

# Examen deeltjes 27 januari 2021

## 1 Deel 1

### 1.1 Vraag 1: Cross section (13 punten)

Consider a scattering experiment with an incoming beam made of particles of type A that is colliding with a target made of particles of type B. The interaction rate  $r_B$  per target particle is proportional to the flux of particles A, denoted by  $\phi_A$  as follows:

$$r_B = \phi_A \sigma$$

- [1 point] Determine the units of the proportionality constant  $\sigma$
- [2 points] when is  $\sigma$  infinite and how do you interpret this?
- [2 points] Write down the general formula for  $\sigma$  for the two particle scattering  $a + b \rightarrow c + d$  assuming that the matrix element of the interaction is  $M(p_a, p_b, p_c, p_d)$  where  $p_i$  are the 4-momenta of the particles. Explain all the terms. You may use the center of mass frame.
- [5 points] Show explicitly that the differential cross section  $\frac{d\sigma}{d\Omega}$  for the scattering process  $a + b \rightarrow c + d$  can be written as

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = |M|^2 \frac{1}{(8\pi(E_a + E_b))^2} \frac{|\vec{p}_f|}{|\vec{p}_i|}$$

Where we assumed that c and d are distinguishable and  $|\vec{p}_f|$  and  $|\vec{p}_i|$  are the magnitude of the three-momenta of the initial and final particles in the center of mass frame respectively.

- [3 points] Is  $\sigma$  Lorentz invariant? Why (not)?

### 1.2 Vraag 2: Dirac equation (7 punten)

- [2 points] Show that the Dirac equation implies the Klein-Gordon equation.
- [1 point] How many degrees of freedom does the Dirac spinor  $\psi(x)$  describe? Justify your answer.
- [2 points] Consider the Dirac equation for the Dirac spinor  $\psi(x)$  minimally coupled to a Maxwell field  $A_\mu(x)$  via the operator:

$$\partial_\mu \rightarrow D_\mu = \partial_\mu + iqA_\mu(x)$$

Where  $q$  is some constant. Discuss the property of the new equation under the  $U(1)$  gauge transformation:

$$A_\mu(x) \rightarrow A_\mu(x) - \partial_\mu\theta(x) \qquad \psi(x) \rightarrow e^{iq\theta(x)}\psi(x)$$

Where  $\theta$  is a generic function of the spacetime coordinate  $x$ .

d) [2 points] Define the curvature tensor (EM tensor) as

$$[D_\mu, D_\nu]\psi(x) = iqF_{\mu\nu}(x)\psi(x)$$

Where  $[A, B] = AB - BA$ . Using this tensor, express  $F_{\mu\nu}(x)$  in terms of  $A_\mu(x)$  and find how it transforms under the  $U(1)$  gauge transformation.

## 2 Deel 2

Vraag 2 was voor het begin van het examen geschrapt omdat anders het examen te lang zou zijn voor in 3 uur

### 2.1 Vraag 1

Bespreek de volgende gelijkenissen tussen quark-menging en neutrino menging: denk daarbij aan hoe het werd opgemerkt, wat de 'menging' is, hoe het wordt beschreven, wat de gevolgen ervan zijn voor hadronen en leptonen... en dit steeds in het licht van de gelijkenissen en verschillen. (max 2 pagina's)

### 2.2 Vraag 2

a) Vergelijk in de vorm van een tabel de belangrijkste eigenschappen van de sterke interactie en de EM interactie (max halve pag)

b) Licht het begrip 'kleur' voor quarks toe:

- Waarom werk het begrip ingevoerd?
- Waarom zijn er precies drie 'kleuren'?
- Dragen gluonen ook 'kleur'? Waarom wel/niet?
- Dragen fotonen ook 'kleur'? Waarom wel/niet?

(max 1 pag)

### 2.3 Vraag 3

Teken de Feynman-grafen (op quark niveau) voor de zwakke interactie processen hieronder.

Geef ook aan of het proces zuiver leptonisch, semi-leptonisch of hadronisch is, en of

het via een geladen of een neutrale stroom interactie verloopt.

$$\begin{aligned}\tau^+ \bar{\nu}_e &\rightarrow e^+ \bar{\nu}_\tau \gamma \\ \Lambda^0(uds) &\rightarrow p( uud) \mu^- \bar{\nu}_\mu \\ K^+(u\bar{s}) &\rightarrow \pi^+ \pi^- e^+ \nu_e \\ \pi^+(u\bar{d}) &\rightarrow e^+ \nu_e e^+ e^- \\ B^-(\bar{u}b) &\rightarrow p \bar{p} \pi^-(\bar{u}d)\end{aligned}$$