{cases}$$

On a le problème que  $d^3 P$  n'est pas invariant de Lorentz

$d^3 p dp^0$  en revanche l'est

$$d^3 \gamma dt = d^4 x = d^4 x'$$

Le Jacobien

$$J = 1$$

$$\int \frac{d^3 P}{(2\pi)^3} \rightarrow \int \frac{d^4}{(2\pi)^3} \delta(p^2 - m^2) \theta(p^0)$$

$$\int \frac{d^4 P}{(2\pi)^3} \delta((p^0 - E_{\mathbf{p}})(p^0 + E_{\mathbf{p}})) \Theta(p^0)$$

$$E_{\mathbf{p}} = \sqrt{\mathbf{p}^2 + m^2}$$

$$\delta(\beta x) = \frac{1}{|\beta|} \delta(x)$$

$$\int \frac{d^4 P}{(2\pi)^3 2E_p} \delta(p^0 - E_p) = \int \frac{d^3 P}{(2\pi)^3 2E_p}$$

$$\text{Normalisation relativiste} \begin{cases} \int \frac{d^3 P}{(2\pi)^3 2E_p} \langle \mathbf{p} | \mathbf{p} \rangle = \mathbb{1} \\ \langle \mathbf{p} | \mathbf{p}' \rangle = 2E_{\mathbf{p}} \delta(\mathbf{p} - \mathbf{p}') (2\pi)^2 \end{cases}$$



## Exercice : Effet compton

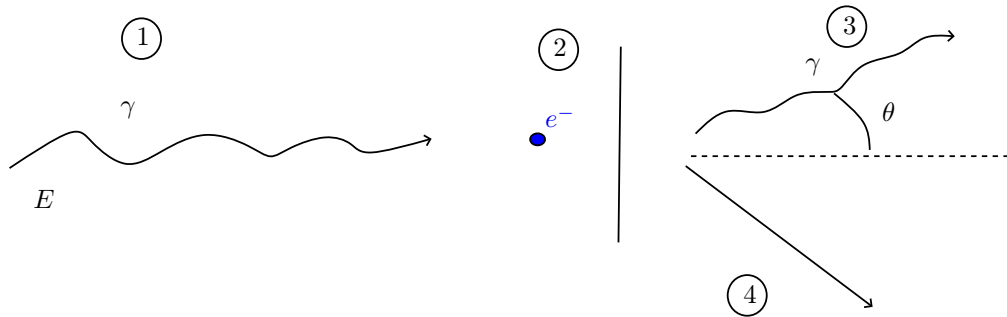


FIGURE 1 – effet compton

Formulation en termes de 4-vecteur :

$$p_1 + p_2 = p_3 + p_4$$

$$(p_1 + p_2 - p_3)^2 = p_4^2 = m^2$$

$$p_1^2 + p_2^2 + p_3^2 + 2p_1p_2 - 2p_1p_3 - 2p_2p_3 = m^2$$

$$p_1p_2 = p_1^0p_2^0 - \mathbf{p}_1 \cdot \mathbf{p}_2 = Em$$

$$p_1p_3 = EE' = \mathbf{p}_1\mathbf{p}_2 = EE' - EE' \cos \theta = EE'(1 - \cos \theta)$$

$$0 + m^2 + 0 + 2Em - 2EE'(1 - \cos \theta) - 2E'm = m^2$$

$$\frac{1}{E'} - \frac{1}{m}(1 - \cos \theta) - \frac{1}{E} = 0$$

$$\frac{1}{E'} = \frac{1}{E} + \frac{1}{m}(1 - \cos \theta)$$

$$\frac{1}{E} = \frac{1}{|\mathbf{k}|} = \lambda = \frac{\lambda}{2\pi}$$

$$\Rightarrow \lambda' = \lambda + \underbrace{\frac{1}{m}}_{\lambda_c} (1 - \cos \theta)$$

## Désintégration

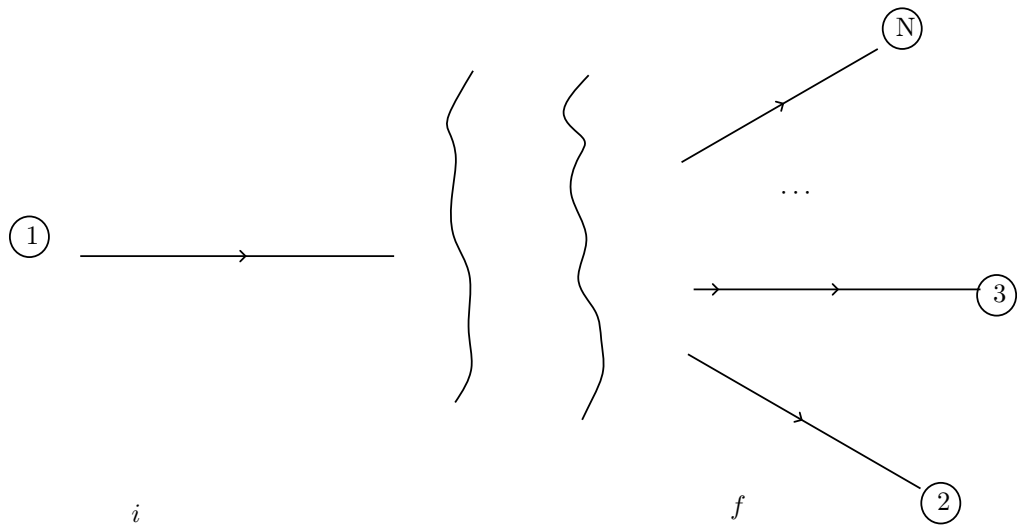


FIGURE 2 – Désintégration

## Règle d'or de Fermi

$$\Gamma_{i \rightarrow f} = 2\pi |M_{fi}|^2 \delta(E_i - E_f)$$

$$M_{fi} = \langle f | V | i \rangle + \sum_n \frac{\langle f | V | n \rangle \langle n | V | i \rangle}{E_i - E_n + i0^+} + \sum_{n,m} \frac{\bar{f} V | n \rangle \langle n | V | m \rangle \langle m | V | i \rangle}{(E_i - E_0 + i0^+) (E - E_m + i0^+)} + \dots$$

La désintégration est un processus irréversible car il y a beaucoup plus d'état désintégré qu'autrement  $\implies \Delta S > 0$

$$d\Gamma = 2\pi |M_{fi}|^2 \frac{d^3 P_2}{(2\pi^3)} \frac{d^3 P_3}{(2\pi^3)} \dots \frac{d^3 P_N}{(2\pi^3)} \delta(E_1 - E_2 - E_3 - \dots - E_N)$$

$$M_{fi} = \mathcal{M} \delta_{\mathbf{p}_1 - \mathbf{p}_2 - \dots}$$

$$\implies d\Gamma = 2\pi |\mathcal{M}_{fi}|^2 (2\pi)^2 \delta(\mathbf{p}_1 - \mathbf{p}_2 - \dots - \mathbf{p}_N) \delta(E_1 - E_2 - \dots - E_N) \frac{d^3 P_2}{(2\pi^3)} \frac{d^3 P_3}{(2\pi^3)} \dots \frac{d^3 P_N}{(2\pi^3)}$$

$$= (2\pi)^4 \delta^4(p_1 - p_2 - p_3 - \dots - p_N) |\mathcal{M}_{fi}|^2 \frac{d^3 P_2}{2E_2 (2\pi)^3} \frac{d^3 P_n}{2E_n (2\pi)^3} \frac{1}{2E_1} \quad \text{N.C. N.R.}$$

La normalisation relativiste implique que le taux de transition est un invariant relativiste.

## Désintégration à deux corps

$$d\Gamma = |M_{fi}|^2 \frac{1}{2E_1} \frac{dp_2}{(2\pi)^3 2E_2} \frac{d^3 P_3}{(2\pi)^3 2E_3} (2\pi)^4 \delta^4(p_1 - p_2 - p_3)$$

## Référentielle de la particule 1

$$E_1 = m_1$$

intègre sur  $d^3 p_3 \rightarrow \delta(\mathbf{p}_1 \overset{0}{\leftarrow} \mathbf{p}_2 - \mathbf{p}_3)$

$$\mathbf{p}_3 \rightarrow -\mathbf{p}_2$$

$$d^3 p = p^2 dp d\Omega$$

$$\Gamma = \frac{1}{8\pi m_1} \int p^2 dp |M_{fi}|^2 \frac{\delta(m_1 - \sqrt{p^2 + m_2^2} - \sqrt{p^2 + m_3^2})}{\sqrt{\sqrt{p^2 + m_2^2} + \sqrt{p^2 + m_3^2}}}$$

Nouvelle variable d'intégration  $E = \sqrt{p^2 + m_2^2} \sqrt{p^2 + m_3^2}$

$$\Gamma = \frac{1}{8\pi m_1} \int_{m_2+m_3}^{\infty} dE \frac{p}{E} \delta(m_1 - E) |M_{fi}|^2 = \frac{1}{8\pi m_1^2} |M_{fi}|^2 \Big|_{E=m_1} |\mathbf{p}_2|$$

$$(m_1 > m_2 + m_3)$$

Loi exponentielle

$N(t)$  : Nombre de particules

$$N(t + dt) = N(t) - N\Gamma dt$$

$$\frac{dN}{dt} = -\Gamma N \rightarrow N(t) = N(0)e^{-\Gamma t}$$

vie moyenne :  $\tau \equiv \frac{1}{\Gamma}$

demi-vie :  $t_{1/2} = \tau \ln 2$

$$\tau \Delta E \sim 1$$

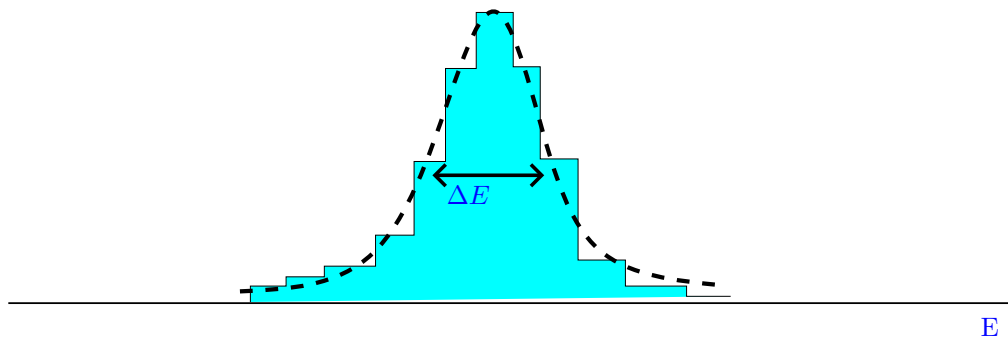


FIGURE 3 – histogramme avec pic

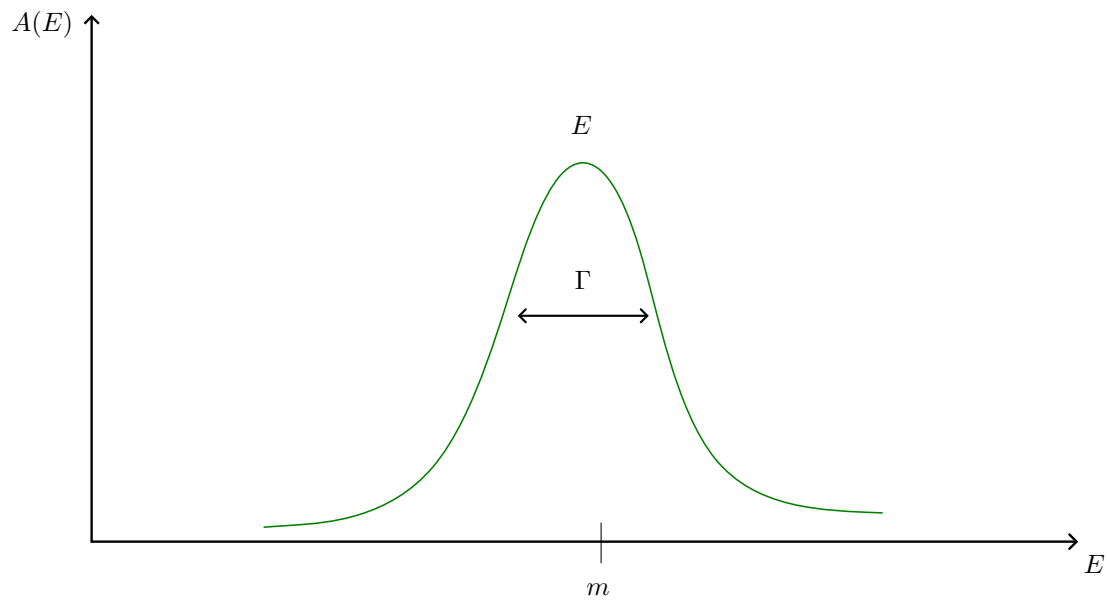


FIGURE 4 – blip bloup

$$A(E) = \frac{1}{2\pi} \frac{\Gamma}{(E - m^2)^2 + \frac{\Gamma^2}{4}}$$

## Section Efficace : Brève révision

$$\Phi : \text{Flux} \quad \frac{\# \text{ de particules}}{\text{surface} \cdot \text{temps}}$$

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \text{Section différentiable}$$

$$\sigma = \int d\Omega \frac{d\sigma}{d\Omega} = \text{Section efficace}$$

## Section différentielle de diffusion

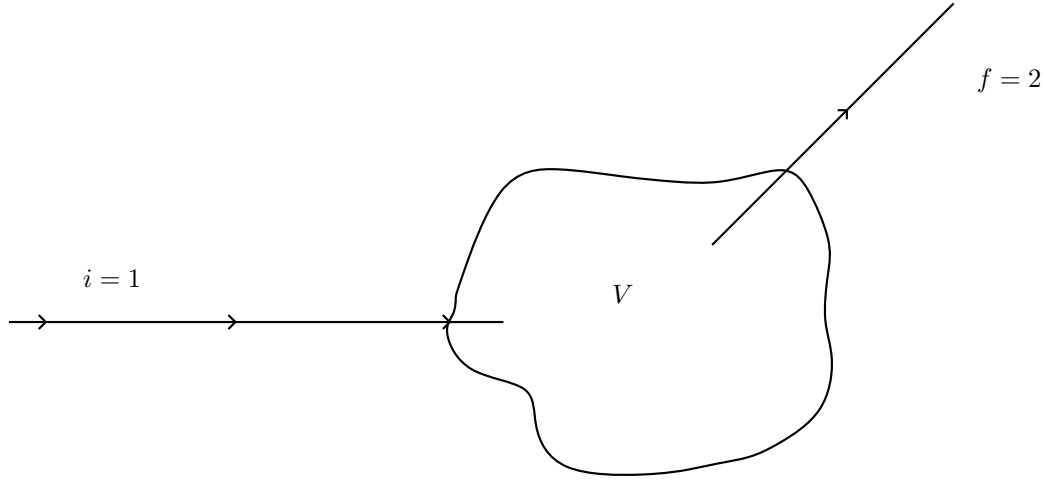


FIGURE 1 – diffusion par un potentiel fixe

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{1}{\Phi} \frac{d\Gamma}{d\Omega}$$

$$\Gamma = 2\pi \frac{1}{\nu} \int \frac{d^3 P_f}{(2\pi)^3} |M_{fi}|^2 \delta(E_2 - E_1)$$

L'intégrale deviens, en coord sphérique :

$$\frac{1}{\nu} \int \frac{p_2^2 dp_2 d\Omega}{(2\pi)^3}$$

Non relativiste :  $E_2 = \frac{p_2^2}{2m}$

$$dE_2 = \frac{p_2}{m} dp_2$$

$$\frac{d\Gamma}{d\Omega} = \frac{1}{(2\pi)^3} \nu \int |M_{fi}|^2 p_2 m dE_3 \delta(E_2 - E_1) = \frac{1}{(2\pi)^3} \nu |M_{fi}|^2 |\mathbf{p}| m$$

