

## Antwoorden

Tentamen Stralingsprocessen 2009 - Vincent Icke  
14 januari 2009

---

*Op uw tentamenformulieren heb ik slechts zeer spaarzaam opmerkingen gemaakt, mede omdat het merendeel van de (sub)vragen direct is terug te vinden in het boek dat u mocht meenemen. Door vergelijking met onderstaande antwoorden kunt u zien waaraan ik de beoordeling heb opgehangen. In enkele gevallen zijn meer benaderingen mogelijk. Bij de beoordeling van varianten heb ik, evenals bij de 'hoofdvarianten' hier gegeven, gelet op de scherpte van de formulering en op volledigheid van het argument.*

---

(1).

---

Op het niveau van de wisselwerking tussen deeltjes luidt de verklaring als volgt. Een geladen fermion koppelt met een boson op een vertex. Aldus is dat boson de drager van de 'kracht' tussen fermionen. In het geval van het electromagnetisme is dat boson een foton. Als in een eerste-orde Feynman diagram de twee vertices zeer ver uiteen liggen (b.v. het ene in een ster, het andere in de ccd-detector van ene telescoop) is het tussengelegen foton een 'vrij' foton. Een stroom van zulke fotonen noemen we straling. Bij het uitzenden van zo'n foton op het ene vertex veranderen de impuls en de energie van het fermion. Kortom, het fermion wordt versneld. Zodoende is de uitzending van straling verbonden met de versnelling van een geladen deeltje.

Gezien vanuit het Maxwelliaanse 'veld' concept kunnen we als volgt redeneren. De lichtsnelheid  $c$  is invariant (Lorentz symmetrie). Daarom is  $c$  maximaal, en hoewel een snelheid weggetransformeerd kan worden, kan dat niet met een versnelling omdat het feit dat de snelheid veranderd is, vanaf een afstand  $r$  niet eerder kan worden waargenomen dan een tijd  $t = r/c$  nadat de verandering heeft plaatsgevonden (NB: pas op met  $t$ , hiermee wordt bedoeld de tijd in het coördinatenstelsel van de waarnemer). In de vorm van het waargenomen veld van het deeltje komt dit tot uiting doordat buiten de afstand  $r$  het veld niet hetzelfde meer is als binnen  $r$ . De 'sluitfout' tussen die twee zones heeft een vorm die afhangt van de manier waarop het deeltje versneld is (zie b.v. Fig.3.2 in Rybicki & Lightman – overigens geen geslaagde figuur). Die vorm plant zich naar buiten voort met snelheid  $c$ , en wordt op grote afstand van het deeltje waargenomen als straling.

(2).

---

Dit voorbeeld is in deze vorm geheel behandeld op het college.

**a.**  $dx/dt = -a\omega \sin(\omega t)$ ;  $dy/dt = b\omega \cos(\omega t)$ ;  $\omega\sqrt{a^2 + b^2} \ll c$ . Stralingsdiagram, zie R&L Fig.3.5. Larmorformule, R&L (3.19). Fouriergetransformeerde van sinus en cosinus zijn deltafuncties bij frequentie  $\omega$ .

**b.** De instantane snelheid doet er niet toe, want kan worden weggetransformeerd. Dus kan men de formules voor niet-relativistische straling gebruiken, en vervolgens weer transformeren naar het ruststelsel (zie R&L Fig.4.11).

c. De discussie van R&L paragraaf 6.2 kan vrijwel geheel worden overgenomen, behalve dan dat de versnelling niet meer exact loodrecht op de snelheid staat als  $a \neq b$ . Bijgevolg zal het stralingsdiagram een tussenvorm zijn tussen R&L Fig.4.11b en 4.11d, en wordt de berekening van de verschillen in padlengte en tijd (R&L (6.8,9,10)) wat ingewikkelder.

(3).

---

Zie R&L paragraaf 3.2.

a. De eerste term komt voort uit een afgeleide van de potentiaal naar de ruimtecoördinaten (vandaar de factor  $r^{-2}$ ), en de tweede uit een afgeleide naar de tijd (vandaar  $\partial\beta/\partial t$ ). Beide zijn nodig omdat we in een relativistische wereld te maken hebben met tijd-ruimte, niet met ruimte alleen.

b. De eerste term geeft het nabije elektrische veld, de tweede term domineert voor grote waarden van  $r$  en geeft dus het verre veld (stralingsveld).

c. Electrostatistische velden zijn dus alleen waarneembaar dicht bij de ladingen (denk b.v. aan de magnetosfeer van een planeet, ster of pulsar). De verre velden (straling) zijn dan de dominante vorm van contact met versnelde ladingen op grote afstand.

(4).

---

Zie R&L Fig.3.2 en vraag (1) hierboven. Dit is uitgebreid behandeld op het vragenuur.

a. Veldlijnen zijn niet fysisch. Een veldlijn is slechts een meetkundige figuur die ontstaat door het aaneen rijgen van vectoren die op ieder punt in de ruimte de instantane elektrische of magnetische kracht aangeven. Zodoende geven veldlijnen wel een min of meer betrouwbaar beeld van de krachten rondom statische elektrische of magnetische ladingen, maar niet als zich versnellingen voordoen.

b. Zie eerste helft van het antwoord op vraag (1). Daar werd niet expliciet gevraagd naar het Feynman-diagram, maar het mocht daar uiteraard wel gebruikt worden.

(5).

---

Direct te vinden in R&L paragraaf 3.3.

a. R&L (3.22,23): generalisatie van een deeltje naar som over veel deeltjes, aannemende dat de snelheden niet relativistisch zijn en dat de grootte van de bron klein is vergeleken met de golflengte van de straling.

b. Binnen een volume sommeren we alle ladingen, gewogen met hun positie. Dit is analoog aan het bepalen van het zwaartepunt van een eindige massa. De straling wordt dan berekend door de versnelling van dat 'ladingsmiddelpunt' te bepalen, zie R&L (3.23).

c. De snelheden mogen niet relativistisch zijn, ook niet na versnelling. Het volume waarover het 'ladingsmiddelpunt' wordt bepaald moet voldoende kleiner zijn dan de golflengte van de straling, en de hogere multipool-momenten (R&L (3.31)) moeten voldoende snel afnemen ten opzichte van de  $n = 0$  (dipool) term.