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \left(\frac{m}{2\pi}\right)^2 \nu^2 |M_{fi}|^2$$

$$\text{Flux} : \rho \underbrace{v}_{\text{vitesse} = \frac{|\mathbf{p}|}{m}}$$

$$M_{fi} = \langle f | V | i \rangle = \langle \mathbf{p}_2 | V | \mathbf{p}_1 \rangle = \int d^3r \langle \mathbf{p}_2 | \mathbf{r} \rangle V(\mathbf{r}) \langle \mathbf{r} | \mathbf{p}_1 \rangle$$

$$= \frac{1}{\nu} \int d^3r e^{-i(\mathbf{p}_2 - \mathbf{p}_1) \cdot \mathbf{r}}$$

$$= \frac{1}{\nu} \tilde{V}(\underbrace{\mathbf{p}_2 - \mathbf{p}_1}_{\mathbf{q} = \text{transfert de } p})$$

$$\boxed{\frac{d\sigma}{d\Omega} = \left(\frac{m}{2\pi}\right)^2 |\tilde{V}(\mathbf{q})|^2}$$

Exemple : Loi de Coulomb

$$V(\mathbf{r}) = \frac{e_1 e_2}{4\pi r}$$

$$\nabla^2 \phi = -\delta(\mathbf{r}) \quad \phi(\mathbf{r}) = \frac{1}{4\pi r}$$

$$-\mathbf{q}^2 \tilde{\phi}(\mathbf{q}) = -1 \rightarrow \tilde{\phi}(\mathbf{q}) = \frac{1}{|\mathbf{q}|^2}$$

$$\mathbf{q}^2 = \dots 4 = \mathbf{p}^2 \sin^2 \frac{\theta}{2}$$

$$\frac{d}{d\Omega} = \left(\frac{m e_1 e_2}{8\pi p^2}\right)^2 \text{cosec}^4 \frac{\theta}{2}$$

$$\sigma = \int d\Omega \frac{d}{d\Omega} \rightarrow \infty$$

distribution de charge

$$V(\mathbf{r}) = \frac{e_1 e_2}{4\pi r} \rightarrow \frac{e_1 e_2}{4\pi r} \int d^3r' \frac{\rho(\mathbf{r}')}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|}$$

c'est une convolution !

$$\tilde{V}(\mathbf{q}) = \frac{1}{|\mathbf{q}|^2} \tilde{\rho}(\mathbf{q})$$

On obtiens donc un simple facteur de correction

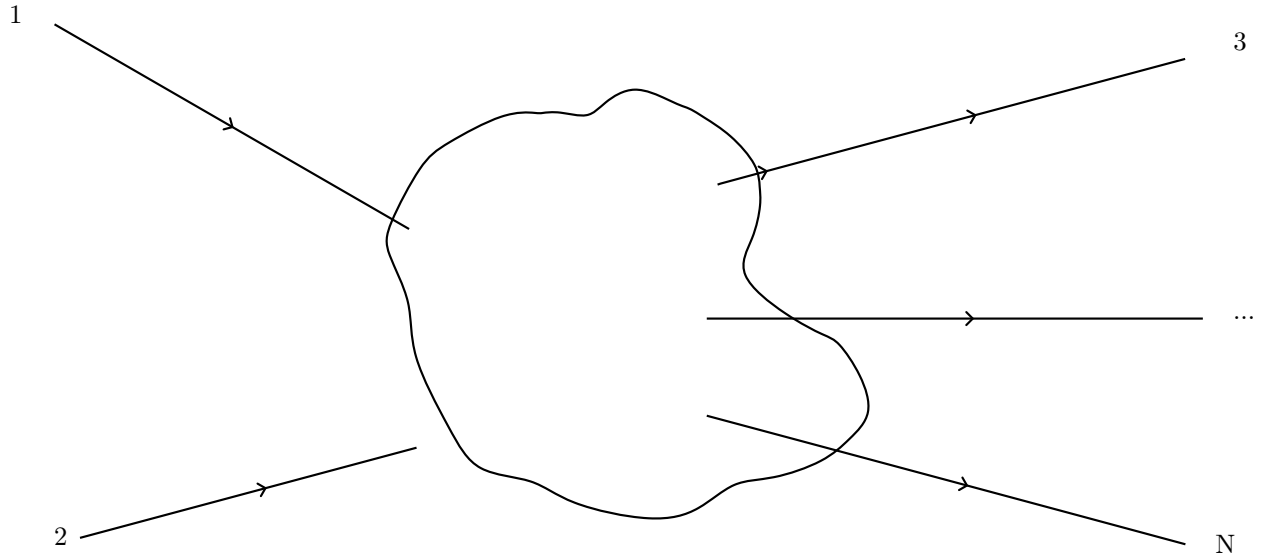


FIGURE 2 – diffusions à plusieurs particules

### Diffusion à plusieurs particules

$$d\Gamma = |\mathcal{M}_{fi}|^2 \frac{d^3P}{(2\pi)^3} (2\pi)^4 \delta^4(p_{1+p_2} - p_3 - p_4 - \cdots - p_N) \quad [\text{N.C.}]$$

$$\text{NC} \rightarrow \text{NR} \quad |\mathbf{p}\rangle_{\text{NC}} = \frac{1}{\sqrt{2E}} |\mathbf{p}\rangle_{\text{NR}}$$

$$d\sigma = |\mathcal{M}_{fi}|^2 \frac{E_1}{|\mathbf{p}|} \frac{d^3p_3}{(2\pi)^3} \cdots$$

On veut trouver une quantité qui est égale à  $\mathbf{p}_1$  dans le référentiel du laboratoire mais est aussi un invariant

$$\left( \underbrace{\mathbf{p}_1}_{(E_1, \mathbf{p}_1)} \cdot \underbrace{\mathbf{p}_2}_{(m_2, \mathbf{0})} \right)^2 - (m_1 m_2)^2$$

$$E_1^2 m_2^2 - m_1^2 m_2^2 = (E_1^2 - m_1^2) m_2^2 = \mathbf{p}_1^2 m_1^2 (m_2, \mathbf{0})$$



$$d = |\mathcal{M}_{fi}|^2 \frac{1}{4\sqrt{(p_1 p_2)^2 - (m_1 m_2)^2}} \frac{d^3 p_2}{2E_3 (2\pi)^3} \cdots (2\pi)^4 \delta(p_1 + p_2 - p_3 - \cdots - p_N)$$

## Résonances & masse invariante

Masse invariante de  $N$  particules

$$M^2 = \underbrace{(p_1 + p_2 + \cdots + p_N)^2}_{p_{\text{tot}}^2} = (E_1 + \cdots + E_n)^2 - (\mathbf{p}_1 + \mathbf{p}_2 + \cdots + \mathbf{p}_N)^2$$

$$\rho(E) = \frac{1}{2\pi} \frac{\Gamma}{(E - M)^2 + \left(\frac{\Gamma}{2}\right)^2}$$

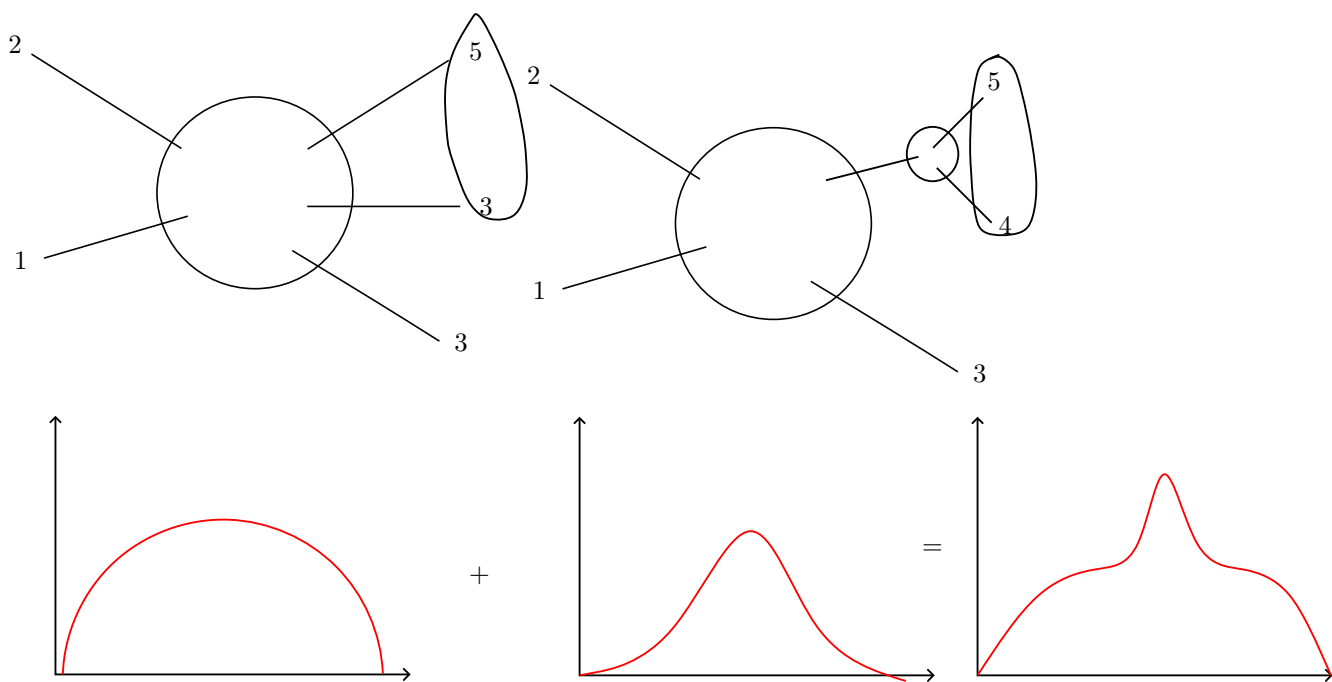


FIGURE 3 – Désintégration 2

## Chaîne de masse $\mu$

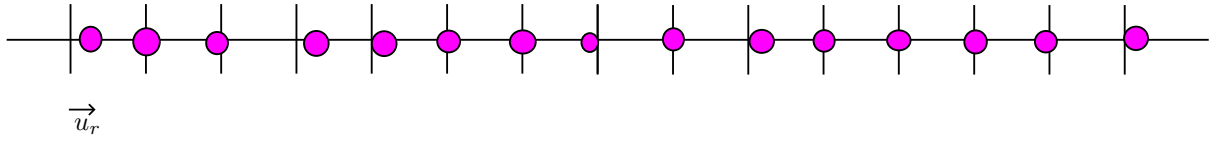


FIGURE 4 – Chaîne de masse

$$\mathcal{L} = \frac{1}{2}\mu \sum_{r=1}^N \left\{ \dot{u}_r^2 - \Omega^2 u_r^2 - \Gamma^2 (u_r - u_{r+1})^2 \right\}$$

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{u}_r} - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial u_r} = 0$$

On tourne la manivelle :

$$\omega_q = \sqrt{\Omega^2 + 2\Gamma^2(1 - \cos q)}$$

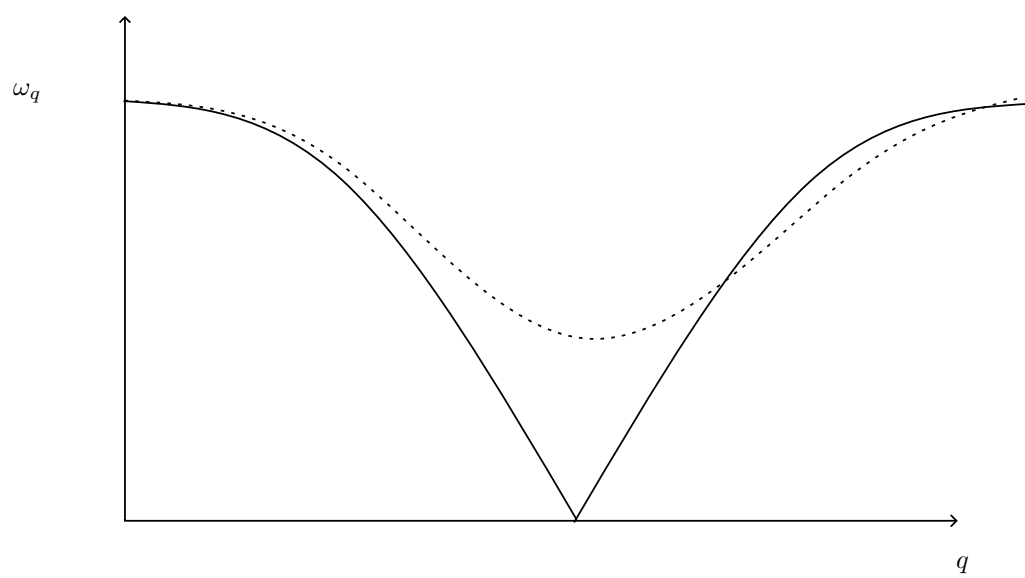


FIGURE 5 – relation de dispersion

2022-09-15

## Accélérateur et détecteur de particules

### Sources naturelles

Avant les collisionneurs, on utilisait des sources naturelles de particules

- rayons  $\alpha, \beta, \gamma$ 
  - noyaux instables
- $\sim 100 - 200 \text{ keV}$ . (*Max de quelques MeV*)
- rayons cosmiques
  - énergie jusqu'à  $10^{19}$  eV mais incontrôlables
  - surtout des protons
  - pas de consensus sur les origines

### Générateur de Cockroft-Walton

- AC  $\rightarrow$  DC
- Initialement utilisé comme accélérateur
- Encore utilisé comme premier stage
- max 1 MeV
- Courant dans les appareils à rayons X

### Générateur van de Graaf

10-20 MeV avec pression de gaz inerte

### Accélérateur tandem

(Accélérer en attirant puis en repoussant) 30 à 40 MeV

### Accélérateurs linéaires (LINAC)

- Utilisé dans tous les complexes comme injecteurs
- Peu de pertes radiatives
- SLAC (Stanford)  $\sim 50 \text{ GeV}$  ( $e^-$ )

### Cavité accélératrice

Cavité en Mode TM

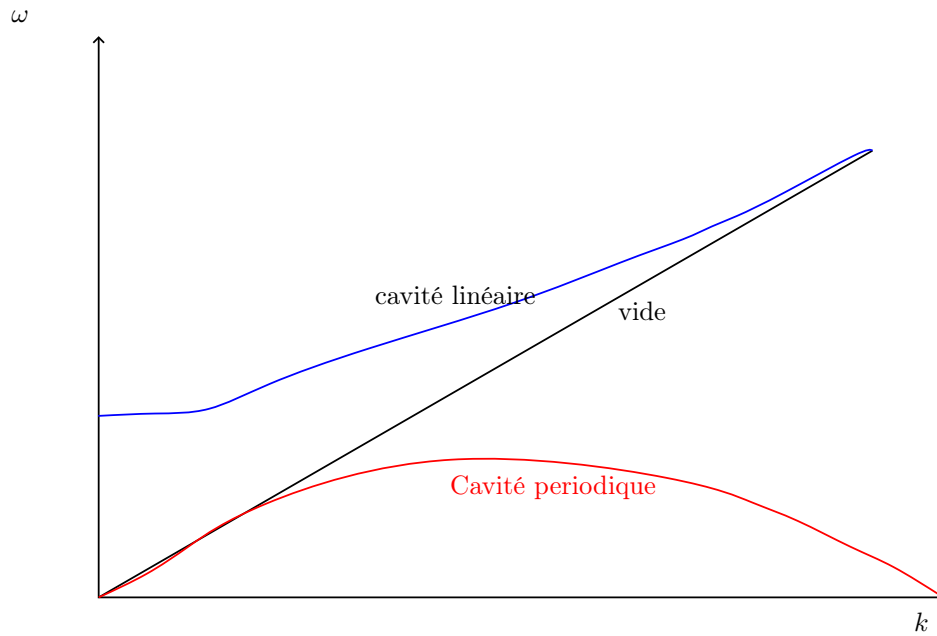


FIGURE 1 – relations de dispersion

## Pertes radiatives

100 MeV par tours

## Cyclotron

Principe de l'indépendce de la fréquence vs Énergie

Ne marche plus dans le domaine relativiste

$$\gamma \sim 1.5$$

## Syncotrons

Éléments discrets

- aiment dipolaire
- aiment quadripolaire
- cavité EM.

Champ  $B$  et fréquence sont ajustés.

## Focalisaton Magnétique

On peut focaliser un flux de particules avec des quadrupoles magnétiques alternants.

## Collisionneurs

Deux faisceaux de sens opposés.

Maximise l'énergie disponible lors de la création de particules

## Pertes par ionisation des particules chargées

Formule de Bethe

## Absorption des rayons gamma

- Compton
- Photoélectrique
- Pair

## Chambre à fils

## Scintillateur

## Détecteurs à état solide

## Laboratoires

---

## Diffusion de Neutron de basse énergie (1KeV)

Le neutron est incident sur un noyau de rayon de 5fm

$$\frac{d}{d\Omega} \left| \tilde{V}(\mathbf{q}) \right|^2$$

$$\boxed{\mathbf{q}^2 = 4\mathbf{p}^2 \sin^2 \frac{\theta}{2}}$$

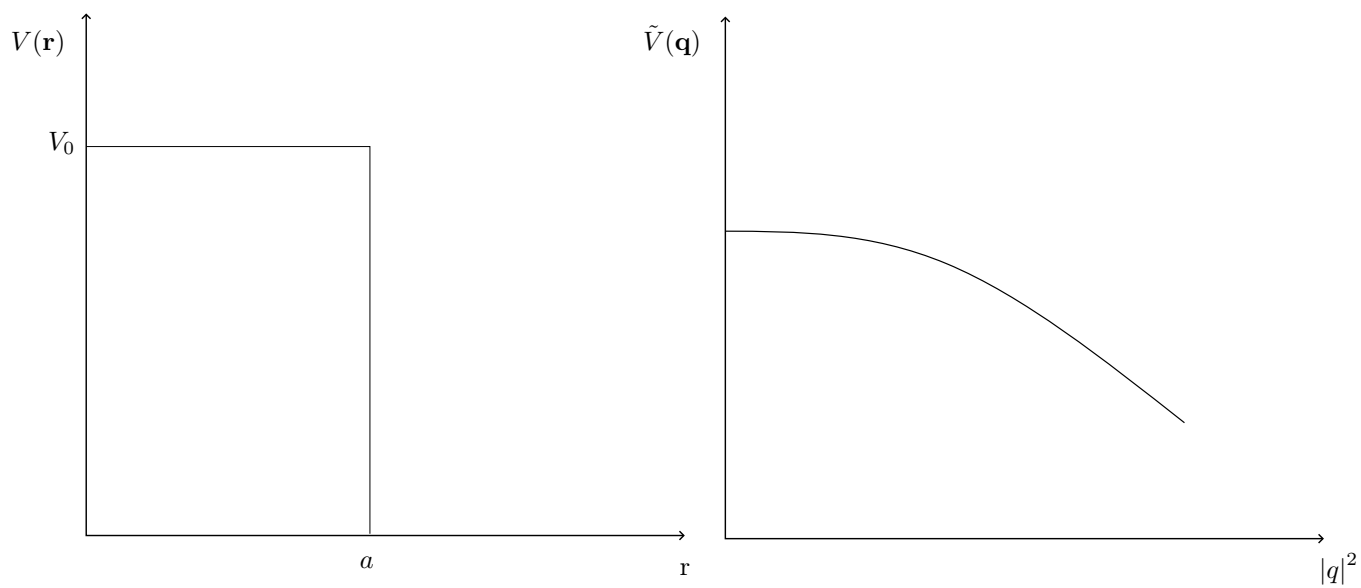


FIGURE 2 – potentiel

$$\tilde{V}(\mathbf{q}) = \int d^3r v(\mathbf{r}) e^{-i\mathbf{q} \cdot \mathbf{r}} \propto a^3 f(x)$$

$$x = |\mathbf{q}|a \quad \text{sans unités}$$

le maximum de  $q$  est de  $2pa$  ? vraiment pas sur

$$2a\sqrt{2m_n T_n} = 2 \cdot 5\text{fm} \sqrt{2 \cdot 939\text{MeV} \cdot 0.001\text{MeV}} / (197\text{MeV} \cdot \text{Fm}) \approx 0.07$$

Puisque  $a$  est petit,  $V(\mathbf{r})$  est *piqué* et donc  $\tilde{V}$  est presque constant .

2022-09-19

## Retour

### Chaîne de masse

$$L = \frac{1}{2}\mu \sum_{r=1}^N \left\{ \dot{u}_r^2 - \Omega^2 u_r^2 - \Gamma^2 (u_r - u_{r+1})^2 \right\}$$

$$U_i = A e^{i(qr - \omega t)}$$

$$\omega_q = \sqrt{\Omega^2 + 2\Gamma^2 (1 - \cos q)} = \sqrt{\Omega^2 + 4\Gamma^2 \sin^2 \frac{q}{2}}$$

Limite continue

$$ra \rightarrow x, u_r \rightarrow u(x), u_{r+1} - u_r \rightarrow a \partial_x u, \sum_r \rightarrow \int dx/a, \phi(x) = \sqrt{\frac{mu}{\omega}} u(x)$$

On a donc

$$L = \frac{1}{2}\mu \int_0^\ell dx \frac{1}{a} \left[ \dot{u}^2 - \Omega^2 u^2 - \Gamma^2 a^2 (\partial_x u)^2 \right]$$

$$L = \frac{1}{2} \int_0^t dx \left[ \dot{\phi}^2 - \Omega^2 \phi^2 - c^2 (\partial_x \phi)^2 \right]$$

On définit la densité lagrangienne telle que

$$L = \int dx \mathcal{L}$$

$$\mathcal{L} = \frac{1}{2} \left( \dot{\phi}^2 - \Omega^2 \phi^2 - c^2 (\partial_x \phi)^2 \right)$$

Équations de Lagrange :

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + \Omega^2 u - a^2 \Gamma^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = 0$$

$$\implies \sqrt{m^2 c^4 + c^2 p^2} \quad p := \frac{q}{a} \quad m := \frac{\Omega}{c^2}$$



## Hamiltonien

$$H = \sum_r p_r \dot{u}_r - L$$

Dans le cas quasi-continu on a

$$L = \sum_r a \mathcal{L}(\phi(x_r), \dot{\phi}(x_r))$$

Le moment conjugué est alors

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{\phi}} = a \pi(x_r) \quad \text{où} \quad p_r = \frac{\partial L}{\partial \dot{u}_r}$$

$$[\phi(x_r), \pi(x_s)]_p = \frac{1}{a} \delta_{rs}$$

donc, pour un système continue

$$[(x), \pi(x')]_p = \delta(x - x')$$

donc

$$H = \sum_r a \pi(x_r) \dot{\phi}(x_r) - L = \int dx \left( \pi(x) \dot{\phi}(x) - \mathcal{L} \right)$$

On peut donc le représenter comme

$$H = \int dx \mathcal{H} \quad \text{où} \quad \mathcal{H} = \pi(x) \dot{\phi}(x) - \mathcal{L}$$

## Généralisation à trois dimensions

$$L = \frac{1}{2} \int d^3r \left\{ \dot{\phi}^2 - \Omega^2 \phi^2 - c^2 (\nabla \phi)^2 \right\}$$

L'équation de Lagrange deviens alors

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} + \Omega^2 \phi - c^2 \nabla^2 \phi = 0$$

$$H = \int d^3x \mathcal{H}$$

$$H = \int d^3\mathbf{r} \left( \pi(\mathbf{r}) \dot{\phi}(\mathbf{r}) - \mathcal{L} \right)$$

$$\boxed{[\phi(\mathbf{r}), \pi(\mathbf{r}')]_p = \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}')}$$

## Action

$$S=\int \mathrm{d}^4x\left(\partial_\mu\phi\partial^u\phi-m^2\phi^2\right)$$

## Équation de continuité

$$\boxed{\frac{\partial P}{\partial t}+\boldsymbol{\nabla}\cdot\mathbf{J}=0}$$

shro

$$i\frac{\partial \psi}{\partial t}=-\frac{1}{2}\nabla^2\psi$$

$$P=|\psi|^2$$

$$\mathbf{J}=\frac{1}{2m}\left(\psi*\boldsymbol{\nabla}\psi-\psi\boldsymbol{\nabla}\psi^*\right)$$

$$\frac{\mathrm{d}P}{\mathrm{d}t}=\psi^*\dot{\psi}-\dot{\psi}^*\psi$$

$$\boldsymbol{\nabla}\mathbf{J}=\frac{1}{2m}\left\{\cdots\right\}$$

$$\tfrac{1}{2}\psi^*(0)+(0)\psi$$

L'équation de Klein-Gordon n'as pas cette propriété

Cette dernière conserve bien le quadri-courrant mais  $J^2=p\not=0$

## Théorie des champs quantique

Classique  $\rightarrow$  Quantique

$$[A, B]_p \rightarrow \frac{1}{i\hbar} [\hat{A}, \hat{B}]$$

$$L = \int d^3r \mathcal{L} = \int d^3r \left\{ \dot{\phi}^2 - m^2 \phi^2 - (\nabla \phi)^2 \right\}$$

$$H = \int d^3r \left\{ \pi(\mathbf{r}) + m^2 \phi^2 + (\nabla \phi)^2 \right\} \quad \text{où} \quad \pi(\mathbf{r}) = \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{\phi}}$$

$$[\phi(\mathbf{r}), \pi(\mathbf{r}')]_p \xrightarrow{M.Q.} [\phi(\mathbf{r}), \pi(\mathbf{r}')] = i\delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}') \quad \hbar = 1$$

On introduit un transformé de Fourier pour profiter de la symétrie de translation :

$$\phi(\mathbf{r}) = \frac{1}{\nu} \sum_{\mathbf{p}} \phi_{\mathbf{p}} e^{i\mathbf{p} \cdot \mathbf{r}} \quad , \quad \phi_{\mathbf{p}} = \int d^3r \phi(\mathbf{r}) e^{-i\mathbf{p} \cdot \mathbf{r}}$$

L'opérateur, une fois passé dans la TF, n'est plus hermitien. Sa conjugaison hermitien préserve quand même une expression simple :

$$\phi^\dagger(\mathbf{r}) = \phi(\mathbf{r}) \quad \phi_{\mathbf{p}^\dagger} = \phi_{-\mathbf{p}}$$

Pareil pour  $\pi$

$$\pi^\dagger(\mathbf{r}) = \pi(\mathbf{r}) \quad \pi_{\mathbf{p}^\dagger} = \pi_{-\mathbf{p}}$$

$$H = \frac{1}{2} \int d^3r \frac{1}{\nu^2} \sum_{\mathbf{p}, \mathbf{p}'} \left\{ \pi_{\mathbf{p}} \pi_{\mathbf{p}'} e^{i(\mathbf{p} \cdot \mathbf{p}')} + \dots \right\}$$

L'intégrale sur les exponentielles donne des  $\delta(p - p')$

$$H = \frac{1}{2} \frac{1}{\nu} \sum_{\mathbf{p}} \left\{ \pi_{\mathbf{p}} \pi_{-\mathbf{p}} + (m^2 - \mathbf{p}^2) \phi_{\mathbf{p}} \phi_{-\mathbf{p}} \right\}$$

$$H = \frac{1}{2} \frac{1}{\nu} \sum_{\mathbf{p}} \left\{ \pi_{\mathbf{p}}^\dagger \pi_{\mathbf{p}} + \omega_p^2 \phi_{\mathbf{p}}^\dagger \phi_{\mathbf{p}} \right\}$$

$$[\phi_{\mathbf{p}}, \pi_{\mathbf{p}'}] = \int d^3r d^3r' e^{-i(\mathbf{p} \cdot \mathbf{r} + \mathbf{p}' \cdot \mathbf{r}')} [\phi(r), \pi(r')] = \dots = i\nu \delta_{\mathbf{p}, -\mathbf{p}'}$$

$$[\phi_{\mathbf{p}}, \phi_{\mathbf{p}'}] = 0 \quad [\pi_{\mathbf{p}}, \pi_{\mathbf{p}'}] = 0$$

On introduit alors

$$a_{\mathbf{p}} = \sqrt{\frac{\omega_{\mathbf{p}}}{2\nu}} \left( \phi_{\mathbf{p}} + i \frac{\pi_{\mathbf{p}}}{\omega_{\mathbf{p}}} \right) \quad a_{\mathbf{p}}^{\dagger} = \sqrt{\frac{\omega_{\mathbf{p}}}{2\nu}} \left( \phi_{\mathbf{p}}^{\dagger} - i \frac{\pi_{\mathbf{p}}^{\dagger}}{\omega_{\mathbf{p}}} \right)$$

$$[a_{\mathbf{p}}, a_{\mathbf{q}}^{\dagger}] = \dots = \delta_{p,q}$$

$$H = \sum_{\mathbf{p}} \omega_{\mathbf{p}} \left( a_{\mathbf{p}}^{\dagger} a_{\mathbf{p}} + \frac{1}{2} \right)$$

## QFT : champ scalaires avec interaction

$$L = \frac{1}{2} < mu \sum_{r=1}^N \left\{ \dot{u}_r^2 - \Omega^2 u_r^2 - \Gamma^2 (u_r - u_{r+1})^2 - \lambda u_t^3 \right\}$$

C'est un développement à l'ordre 3 et non un résultat exacte

$$H = H_0 + \underbrace{H_1}_{perturbation}$$

$$H_1 = \frac{g}{6} \int dx \phi^3(x) \quad \frac{g}{6} = \lambda \sqrt{\frac{a}{\mu}}$$

$$\boxed{3D \rightarrow H_1 = \frac{g}{6} \int d^3r \phi^3(\mathbf{r})}$$

$$\phi(\mathbf{r}) = \frac{1}{\sqrt{\nu}} \sum_{\mathbf{p}} \frac{1}{\sqrt{2\omega p}} (a_p e^{i\mathbf{p} \cdot \mathbf{r}} + a_p^\dagger e^{-i\mathbf{p} \cdot \mathbf{r}})$$

$$H_1 = \frac{g}{6} \frac{1}{\nu^{3/2}} \int d^3r \sum_{p,p',q} \frac{1}{\sqrt{8\omega_p \omega_{p'} \omega_q}} (a_p e^{i\mathbf{p} \cdot \mathbf{r}} + a_p^\dagger e^{-i\mathbf{p} \cdot \mathbf{r}}) (a_{p'} e^{i\mathbf{p}' \cdot \mathbf{r}} + a_{p'}^\dagger e^{-i\mathbf{p}' \cdot \mathbf{r}}) (a_q e^{i\mathbf{q} \cdot \mathbf{r}} + a_q^\dagger e^{-i\mathbf{q} \cdot \mathbf{r}})$$

On intègre sur  $\mathbf{r}$

$$H_1 = \frac{g}{6} = \frac{1}{2\sqrt{2\nu}} \sum_{p,q} \left\{ \frac{1}{\sqrt{\omega_p \omega_{p-q} \omega_q}} (a_p a_{p-q} a_q + a_q^\dagger a_{p-q}^\dagger a_p^\dagger) + \dots \right\}$$

Tout les termes qui sont une suite d'opérateur de création, créent au total un quantité de mouvement nulle.

Dans les différents termes, on fait des changmenents de variables du type  $q \rightarrow q + p$

$$H_1 = \frac{g}{6} \frac{1}{2\sqrt{2\nu}} \sum_{p,q} \frac{1}{\sqrt{\omega_p \omega_q \omega_{p+q}}} \left[ a_p a_{-p-q} a_q + a_p^\dagger + a_q a_p a_q + a_p a_{p+q}^\dagger a_q + \dots \right]$$

Cette perturbation représente l'interaction entre différente excitation du champ. Des genres de *collisions*. On considère, puisqu'on fait de la théorie des perturbation, que ces collision sont assez peu fréquente et contribuent peu à l'énergie totale.

$$\Gamma_{i \rightarrow f} = 2\pi |M_{fi}|^2 \delta(E_f - E_i)$$

$$M_{fi} = \langle f|H_1|i\rangle + \dots$$

$$|i\rangle = a_{p_1}^\dagger a_{p_2}^\dagger |0\rangle = a_1^\dagger a_2^\dagger |0\rangle$$

$$|f\rangle = a_{p_3}^\dagger a_{p_4}^\dagger |0\rangle = a_3^\dagger a_4^\dagger |0\rangle$$

$\langle f|H_1|i\rangle = 0$  car les états qui n'ont pas le même nombre de particules sont orthogonaux. On doit donc aller au second ordre de perturbation. L'état intermédiaire  $|n\rangle$  permet de créer des particules de manière seulement *temporaire*.

$$M_{fi} = \sum_n \frac{\langle f|H_1|n\rangle \langle n|H_1|i\rangle}{E_1 - E_n}$$

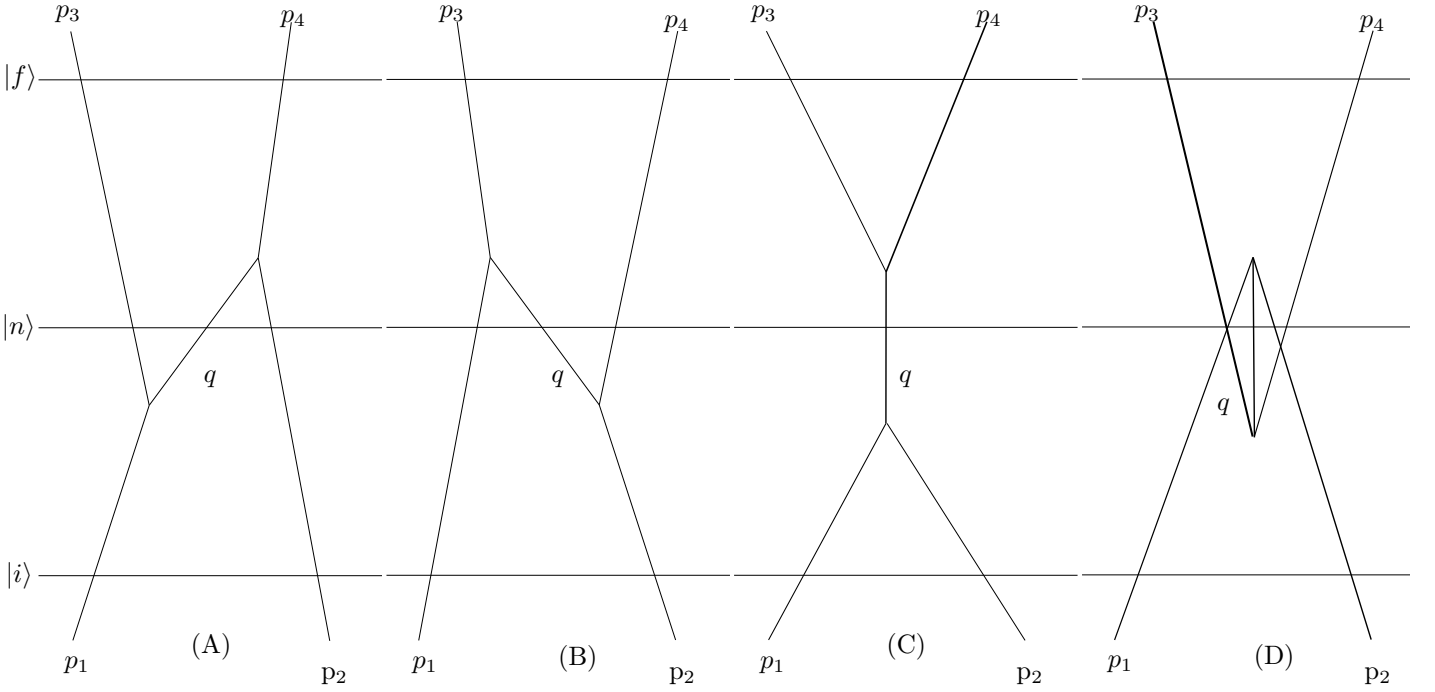


FIGURE 1 – diagramme pas de Feynmann

$$(A) \left\{ \begin{array}{l} \langle n|H_1|i\rangle = \langle 0| a_3 a_2 a_q (a_q^\dagger a_1 a_3^\dagger) a_1^\dagger a_2^\dagger |0\rangle \\ \langle 0| a_p a_p^\dagger |0\rangle = 1 \\ \langle 0| [a_p, a_p^\dagger] + a_p^\dagger a_p |0\rangle \\ \cdot g \frac{1}{\sqrt{8\nu\omega_1\omega_2\omega_3}} \\ \langle f|H_1|n\rangle = \langle 0| a_3 a_4 (a_4^\dagger a_2 a_q) a_3^\dagger a_2^\dagger a_q^\dagger |0\rangle \\ \cdot g \frac{1}{\sqrt{8\nu\omega_2\omega_q\omega_{1-3}}} \\ M^{(A)} = \frac{g^2}{8\nu\sqrt{\omega_1\omega_2\omega_3\omega_4}} \frac{1}{\omega_{1-3}} \frac{1}{\omega_1-\omega_3-\omega_{1-3}} \end{array} \right.$$

Les autres diagramme nous mène presque exactement à la même équation ex :

$$M^{(4)} = \frac{g^2}{8\nu\sqrt{\omega_1\omega_2\omega_3\omega_4}} \frac{1}{\omega_{1-3}} \frac{1}{\omega_1-\omega_3-\omega_{1-3}}$$

Section efficace avec des diagrammes de Feynman

$$\mathcal{M} = g^2 \left\{ \frac{1}{(p_1 - p_3)^2 - m^2} + \frac{1}{(p_1 - p_4)^2 - m^2} + \frac{1}{(p_1 + p_2)^2 - m^2} \right\}$$

Puisque les particules en question sont indiscernables on rajoute un facteur  $\frac{1}{2}$  pour enlever les états comptés en trop

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{1}{2} \frac{|\mathcal{M}|^2}{(8\pi)^2} \frac{|\mathbf{p}_3|}{|\mathbf{p}_1|} \frac{1}{E^2}$$

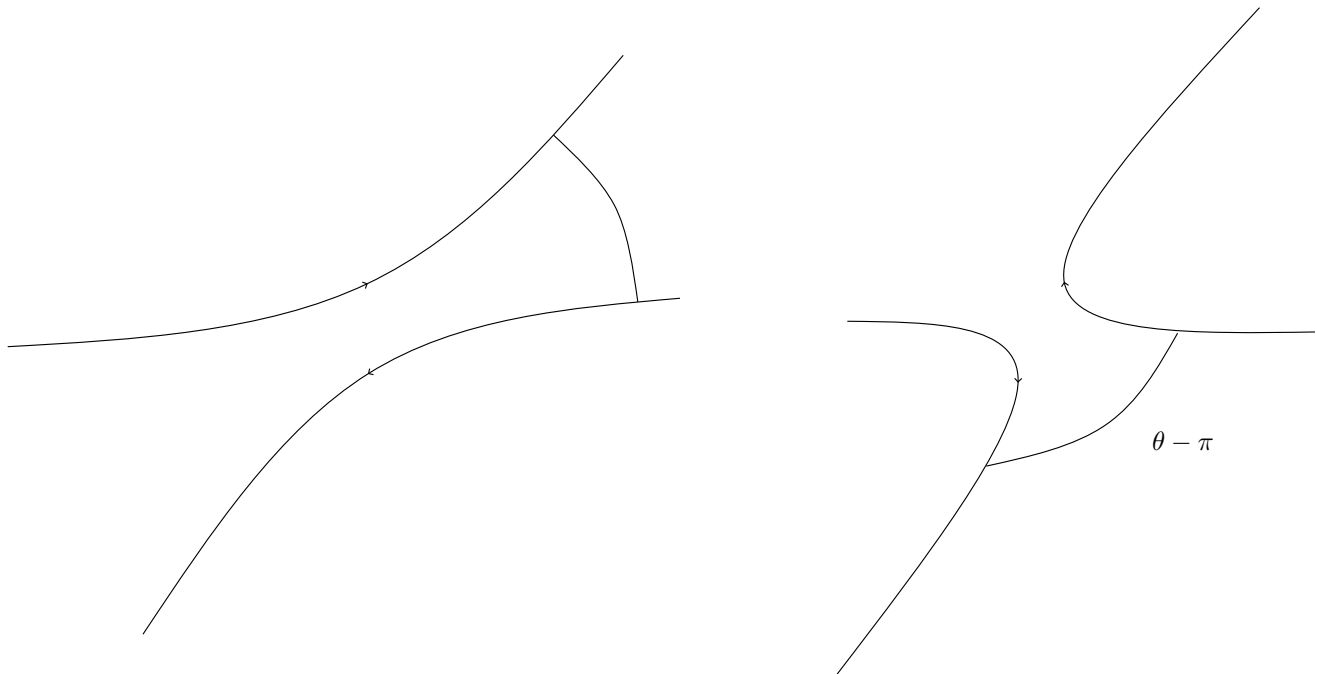


FIGURE 1 – collision

$$\begin{aligned} \mathbf{p}_1 &= p\hat{x} \\ \mathbf{p}_2 &= -p\hat{x} \\ \mathbf{p}_3 &= p\hat{n} \\ \mathbf{p}_4 &= -p\hat{n} \end{aligned}$$

...



$$(p_1 + p_4)^2 = (2E)^2 = 4E^2$$

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{1}{128\pi^2} \frac{1}{\gamma^2} \left( \frac{1}{4(\gamma^2 - 1) \sin^2 \frac{\theta}{2} + 1} + \frac{1}{4(\gamma^2 - 1) \cos^2 \frac{\theta}{2} + 1} + \frac{1}{4\gamma^2 - 1} \right)$$

limite non relativiste ( $\gamma \rightarrow 1$ ) :

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} \rightarrow \frac{g^4}{128\pi^2 m^4} \left( \frac{5}{3} \right)^2$$

Limite ultra relativiste ( $\gamma \gg 1$ ) :

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} \rightarrow \frac{g^4}{128\pi^2 m^2} \frac{1}{\gamma^2} \left( \frac{1}{\sin^2 \theta} - \frac{1}{4} \right)^2$$

On remarque que la probabilité de collision dans la limite ultra relativiste est beaucoup plus faible que dans la limite classique.

## Feynman rules !

1.  $i\mathcal{M}$
2. identifier les particles entrantes et sortantes
3. construire les diagrammes  $\rightarrow N$  vertex (ordre  $N$  en théorie des perturbation)
4. chaque ligne  $\rightarrow$  4-impulsion
5. vertex  $\rightarrow -ig (2\pi)^4 \delta(k_1 + k_2 - k_3)$
6. ligne interne  $\rightarrow \frac{-i}{q^2 - m^2}$
7. intégrer sur les 4-impulsion internes  $\int \frac{d^4 q}{(2\pi)^4}$
8. Amputer le facteur global  $(2\pi)^4 \delta(p_1 + p_2 \cdots - p_n)$

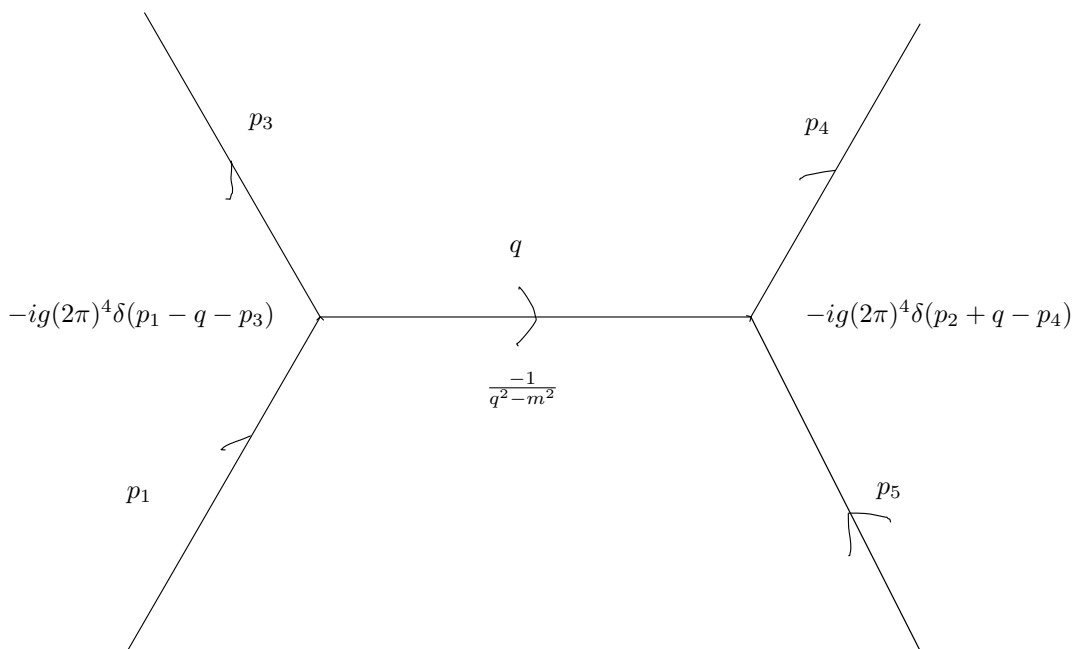


FIGURE 2 – Diagramme

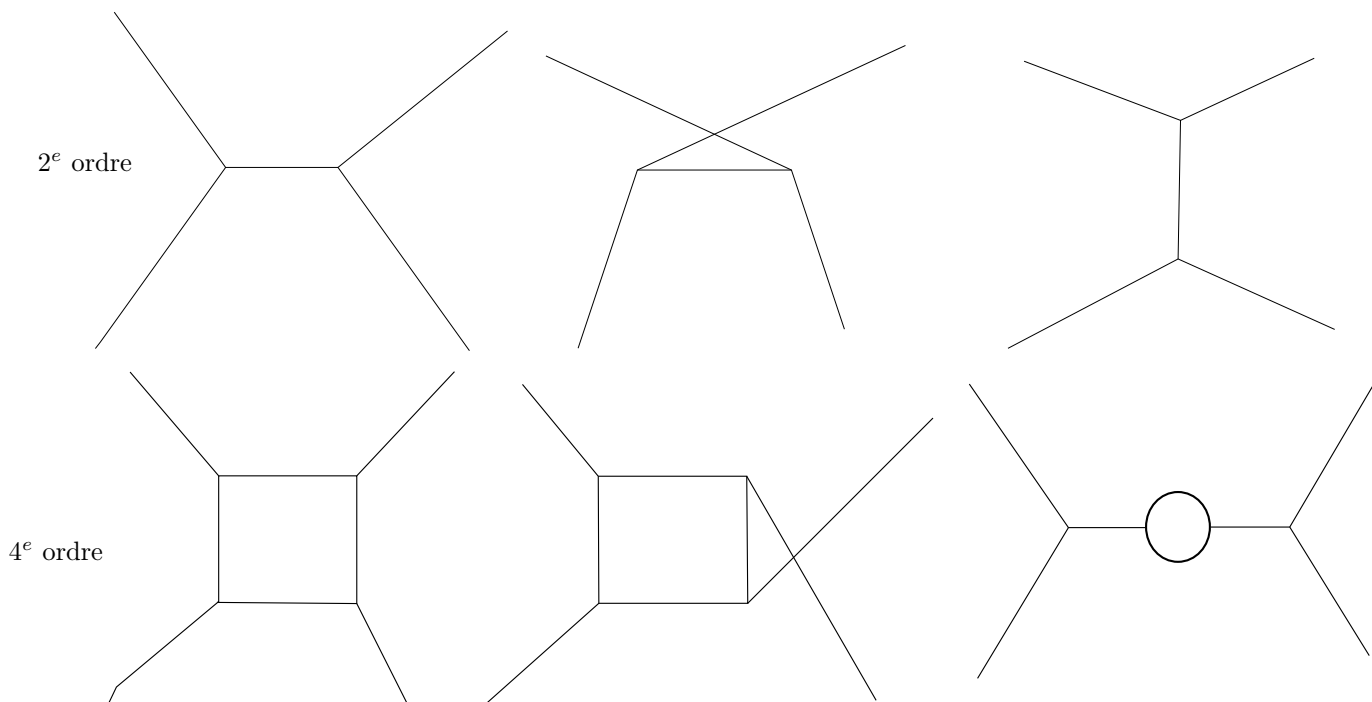


FIGURE 3 – diagrammes

## Potentiel de Yukawa

Le potentiel de Yukawa donne le potentiel généré par des particules virtuelles. Il décroît exponentiellement en fonction de la masse. Cela explique la portée limitée des forces qui utilisent des bosons massifs. La force électromagnétique a une portée infinie car le photon est sans masse.

$$U(r) = -\frac{g}{4\pi} \frac{e^{-mr}}{r}$$

$$\nabla^2 \Phi - \cancel{\partial_t^2} \Phi = -e\delta(\mathbf{r}) \quad \text{Potentiel retardé}$$

$$\nabla^2 \Phi = -e\delta(\mathbf{r}) \rightarrow \Phi(\mathbf{r}) = \frac{e}{4\pi r}$$

spin

$$\Psi = \begin{pmatrix} \psi_{\uparrow} \\ \psi_{\downarrow} \end{pmatrix}$$

rotation :

$$\mathbf{r} \rightarrow \mathbf{r}' = \mathcal{R}(\mathbf{r}, \theta)\mathbf{r}$$

$$\psi(\mathbf{r}) \rightarrow R(\hat{n}, \theta)\psi(\mathbf{r})$$

$$R(\hat{n}, \theta) = \exp\left(i\frac{\theta}{2}\hat{n} \cdot \boldsymbol{\sigma}\right) = \cos\frac{\theta}{2} + i\hat{n} \cdot \boldsymbol{\sigma} \sin\frac{\theta}{2} \quad \boldsymbol{\sigma} = (\sigma_x \quad \sigma_y \quad \sigma_z)$$

$$\psi^\dagger x \rightarrow \text{scalaire}$$

$$\psi^\dagger \boldsymbol{\sigma} x \rightarrow \text{vecteur}$$

## Retour sur les spineurs

On peut montrer que  $\psi^\dagger \vec{\sigma} X$  est un vecteur.

Pour se faire on va transformer que la quantité  $\psi^\dagger \vec{\sigma} \cdot \vec{A}$ , qui devrait être un scalaire, par une rotation.

$$\rightarrow \psi^\dagger R^\dagger \vec{\sigma} R X \cdot \vec{A}$$

$$\psi_i^\dagger X A_i = \psi^\dagger R^\dagger \sigma_i R X \mathcal{R}_{ij} A_j = \psi^\dagger R^\dagger \sigma_j R X \mathcal{R}_{ji} A_i$$

$$\psi^\dagger \sigma_i X = \psi^\dagger R^\dagger \sigma_j R X \mathcal{R}_{ji}$$

$$R \sigma_i R^\dagger = \mathcal{R}_{ji} \sigma_j$$

$$\boxed{R^\dagger \sigma_i R = \mathcal{R}_{ij}}$$

On représente un vecteur à trois composante par un matrice

$$\mathbf{r} = \begin{pmatrix} x & y & z \end{pmatrix}$$

$$X = \vec{r} \cdot \vec{\sigma} = \begin{bmatrix} z & x - iy \\ x + iy & -z \end{bmatrix}$$

$$\text{tr } X = 0 \quad \det X = -\mathbf{r}^2$$

alors

$$X' = R \sigma_i R^\dagger x_i = R X R^\dagger$$

On fait maintenant la même chose pour des 4-vecteurs.

$$X(x) = \begin{bmatrix} x^0 - x^3 & -x^1 + ix^2 \\ -x^1 - ix^2 & x^0 + x^3 \end{bmatrix} = x^0 \mathbb{1} - x^3 \sigma_3 - x^1 \sigma_1 - x^2 \sigma_2 = x_\mu \sigma^\mu$$

$$\det X = x_\mu x^\mu$$

$$\det X = \det X' \quad X = N^\dagger X' N \quad \det N = 1$$

$$\det X = \det X'$$

On a deux contraintes sur 8 degrés de liberté (4 degrés complex) et on impose deux contraintes sur les determinant. On a donc 6 degrés de liberté qui correspondent à ceux des transformation de Lorentz.

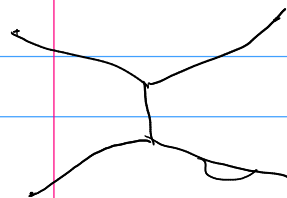
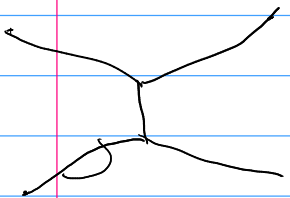
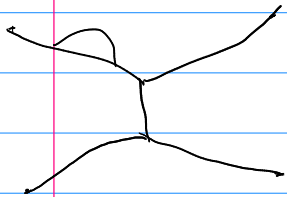
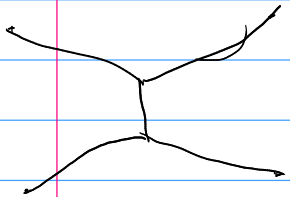
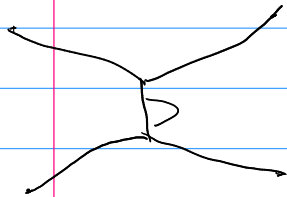
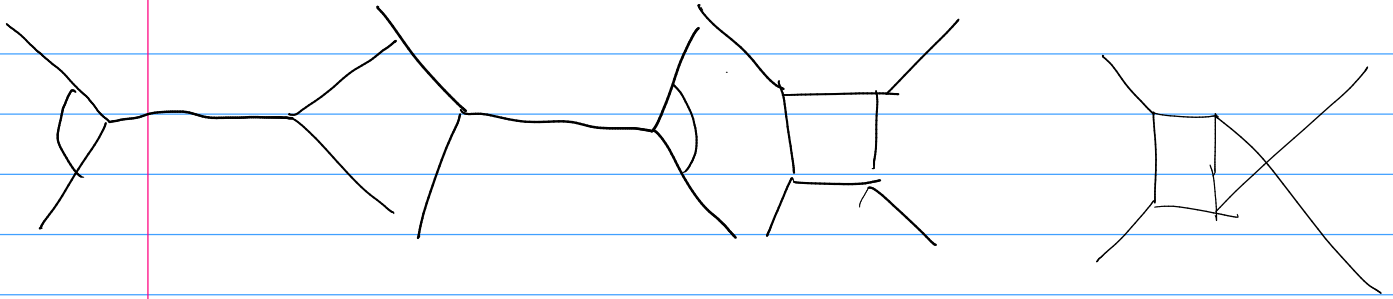
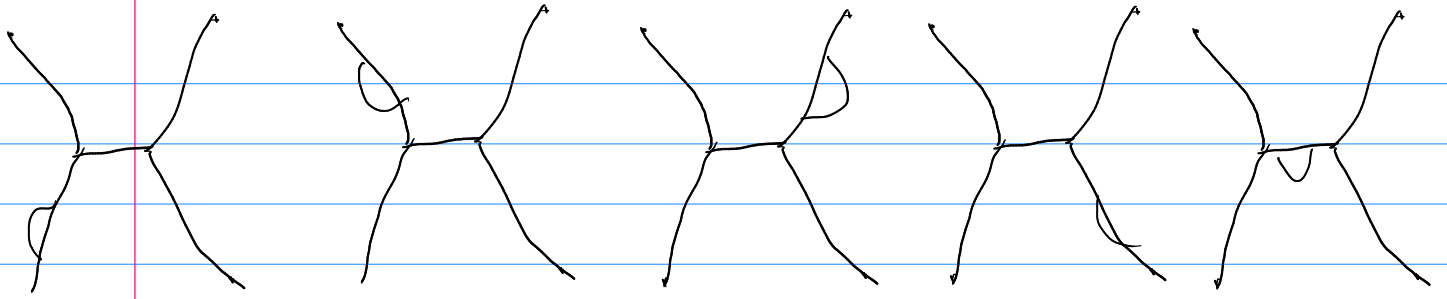
$$\begin{aligned} x'^\nu &= \Lambda_\nu^\mu x^\mu \\ x'_\mu &= \Lambda_\mu^\nu x_\nu = (\Lambda^{-1})_\mu^\nu x_\nu \\ X' &= x'_\mu \sigma^\mu = \Lambda_\mu^\nu x_\nu \sigma^\mu \\ &\dots \end{aligned}$$

$$\boxed{N^\dagger \sigma^\mu N = \Lambda_\nu^\mu \sigma^\nu}$$

C'est vrai pour un définition de type 1, pour le type 2 (avec les +) on aurait

$$M^\dagger \tilde{\sigma}^\mu M = \Lambda_\nu^\mu \sigma^\nu$$


---



## Théorie en $\phi^4$

$$\mathcal{L} = \frac{1}{2} \partial_\mu \phi \partial^\mu \phi - \frac{1}{2} m^2 \phi^2 - \frac{g}{4!} \phi^4$$

Le premier ordre en énergie ne s'annule pas, c'est donc plus simple

$$H_1 = \frac{g}{4!} \int d^3v r \phi^4 (a + a^\dagger) (a + a^\dagger) (a + a^\dagger) (a + a^\dagger)$$

$$M_{fi} = \langle f | H | i \rangle = g$$

2022-31-06

## spineurs

$$x = \begin{pmatrix} x^0 - x^3 & -x^1_x x^3 \\ -x^1 - ix^2 & x^0_x \end{pmatrix} = x^\mu_\mu \quad \sigma^\mu = (\mathbb{1}, \sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)$$

$$N^\dagger X' N = X \quad \det N = 1$$

On peut aussi écrire  $X$  comme

$$X = x_\mu \tilde{\sigma}^\mu \quad \tilde{\sigma}^\mu = (\mathbb{1}, -\vec{\sigma})$$

$$R(\mathbf{n}, \theta) = \cos \frac{\theta}{2} + \mathbf{n} \cdot \boldsymbol{\sigma} \sin \frac{\theta}{2}$$

$$P(\hat{v}, \eta) = \cosh \frac{\eta}{2} + \sinh \frac{\eta}{2}$$

$$N = PR$$

$$M = P^{-1}R$$

$$N^\dagger \sigma^\mu N = \Lambda^\mu_\nu \sigma^\nu$$

$$M^\dagger \tilde{\sigma}^\mu M = \Lambda^\mu_\nu \tilde{\sigma}^\nu$$

$$\psi'_R = N \Psi_R$$

$$\psi'_L = M \psi_L$$

### Champs spinoriels

$$\psi_L^\dagger \tilde{\sigma}^\mu \partial_\mu \psi_L \rightarrow \dots$$

On essaie de construire une action à partir des ces nouveau champs

$$i\psi_L^\dagger \tilde{\sigma}^\mu \psi_L \quad i\psi_R^\dagger \sigma^\mu \psi_R$$

$$S = i \int d^4x \psi_L^\dagger \tilde{\sigma}^\mu \partial_\mu \Psi_L$$



$$S^* = -i \int d^4x \left( \psi_L^\dagger \tilde{\sigma}^\mu \partial_\mu \psi_L \right)^\dagger = -i \int d^4x \partial_\mu \psi^\dagger \sigma^\mu \psi_L = -i \int d^4x \left\{ \partial_\mu \left( \psi_L^\dagger \tilde{\sigma}^\mu \psi_L \right) - \psi_L^\dagger \tilde{\sigma}^\mu \partial_\mu \psi_L \right\} = -i \oint_\infty d^3a \cdots + i \int d^4x \psi_L^\dagger \sigma \partial_\mu \psi_L$$

On ne s'intéresse pas au premier terme car il s'annule si on intègre sur tout l'espace. On peut donc considérer cette action comme réel. Si on intègre pas sur toute l'espace, on peut toujours argumenter que la variation de l'action est réel et c'est tout ce qui nous interesse.

$$S_R = i \int d^4x \psi_R^\dagger \sigma^\mu \partial_\mu \psi_R$$

$$\delta S_R = i \int d^4x \partial \psi_R^\dagger \sigma^\mu \partial_\mu \psi_R + \cdots = \cdots + \cdots = 0$$

$$\implies \sigma^\mu \partial_\mu \psi_R = 0 \quad \tilde{\sigma}^\mu \partial_\mu \psi_L = 0 \quad \text{Équation de Weyl}$$

On pose comme solution

$$\psi_{L(x)} = u_L e^{-ip_\mu x^\mu}$$

On va supposer que la quadri-impulsion est donnée par :

$$p^\mu = (E, 0, 0, p)$$

$$p_\mu = (E, 0, 0, -p)$$

$$\sigma^\mu p_\mu = \begin{pmatrix} E-p & 0 \\ 0 & E+p \end{pmatrix}$$

$$\tilde{\sigma}^\mu p_\mu = \begin{pmatrix} E+p & 0 \\ 0 & E-p \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} E-p & 0 \\ 0 & E+p \end{pmatrix} u_R = 0$$

$$\begin{pmatrix} E+p & 0 \\ 0 & E-p \end{pmatrix} u_L = 0$$

$$u_R = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad E = p > 0$$

$$u_L = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad E = p > 0$$

## Lagrangien de Dirac

$$\mathcal{L}_D = i\psi_L^\dagger \tilde{\sigma}^\mu \partial_\mu \psi_L + i\psi_R^\dagger \sigma^\mu \partial_\mu \psi_R - m \left( \psi_L^\dagger \psi_R + \psi_R^\dagger \psi_L \right)$$

$$u_R = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad E = p > 0$$

Les unités de l'action sont celles de  $\hbar$ , dans notre système d'unité donc  $[S] = 1$

$$[\mathcal{L}] = L^{-4}$$

Nouvelle notation : le spineur de dirac

$$\psi = \begin{bmatrix} \psi_L \\ \psi_R \end{bmatrix}$$

$$L_D = i\psi^\dagger \begin{bmatrix} \tilde{\sigma}^\mu & 0 \\ 0 & \sigma^\mu \end{bmatrix} \partial_\mu \psi - m\psi^\dagger \begin{bmatrix} 0 & \mathbb{1} \\ \mathbb{1} & 0 \end{bmatrix} \psi$$

$$\gamma_0 = \begin{bmatrix} 0 & \mathbb{1} \\ \mathbb{1} & 0 \end{bmatrix} \quad \gamma^k = \begin{bmatrix} 0 & \sigma_k \\ \sigma_k & 0 \end{bmatrix}$$

$$\gamma^\mu = \gamma^0 \begin{bmatrix} \tilde{\sigma}^\mu & 0 \\ 0 & \sigma^\mu \end{bmatrix}$$

$$(\gamma^0)^2 = 1 \quad (\gamma^k) = \begin{bmatrix} -\sigma_k^2 & 0 \\ 0 & -\sigma_k^2 \end{bmatrix} = -\mathbb{1}$$

$$\gamma^0 \gamma^k + \gamma^k \gamma^0 = 0$$

$$\gamma^\mu \gamma^\nu + \gamma^\nu \gamma^\mu = g^{\mu\nu}$$

$$\bar{\psi} = \psi^\dagger \gamma^0$$

$$\gamma^\mu A_\mu = \not{A}$$

$$\gamma^\mu \partial_\mu = \not{\partial}$$

$$\mathcal{L}_D = i\bar{\psi} \gamma^\mu \partial_\mu \psi - m\bar{\psi} \psi$$

On passe dans la machine de la variation nulle de l'action pour obtenir

$$i\gamma^\mu \partial_\mu \psi - m\psi = 0 \quad \text{L'équation de Dirac !}$$

$$(i\not{\partial} - m)\psi = 0$$

## Révision

### Spineur de Dirac

$$\psi = \begin{pmatrix} \psi_L \\ \psi_R \end{pmatrix} R$$

Le lagrangien de Dirac,

$$\mathcal{L}_D = i\bar{\psi}\gamma^\mu\partial_\mu\psi - m\bar{\psi}\psi$$

mène à l'équation de Dirac

$$i\gamma^\mu\partial_\mu\psi - m\psi = 0$$

$$\gamma^0 = \begin{bmatrix} 0 & \mathbb{1} \\ \mathbb{1} & 0 \end{bmatrix} \quad \gamma^k = \begin{bmatrix} 0 & \sigma_k \\ \sigma_k & 0 \end{bmatrix}$$

$$\gamma^\mu\gamma^\nu + \gamma^\nu\gamma^\mu = 2q^{\mu\nu}\mathbb{1}$$

$$\gamma^0\gamma^\mu\gamma^0 = (\gamma^\mu)^\dagger$$

$$\gamma^\mu \rightarrow U\gamma^\mu U^\dagger$$

$$\psi \rightarrow U\psi$$

### Représentation de Dirac

$$U = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} \mathbb{1} & \mathbb{1} \\ -\mathbb{1} & \mathbb{1} \end{bmatrix}$$

$$\psi = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} \psi_L + \psi_R \\ -\psi_L + \psi_R \end{bmatrix}$$

$$\gamma^0 = \begin{bmatrix} \mathbb{1} & 0 \\ 0 & -\mathbb{1} \end{bmatrix} \quad \gamma^k = \begin{bmatrix} 0 & \sigma_k \\ \sigma_k & 0 \end{bmatrix}$$

### Ondes planes

$$\psi = \psi_{\mathbf{p}} e^{-ip_\mu x^\mu}$$

$$(p_\mu \gamma^\mu - m) \psi_{\mathbf{p}} = 0$$

$$\left( E \gamma^0 - \sum_i \gamma^i p^i - m \right) \psi_{\mathbf{p}} = 0$$

En multipliant par  $\gamma^0$  de la gauche, on obtiens (  $(\gamma^0)^2 = \mathbb{1}$  )

$$\left( E - \sum_i \gamma^0 \gamma^i p^i - m \right) \psi_{\mathbf{p}} = 0$$

$$\underbrace{\begin{bmatrix} m & \mathbf{p} \cdot \boldsymbol{\sigma} \\ \mathbf{p} \cdot \boldsymbol{\sigma} & -m \end{bmatrix}}_{\text{"}H\text{"}} \psi_p = E \psi_p \quad \text{ou} \quad \underbrace{\begin{bmatrix} m & -i\boldsymbol{\sigma} \cdot \boldsymbol{\nabla} \\ -i\boldsymbol{\sigma} \cdot \boldsymbol{\nabla} & -m \end{bmatrix}}_{\text{"}\mathcal{H}\text{"}} \psi_p = i \frac{\partial \psi}{\partial t} \psi_p$$

Au repos ( $\mathbf{p} = 0$ ), on a

$$\begin{bmatrix} m & 0 \\ 0 & -m \end{bmatrix} \psi_0 = E \psi_0$$

$$\begin{array}{ll} E = m & u_1 = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} & u_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \\ E = -m & u_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} & u_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \end{array}$$

$$(o_\mu \gamma^\mu + m) (p_\mu \gamma^\mu - m) = p_\mu p_\nu \gamma^\mu \gamma^\nu - m^2 = p_\mu p_\mu \frac{1}{2} (\gamma^\mu \gamma^\nu + \gamma^\nu \gamma^\mu) - m^2 = g^{\mu\nu} p_\mu p_\nu - m^2 = p^2 - m^2$$

$$(p_\nu \gamma^\nu + m) \boxed{(p_\mu \gamma^\mu - m) \psi_p} = 0$$

$$(p^2 - m^2) \psi_{\mathbf{p}} = 0$$

$$p^2 = m^2 \quad E^2 - \mathbf{p}^2 = m^2$$

$m$  se comporte donc bel et bien comme une masse

$$(p_\nu \gamma^\nu + m) = \begin{bmatrix} p^0 + k & 0 & -p_z & -p_x + ip_y \\ 0 & p^0 + m & -p_x - ip_y & p_z \\ p_z & p_x - ip_y & -p^0 + m & 0 \\ p_x + ip_y & -p_z & 0 & -p^0 + m \end{bmatrix}$$

Les quatres colonnes sont les vecteurs  $u_{\mathbf{p}_i}$  si on les normalise par  $\frac{1}{\sqrt{2E_{\mathbf{p}}(E_p+m)}}$

## Quantification du champ de Dirac

$$\psi(\mathbf{r}) = \frac{1}{\sqrt{\mathcal{V}}} \sum_{\mathbf{p}} \sum_{s=1}^4 u_{\mathbf{p},s} e^{i\mathbf{p}\cdot\mathbf{r}}$$

Retour sur le champ scalaire

$$\phi(\mathbf{r}) = \frac{1}{\sqrt{\mathcal{V}}} \sum_{\mathbf{p}} \frac{1}{\sqrt{2\omega_{\mathbf{p}}}} (a_{\mathbf{p}} e^{i\mathbf{p}\cdot\mathbf{r}} + a_{\mathbf{p}}^{\dagger} e^{-i\mathbf{p}\cdot\mathbf{r}})$$

$$\frac{1}{\mathcal{V}} \int d^3r (u_{\mathbf{p},s} e^{i\mathbf{p}\cdot\mathbf{r}})^{\dagger} (u_{\mathbf{p},s} e^{i\mathbf{p}\cdot\mathbf{r}})$$

$$c_{\mathbf{p},s} = \frac{1}{\mathcal{V}} \int d^3r u_{\mathbf{p},s,\alpha}^* \psi_{\alpha}(\mathbf{r} e^{-i\mathbf{p}\cdot\mathbf{r}})$$

$$\mathcal{L}_D = i\bar{\psi}\gamma^{\mu}\partial_{\mu}\psi - m\bar{\psi}\psi = i\psi^{\dagger}\partial_{\mu}\psi_{\alpha} + i\sum_{k=1}^3 \bar{\psi}_{\alpha}^k \gamma_{i,j}^? \partial_{\gamma} \psi_{\gamma} - m\bar{\psi}_{\alpha}\psi_{\alpha}$$

$$\psi_{\alpha} = \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{\psi}_{\alpha}} = i\psi_{\alpha}^*$$

$$\mathcal{H} = \sum_{\alpha} \psi_{\alpha} \dot{\psi}_{\alpha} - \mathcal{L} = \dots = -i \sum_{k=1}^3 \bar{\psi}_{\alpha} \gamma_{\alpha,\beta}^k \partial_k \psi_{\beta} + \bar{\psi}_{\alpha} \psi_{\alpha}$$

$$[\psi_{\alpha}(\mathbf{r}), \pi_{\beta}(\mathbf{r}') ]_p = \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}') \delta_{\alpha,\beta} \xrightarrow{\text{commutateur}} i \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}')$$

$$[\psi_{\alpha}(\mathbf{r}), \psi_{\beta}^{\dagger}(\mathbf{r})]$$

$$c_{p,s} = \frac{1}{\sqrt{\mathcal{V}}} \int d^3r u_{\mathbf{p},s,\alpha}^* \psi_{\alpha}^{\dagger}(\mathbf{r}) e^{i\mathbf{p}\cdot\mathbf{r}}$$

$$c_{p,s}^* = \frac{1}{\sqrt{\mathcal{V}}} \int d^3r u_{\mathbf{p},s,\alpha} \psi_{\alpha}^{\dagger}(\mathbf{r}) e^{-i\mathbf{p}\cdot\mathbf{r}}$$

$$\begin{aligned}
[c_{ps}, c_{p's'}^\dagger] &= \frac{1}{\mathcal{V}} \int d^3r' \sum_{\alpha, \beta} u_{ps\alpha}^* U_{ps\alpha} e^{-i\mathbf{p}\mathbf{r} + i\mathbf{p}'\mathbf{r}'} [\psi_\alpha(\mathbf{r}), \psi_\beta^\dagger(\mathbf{r}')] \\
&= \frac{1}{\mathcal{V}} \int d^3r \sum_{\alpha} e^{-i(\mathbf{p}-\mathbf{p}')\cdot\mathbf{r}} u_{ps\alpha}^* u_{p's'\alpha} \\
&= \delta_{\mathbf{p}\mathbf{p}'} \delta_{ss'}
\end{aligned}$$

La relation qu'on obtiens n'est pas tout à fait vrai, le résultat qu'on obtiens ne donne pas ce qu'on voudrait pour des fermions. C'est normal puisque le résultat qu'on obtiens à entièrement été dérivé de la mécanique classique. Comme la mécanique quantique ne peut être entièrement dérivé depuis la mécanique classique, il manque quelque chose. (Le théorème de spin statistique par exemple?)

1928 → Jordan ; Wigner

Le problème est réglé en prenant l'**anti-commutateur** au lieu du commutateur

$$\{c_{ps}, c_{p's'}^\dagger\} = \delta_{\mathbf{p},\mathbf{p}'} \delta_{s,s'}$$

$$H = \sum_{\mathbf{p}} \underbrace{E_{\mathbf{p}}}_{\sqrt{m^2 + \mathbf{p}^2}} \left( c_{\mathbf{p}1}^\dagger c_{\mathbf{p}1} + c_{\mathbf{p}2}^\dagger c_{\mathbf{p}2} - c_{\mathbf{p}3}^\dagger c_{\mathbf{p}3} c_{\mathbf{p}4}^\dagger c_{\mathbf{p}4} \right)$$

2022-31-03

Au dernier cours, on a *développé* le champ de Dirac en modes.

$$\psi(\mathbf{r}) = \frac{1}{\sqrt{\mathcal{V}}} \sum_{\mathbf{p}} \sum_{s=1}^4 c_{\mathbf{p},s} u_{\mathbf{p},s} e^{i\mathbf{p}\mathbf{r}}$$

$$\begin{aligned} \{c_{\mathbf{p},s}, c_{\mathbf{p}',s'}^\dagger\} &= \delta_{\mathbf{p},\mathbf{p}'} \\ \{c_{\mathbf{p},s}, c_{\mathbf{p}',s'}\} &= 0 \end{aligned}$$

Mer de Dirac

$$|F\rangle = \prod_{\mathbf{p}} \prod_{s=3,4} c_{\mathbf{p},s}^\dagger |0\rangle$$

$$E_0 = -2 \sum_{\mathbf{p}} E_{\mathbf{p}}$$

On suppose que  $\|\mathbf{p}\|$  est borné bien qu'on ne connaisse pas vraiment la borne supérieure

On définit les opérateurs de création et de destruction de *trou* dans la mer de Dirac

$$d_{\mathbf{p}1} = c_{-\mathbf{p}4}^\dagger \quad d_{\mathbf{p}2} = c_{-\mathbf{p}3}^\dagger$$

Le Hamiltonien se réexprime alors comme

$$H = \sum_{\mathbf{p}} \sum_{s=1,2} E_{\mathbf{p}} \left( c_{ps}^\dagger c_{ps} - d_{-ps} d_{-ps}^\dagger \right) = \sum_{\mathbf{p}} \sum_{s=1,2} E_{\mathbf{p}} \left( c_{ps}^\dagger c_{ps} d_{ps}^\dagger d_{ps} - 1 \right)$$

trou

La quantité de mouvement est donnée par

$$\mathbf{P} = \sum_{\mathbf{p}, s=1,2,3,4} \mathbf{p} c_{ps}^\dagger c_{ps} = \sum_{ps=1,2} \mathbf{p} \left( c_{ps}^\dagger c_{ps} + d_{-ps} + d_{-ps}^\dagger \right) = \dots = \sum_{p, s=1,2} \mathbf{p} \left( c_{ps}^\dagger c_{ps} + d_{pas}^\dagger d_{ps} \right)$$

Le 4-courant est donné par

$$j^\mu = \bar{\psi} \gamma^\mu \psi$$

L'équation de la conservation de la charge est respecté par l'équation de Dirac :

$$\partial_\mu j^\mu = 0 \quad \text{si} \quad i\gamma^\mu \partial_\mu \psi - m\psi = 0$$

La densité de charge électrique est donné par

$$j^0 = \rho = \bar{\psi} \gamma^0 \psi = \psi^\dagger \psi$$



$$Q = e \int d^3\tau \rho = \int d^3r \psi^\dagger(\mathbf{r}) \psi(\mathbf{r}) = e \sum_{p,s,s'} c_{ps}^\dagger c_{ps} \underbrace{u_{ps}^\dagger u_{ps}}_{\delta_{ss'}} = e \sum_{\mathbf{p},s=1,2} \left( c_{ps}^\dagger c_{ps} + d_{-ps}^\dagger d_{-ps} \right) = e \sum_{\mathbf{p},s=1,2} (c_{ps}^\dagger c_{ps} - d_{ps}^\dagger d_{ps}) + Q_0$$

$Q_0$  est alors la charge de la mer de Dirac

## Jauge

Ex :

$$F_{\mu\nu} = \partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu$$

$$A_\mu \rightarrow A_\mu + \partial_\mu \xi \implies F_{\mu\nu} \rightarrow F_{\mu\nu}$$

En mécanique la substitution de Peierls s'écrit

$$\nabla \rightarrow \nabla - ie\mathbf{A} \quad \partial_t \rightarrow \partial_t + ie\Phi$$

C'est le *couplage minimal*

$$\boxed{\partial_\mu \rightarrow \partial_\mu + ieA_\mu}$$

Avec cette substitution  $\psi \rightarrow e^{-ie\xi(r,t)}\psi$

On aimerait que l'équation de Shrodinger soit invariant à une phase près *localement* contrairement à globalement

Dérivée covariante :

$$\mathcal{D}_\mu = \partial_\mu + ieA_\mu$$

$$\psi' = e^{-ie\xi} \psi$$

On peut montrer que :

$$\mathcal{D}'_\mu \psi' = e^{-ie\xi} (\mathcal{D}_\mu \psi)$$

On a alors la *nouvelle* équation de Schrodinger

$$i\mathcal{D}_t \psi = -\frac{1}{2m} \vec{\mathcal{D}}^2 \psi$$

$$\vec{\mathcal{D}}^2 \psi$$

On construit l'action électromagnétique comme

$$S_{em} = \frac{1}{4} \int \mathrm{d}^4x \underbrace{F^{\mu\nu} F_{\mu\nu}}_{-2(\mathbf{E}^2 - \mathbf{B}^2)} - e \int \mathrm{d}x^\mu A_\mu - m \int \mathrm{d}s$$

$$\mathcal{L} = \frac{1}{2}(\mathbf{E}^2 - \mathbf{B}^2) = \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{\partial v A}{\partial t} \right)^2 - (\nabla \times \mathbf{A})^2 \right]$$

$$\vec{\pi} = \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{\mathbf{A}}}$$

2022-24-03

$$\mathcal{H} = \frac{1}{2} (\mathbf{E}^2 + \mathbf{B}^2)$$

Comme on étudie le champ électromagnétique seul (sans source), on a

$$\nabla \cdot \mathbf{A} = 0 \quad \Phi = 0$$

$$\mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \quad \mathbf{B} = \nabla \wedge \mathbf{A}$$

$$L = \frac{1}{2} \int d^3r (\mathbf{E}^2 - \mathbf{B}^2) = \frac{1}{2} \int d^3r \left\{ \dot{\mathbf{A}}^2 - (\nabla \mathbf{A})^2 \right\}$$

$$\mathbf{A}(\mathbf{r}) = \frac{1}{\mathcal{V}} \sum_q \mathbf{A}_q e^{i\mathbf{q}\mathbf{r}}$$

$$\nabla \wedge \mathbf{A}(\mathbf{r}) = \frac{-i}{\sqrt{\mathcal{V}}} \sum_q \mathbf{A}_q \wedge \mathbf{q} e^{i\mathbf{q}\mathbf{r}}$$

$$\begin{aligned} L &= \frac{1}{2\mathcal{V}} \int d^3r \sum_{q,q'} \left\{ \dot{A}_q \dot{A}'_{q'} + (\mathbf{q} \wedge \mathbf{A}_q) \cdot (\mathbf{q}' \wedge \mathbf{A}_{q'}) \right\} e^{-i\mathbf{r}(\mathbf{q}-\mathbf{q}')} \\ &= \frac{1}{2} \sum_{q,q'} \dot{A}_q^* \cdot \dot{A}_{q'} - (q^2 \mathbf{A}_q^* \cdot \mathbf{A}_{q'} - (\mathbf{q} \cdot \mathbf{A}_{q'}) (\mathbf{q} \cdot \mathbf{A}_q)) \\ &= \frac{1}{2} \sum_q \left\{ \dot{\mathbf{A}}_q \dot{\mathbf{A}}_{\mathbf{q}-\mathbf{q}^*} A_{\mathbf{q}^*} \cdot \mathbf{A}_{\mathbf{q}} \right\} \\ &= \frac{1}{2} \sum_{q,j=1,2} \left\{ \dot{A}_{jq}^* \dot{A}_{jq} - \omega_q^2 A_{jq}^* A_{jq} \right\} \end{aligned}$$

Comme avec la champ scalaire, on va pouvoir définir des opérateurs de création et d'annihilation

flashback du champ scalaire

$$\begin{aligned} L &= \frac{1}{2} \sum_q \left\{ \dot{\phi}_q^* \dot{\phi}_q - \omega_q^2 \phi_q^* \phi_q \right\} \\ \phi(\mathbf{r}) &= \frac{1}{\sqrt{\mathcal{V}}} \sum_p \frac{1}{\sqrt{2\omega_p}} (e_{\mathbf{p}} e^{i\mathbf{p}\mathbf{r}} + a_p^\dagger e^{-i\mathbf{p}\mathbf{r}}) \end{aligned}$$

$$[a_{jq}, a_{j'q'}^\dagger] = \delta_{jj'} \delta_{qq'}$$

$$A(\mathbf{r}, t) = \frac{1}{\sqrt{\mathcal{V}}} \sum_{p,j} \frac{1}{\sqrt{2\omega_p}} \left( a_{jq} \epsilon_{jq} e^{i\mathbf{q}\mathbf{r} + i\omega t} + a_{jq}^\dagger \epsilon_{jq}^* e^{-i\mathbf{q}\mathbf{r} + i\omega t} \right)$$

on a ici utilisé la *jauge transverse* ou  $\mathbf{q} \cdot \mathbf{A}_q = 0$

$$H = \sum_{q,j} \omega_q \left( a_{jq}^\dagger a_{jq} + 12 \right)$$

$$\omega_q = |q| \implies \text{masse nulle}$$

vecteur de Poynting

$$\mathbf{P} = \int d^3r \mathbf{E} \wedge \mathbf{B} = \sum_{jq} q a_{jq}^\dagger a_{jq}$$

à partir de la densité de quantité de mouvement  $\mathbf{E} \wedge \mathbf{B}$  on construit la densité que momement cinétique  $\mathbf{r} \wedge (\mathbf{E} \wedge \mathbf{B})$

$$\mathbf{S} = \int d^3r \mathbf{r} \wedge (\mathbf{E} \wedge \mathbf{B}) = \mathbf{S}_{\text{orb}} + \sum_{pj} a_{jq}^\dagger a_{jq} (\epsilon_{jq}^* \wedge \epsilon_{jq})$$

## Électrodynamique quantique (QED)

$$S = \int d^4x i \bar{\psi} \gamma^\mu \underbrace{\partial_\mu}_{\rightarrow \mathcal{D}_\mu = \partial_\mu + ie A_\mu} \psi - m \bar{\psi} \psi = -\frac{1}{4} \int d^4x F_{\mu\nu} F^{\mu\nu}$$

$$S = S_0 + S_{\text{int}}$$

$$S_{\text{int}} = -e \int d^4x \bar{\psi} \gamma^\mu \psi A_\mu$$

$$L_{\text{int}} = e \int d^3r \bar{\psi} \gamma^\mu \psi A_\mu$$

$$H_{\text{int}} = e \int d^3r \bar{\psi} \vec{\gamma} \psi \cdot \vec{A}$$

$$\begin{aligned} H = & -\frac{e}{\mathcal{V}} \int d^3r \sum_{j,\mathbf{k}} \sum_{s,s',\mathbf{p},\mathbf{p}'} \frac{1}{\sqrt{2\omega_k \mathcal{V}}} \left( a_{j\mathbf{k}} \epsilon_{j\mathbf{k}} e^{i\mathbf{k}\cdot\mathbf{r}} + a_{j\mathbf{k}}^\dagger \epsilon_{j\mathbf{k}}^* e^{-i\mathbf{k}\cdot\mathbf{r}} \right) \\ & \left( c_{\mathbf{p},s}^\dagger \bar{u}_{\mathbf{p},s} e^{-i\mathbf{p}\cdot\mathbf{r}} + d_{\mathbf{p},s} \bar{v}_{\mathbf{p},s} e^{i\mathbf{p}\cdot\mathbf{r}} \right) \gamma \left( c_{\mathbf{p}',s'} u_{\mathbf{p}',s'} e^{i\mathbf{p}'\cdot\mathbf{r}} + d_{\mathbf{p}',s'}^\dagger v_{\mathbf{p}',s'} e^{-i\mathbf{p}'\cdot\mathbf{r}} \right) \\ & i\mathcal{M} = u_\alpha(p_1 s_1) u_\gamma(p_2, s_2) \bar{u}_\beta \bar{u}_{\text{delta}} \left( -ie \gamma_{\beta\alpha}^\mu \right) \left( -ie \gamma_{\delta\gamma}^\nu \right) \frac{-ig_{\mu\nu}}{(p_1 - p_2)^2} \end{aligned}$$

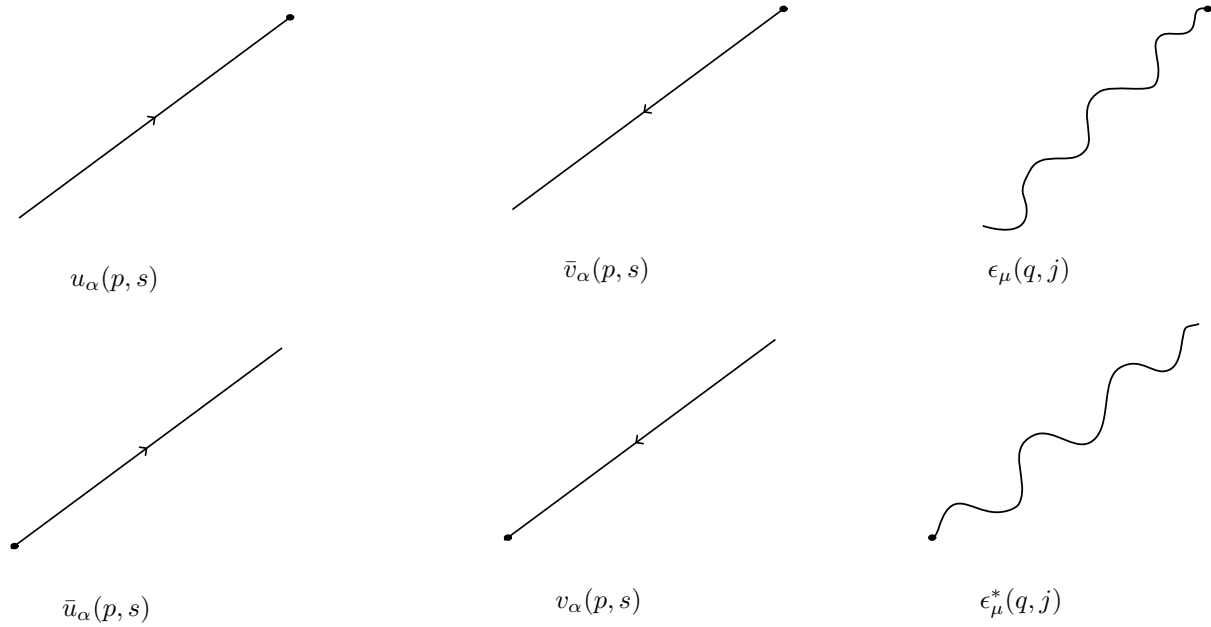


FIGURE 1 – Diagramme de Feynman : ligne externes

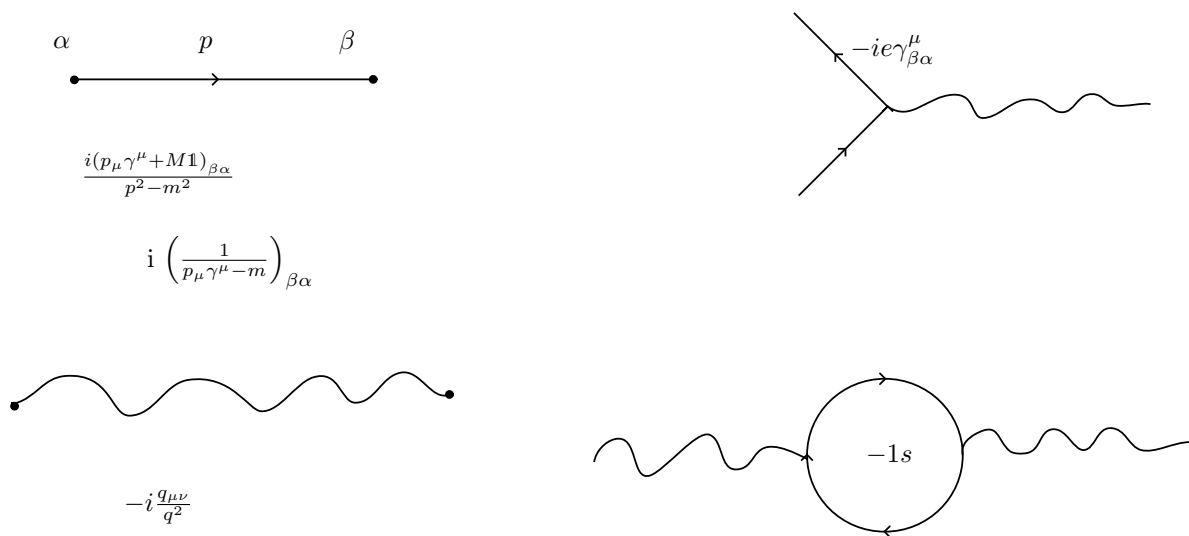


FIGURE 2 – lignes internes

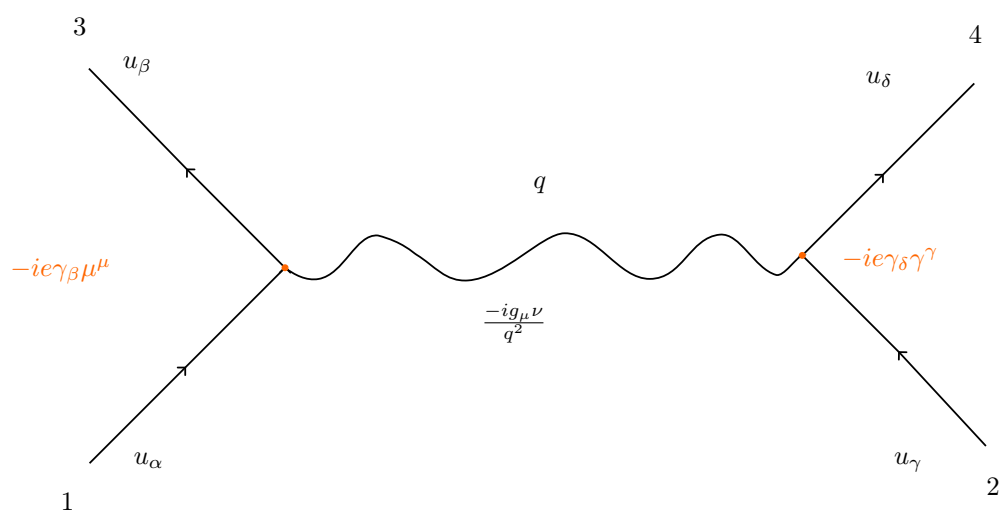


FIGURE 3 – Diffusion électron muon

# QCD (Quantum Chromodynamics)

## Couleur de quarks

On justifie la notion de *couleur* par trois observation

1.  $\Delta^{++}$  : Des baryons produit lorsqu'on envoie un faisceau de proton sur des cibles. Cette particule se désintègre extrêmement rapidement. Tellement qu'on ne peut pas l'observer directement. On l'observe seulement par *résonance* dans le processus de scattering. Cette particule n'a pas l'air élémentaire (et ne l'est pas) à cause de sa charge de  $2e$ . Sont spin et de  $J = \frac{3}{2}$  ce qui est étrange sans le modèle des quarks. Cette particule est en quelque sorte l'état fondamentale de trois quarks.

Généralement, la fonction d'onde de l'état fondamentale d'un système est symétrique car l'antisymétrie est liée à des variations plus rapides et donc plus d'énergie. La fonction d'onde de  $\Delta^{++}$  est donc symétrique.

La particule est donc symétrique en spin ( $|\frac{3}{2}\rangle = |\uparrow\uparrow\uparrow\rangle$ ) et en position. Pourtant, étant un fermion, cette particule devrait avoir une fonction d'onde antisymétrique. On déduit de cela qu'il doit y avoir un autre degré de liberté interne. Ce degré de liberté additionnel est la couleur. On peut montrer que cette antisymétrie requiert un degré de liberté à *trois dimensions*

Champ de Dirac :

$$\psi_{\alpha,i}$$

$\alpha$  est ici l'indice de Dirac et  $i \in \{1, 2, 3\}$  est l'indice de couleur

$$\mathcal{L} = \sum_{i=1}^3 (i\bar{\psi}_i \partial_\mu \gamma^\mu \psi_i - m\bar{\psi}_i \psi_i) \quad \text{pour 1 type de quark}$$

au lieu d'utiliser les indices  $\{1, 2, 3\}$ , on préfère  $\{R, G, B\}$

$$\begin{aligned} & \frac{1}{\sqrt{6}} \left\{ |RGB\rangle + |GBR\rangle + |BRG\rangle - |GRB\rangle - |RBG\rangle - |BGR\rangle \right\} \\ &= \frac{1}{\sqrt{6}} \epsilon_{ijk} |ijk\rangle \end{aligned}$$

- 2.

$$e^+e^- \rightarrow \text{hadron}$$

$$e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$$

$$R = \frac{\sigma_{e^+e^- \rightarrow \text{hadrons}}}{\sigma_{e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-}} = \sum_a Q_a^2$$

3. neutralité électrique des familles

On demande la neutralité électrique des différents types de famille, entre autre dans le but de construire la mer de Dirac.



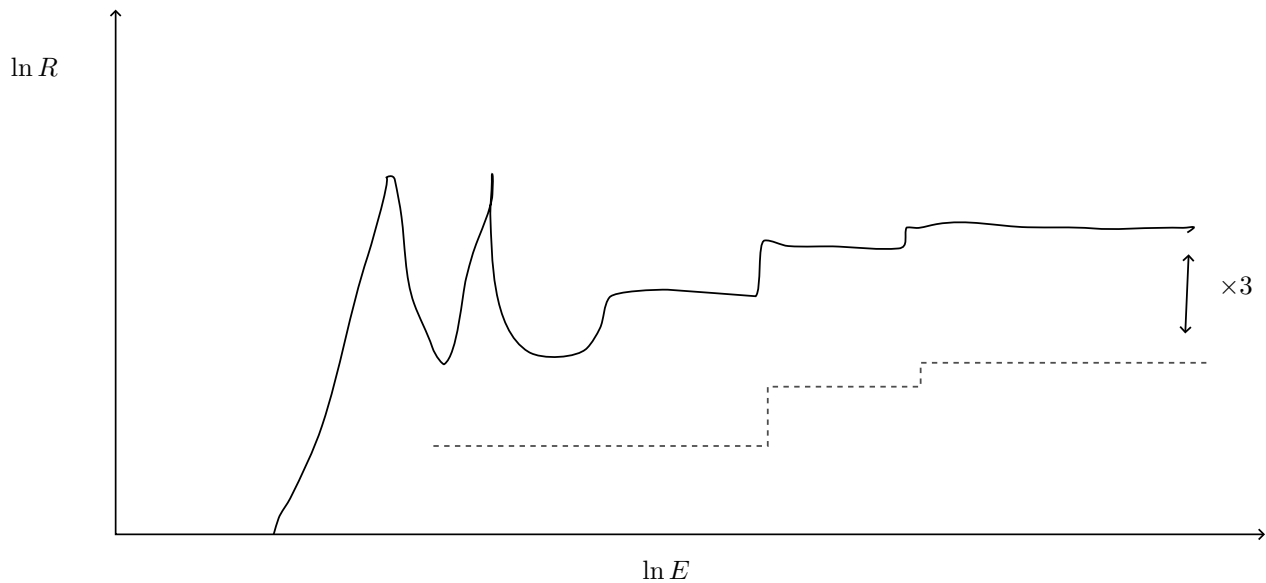


FIGURE 1 – Argument 2, on semble avoir 3 fois plus de type de particules que prévu

### Rotation de couleur

$$\psi \rightarrow \psi'_i = \sum_{j=1}^3 U_{ij} \psi_j$$

$$U^{-1} = U^\dagger$$

$$\mathcal{L} = \sum_{i=1}^3 (i\bar{\psi}_i \partial_\mu \gamma^\mu \psi_i - m\bar{\psi}_i \psi_i)$$

$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{6}} \epsilon_{ijk} |ijk\rangle$$

$$|\psi'\rangle = \frac{1}{\sqrt{6}} \epsilon_{ijk} \underbrace{u_{il} u_{jm} u_{kn}}_{\epsilon_{lmn} \det U} |lmn\rangle$$

$$= \det U \frac{1}{\sqrt{6}} \epsilon_{lmn} |lmn\rangle$$

$$= \underbrace{\det U}_1 |\psi\rangle$$

$$\implies U \in \text{SU}(3)$$

## Parenthèse sur la théorie des groupe

groupes définis par des matrices

$$a, b, c \in G \quad a, b \in G \implies ab \in G$$

$$\exists e \in G | ae = ea = a$$

$$(ab)c = a(bc)$$

$$\forall a \in G \exists a^{-1} | aa^{-1} = e$$

$U(n)$  : groupe des matrices unitaires de dimension  $n$

$SU(n)$  :  $U(n)$  et  $\det \in G = 1$

$O(n)$  : matrice orthogonales

$SO(n)$  : speciale orthogonales

État quark-antiquark ( $q\bar{q}$ )

$$c_k \rightarrow U c_k$$

$$d_k^\dagger \rightarrow U d_k^\dagger$$

$$c_k^\dagger \rightarrow U^* c_k^\dagger$$

$$d_k \rightarrow U^* d_k$$

$$|\psi\rangle_{\text{meson}} = \frac{1}{\sqrt{3}} \left( |R\bar{R}\rangle + |G\bar{G}\rangle + |B\bar{B}\rangle \right) = \frac{1}{\sqrt{3}} \sum_{i=1}^3 |i\bar{i}\rangle$$

$$|\psi'\rangle \rightarrow \frac{1}{\sqrt{3}} \sum_{i=1}^3 U_{ij}^* U_{iR} |j\bar{R}\rangle = \frac{1}{\sqrt{3}} \sum_{jk} \delta_{jk} |j\bar{k}\rangle = \frac{1}{\sqrt{3}} \sum_j |j\bar{j}\rangle = |\psi\rangle$$

## Théorie de Yang-Mills (1954)

## Gross, Wilczek, Politzer (1973)

C'est une théorie de l'interaction forte qui était très remise en question avant l'idée des quarks.

$$\psi_i \rightarrow \psi'_i = \underbrace{U_{ij}}_{\in SU(3)}(x) \psi_j$$

$$\mathcal{L} = \sum_{j=1}^3 \bar{\psi}_i (i\gamma^\mu \partial_\mu - m) \psi_i$$

On construit alors la dérivé covariante

$$\mathcal{D}_\mu \psi = (\partial_\mu + ig A_\mu) \psi$$

En électromagnétisme :

$$\psi' = \psi e^{ie\xi(r)} \psi$$

$$(\mathcal{D}_\mu \psi)' = e^{i\xi} \mathcal{D}_\mu \psi$$

En chromodynamique

$$\begin{aligned}\psi' &= U\psi \\ (\mathcal{D}_\mu\psi)' &= U\mathcal{D}_\mu\psi\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\mathcal{D}'_\mu\psi' &= (\partial_\mu igA'_\mu)U\psi = U(\partial_\mu igA_\mu)\psi \\ &= \partial_\mu U\psi + \cancel{U\partial_\mu} + igA'_\mu U\psi = \cancel{U\partial_\mu\psi} + igUA_\mu\psi\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\implies \partial_\mu U + ig'_\mu U &= igUA_\mu \\ \implies \partial_\mu UU^\dagger_i gA'_\mu &= igUA_\mu U^\dagger\end{aligned}$$

$$\boxed{A'_\mu = \frac{i}{g}\partial_\mu UU^\dagger + UA_\mu U^\dagger}$$

$$\mathcal{L} = \bar{\psi} \left( i \not{D} - m \right) \psi = \bar{\psi} \left( i \not{\partial} - m - g \not{A} \right) \psi$$

lien entre matrice unitaire et hermitienne

$$U = e^{iH} \quad U^{-1} = e^{-iH} = U^\dagger$$

$$\det U = 1 \rightarrow \text{tr } H = 0$$

$$\text{SU}(2) \rightarrow \text{e}^{\frac{1}{2}\text{i}\omega_a\sigma_a} \quad \text{SU}(3) \rightarrow \text{e}^{\text{i}\omega_a T_a}$$

Il y a 8 matrices  $T_a$ , analogues aux matrices de Pauli, ce sont les matrices de Gell-mann

$$T_a = \frac{1}{2}\lambda_a$$

$$\begin{aligned}\lambda_1 &= \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} & \lambda_2 &= \begin{pmatrix} 0 & -i & 0 \\ i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} & \lambda_3 &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \\ \lambda_4 &= \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} & \lambda_5 &= \begin{pmatrix} 0 & -i & 0 \\ i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} & \lambda_6 &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}\end{aligned}$$

Transformation de Jauge

...

Action de la QCD

$$\begin{aligned} F &\overset{?}{=} \partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu \\ &= \mathcal{D}_\mu A_\nu \mathcal{D}_\nu \\ &= (del_\mu ig A_\mu) A_\nu - (\partial_\nu + ig A_\nu) A_\mu \\ &= \partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu + ig[A_\mu, A_\nu] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F'_{\mu\nu} &= \mathcal{D}'_\mu A'_\nu - \mathcal{D}'_\nu A'_\mu \\ &= \dots \\ &= U F_{\mu\nu} U^\dagger \end{aligned}$$

$F^a_{\mu\nu} = \partial_\mu A^a_\nu - \partial_\nu A^a_\mu - f_{bca} A^b_\mu A^c_\nu$

$$L_{QCD} = \frac{1}{2} \text{tr}(F_{\mu\nu}) F_{\mu\nu} = \dots = -\frac{1}{4} F^a_{\mu\nu} F^{\mu\nu a}$$

$$\mathcal{L}_{QCD} = -\frac{1}{4} \underbrace{(\partial_\mu A_\nu^a - \partial_\nu A_\mu^a - gf_{bca} A_\mu^b A_\nu^c)}_{F_{\mu\nu}^a} (\partial^\mu A^{a\nu} - \partial^\nu A^{a\mu} - gf_{dea} A^{d\mu} A^{ev}) + \sum_f \bar{\psi}_f (i\gamma^\mu \mathcal{D}_\mu - m_f) \psi_f$$

$f_{abc}$  : complètement antisymétrique

La QCD est une théorie fort (toudoum tish) compliqué car c'est une théorie non linéaire

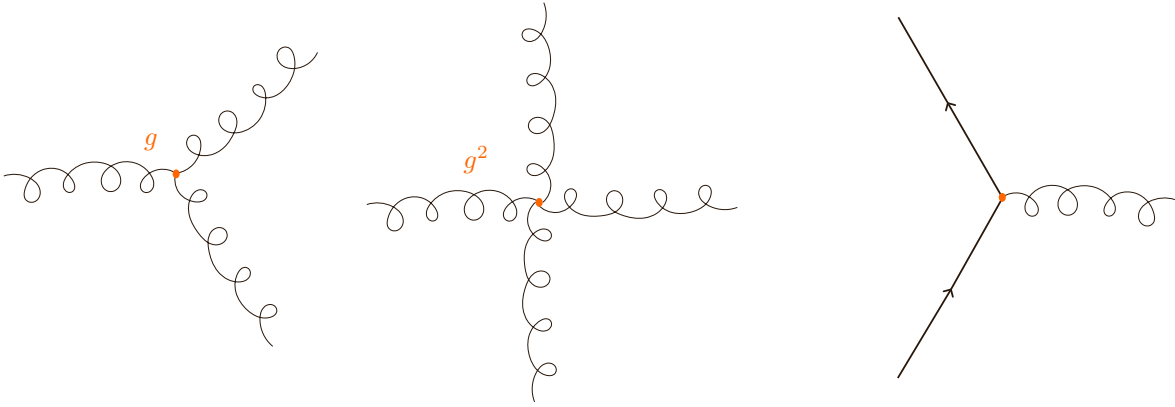


FIGURE 1 – diagrammes non-linéaires

C'est la QED avec une constante de couplage variable

$$\frac{1}{\alpha_s(q^2)} = \frac{1}{\alpha_s(q_0^2)} + \frac{33 - 2N_q}{12\pi} \ln \frac{q^2}{q_0^2}$$

Les boules de *glu* sont des états formés exclusivement de gluons qui existe d'après la théorie des groupes mais qu'on a jamais mesuré hors de tout doute.

L'interaction entre les hadrons nucléaire est analogue à l'interaction de Wandervall au sens où les nucléons sont neutres. L'interaction entre les nucléons est donc assez complexe.

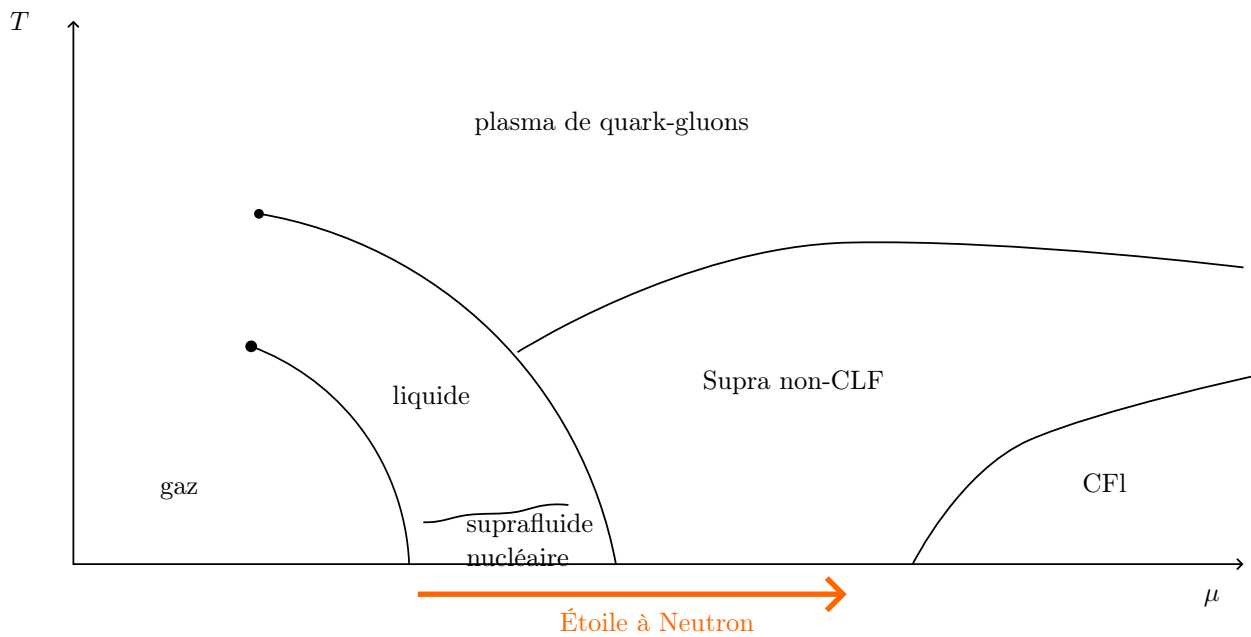


FIGURE 2 – Diagramme de phase (théorique) de la matière hadronique

## Symétries discrètes

P : Parité      C : Conjugaison de charge      T : Inversion du temps

1. P

$$(t, x, y, z) \rightarrow (t, -x, -y, -z) \quad \text{ou} \quad (t, x, y, z) \rightarrow (t, -x, -y, -z) \quad (\mathbf{r} \rightarrow -\mathbf{r})$$

vecteur polaires :

$$\mathbf{r}, \mathbf{v}, \mathbf{a}, \mathbf{p}, \mathbf{f}, \mathbf{E}$$

vecteur axiaux :

$$\mathbf{B}, \vec{J}$$

scalaires :

$$p, v$$

pseudo-scalaire :

$$\mathbf{E} \cdot \mathbf{B} \rightarrow -\mathbf{E} \cdot \mathbf{B}$$

En MQ  $|\mathbf{r}\rangle = |-\mathbf{r}\rangle$

$$\Pi^2 = \mathbf{1} \implies \lambda = \pm$$

Si  $[H, \Pi] = 0$ , alors les états ont une *parité* :  $\Pi |\psi\rangle = \pm |\psi\rangle$

Action de la parité sur le champ de Dirac

$$\psi = \begin{pmatrix} \chi_L \\ \chi_R \end{pmatrix}$$

$$\text{rep. chiral} : \gamma^0 = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$$

$$\begin{aligned} \psi(\mathbf{r}, t) &\rightarrow \psi'(\mathbf{r}, t) = \eta \gamma^0 \psi(-\mathbf{r}, t) \\ A_\mu(\mathbf{r}, t) &\rightarrow A'_\mu(\mathbf{r}, t) = \tilde{A}_\mu(-\mathbf{r}) \rightarrow A'_\mu(\mathbf{r}, t) = \tilde{A}_\mu(-\mathbf{r}, t) \\ \partial'_\mu &\rightarrow \tilde{\mu} \end{aligned}$$

*dotted*

$$i\gamma^\mu \partial_\mu \psi = e\gamma^\mu A_\mu \psi - m\psi = 0$$

On remplace tout par les quantités primées et on vérifie que ça donne bien 0

...

ça donne bien 0 ! : L'équation de Dirac est invariante par parité.

$$\gamma^5 = i\gamma^0\gamma^1\gamma^2\gamma^3$$

rep chirale :

$$\gamma^5 = \begin{pmatrix} -1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

rep Dirac :

$$\gamma^5 = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$$

$$\frac{1}{2} (1 + \gamma^5) = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{chiral}$$

$$\psi_R = \frac{1}{2} (1 + \gamma^5) \psi$$

$$\psi_L = \frac{1}{2} (1 - \gamma^5) \psi$$

$$\bar{\psi}_R = \bar{\psi} \frac{1}{2} (1 - \gamma^5)$$

$$\bar{\psi}_L = \frac{1}{2} \bar{\psi} (1 + \gamma^5)$$

Propriété importante :  $\gamma^5$  anti-commute avec toutes les matrices de Dirac (  $\{\gamma^5, \gamma^i\} = 0; i \in \{0, 1, 2, 3\}$  )

## Conjugaison de charge

$$\psi \rightarrow \psi^c = i\eta_c \gamma^2 \psi^*$$

$$A_\mu \rightarrow A_\mu^c = -A_\mu$$

$$u_{\mathbf{p},1}^c = v_{\mathbf{p},1}$$

$$u_{\mathbf{p},2}^c = -v_{\mathbf{p},2}$$

$$v_{\mathbf{p},1}^c = u_{\mathbf{p},1}$$

$$v_{\mathbf{p},2}^c = -u_{\mathbf{p},2}$$

Moulin à café (équation de Dirac)