

In dit nummer twee artikelen. De eerste is van de hand van D. Oepts van het FOM Instituut voor Plasmafysica Rijnhuizen, die gelet op enkele overeenkomsten in het gedrag van elektronen en fotonen, in wil gaan op de vraag of er mogelijkheden zijn voor het versnellen van fotonen zoals dat met elektronen al gebeurt.

Het tweede artikel is van F.T.M. van den Berg van Applied Laser Technology, die een bijzondere sensor beschrijft voor het contactloos meten van afstanden en dikten

De sensor is bijzonder, omdat deze afwijkt van de gangbare triangulaire sensoren, die voor het contactloos meten gebruikt worden

---



---

## Bestaan er ook fotonenversnellers?

*D. Oepts, FOM-Instituut voor Plasmafysica Rijnhuizen, Associatie Euratom-FOM, Postbus 1207, 3430 BE Nieuwegein*

### 1. Inleiding; fotonen en elektronen

Licht kan in het algemeen uitstekend klassiek beschreven worden als een elektromagnetisch golfverschijnsel op basis van de Maxwellvergelijkingen. Alleen bij zeer lage intensiteiten of bij een gedetailleerde beschrijving van de interactie met microscopische systemen (atomen, moleculen, elektronen) moet de quantummechanica er aan te pas komen. Het is dan soms prakti-

schier om het licht voor te stellen als een stroom fotonen, deeltjes die met de lichtsnelheid van één plaats naar een andere vliegen en een energie  $\hbar\omega$  en impuls  $\hbar\omega/c$  bezitten.

Anderzijds weten we dat een elektron niet een klassiek deeltje is, maar in veel gevallen quantummechanisch beschreven moet worden en een zeker golfkarakter vertoont.

Voor mijn geveel blijft een foton wel meer een golfpakketje dan een 'echt' deeltje en een elektron meer een 'tastbaar' deeltje dan een verzameling golven, maar dat komt meer door de manier waarop ik voor het eerst van ze gehoord heb, dan door hun werkelijk gedrag. Wat het golf- of deeltjeskarakter betreft zijn fotonen en elektronen niet echt verschillend (afgezien van de spin) In een eerder artikel in dit tijdschrift heeft Lagendijk er al op gewezen dat soms de vergelijkingen die een bepaald elektro-nengedrag beschrijven precies dezelfde zijn als die die gelden voor fotonen in andere omstandigheden [1]. In dit stuk wil ik niet zo'n directe analogie behandelen, maar wel als het zo uitkomt fotonen beschrijven als echte deeltjes en hun gedrag in een bepaald geval vergelijken met dat van elektronen. In het bijzonder vragen we ons af of het mogelijk is om een machine te bouwen waarin fotonen versneld worden, zoals dat met elektronen wel gebeurt.

## 2. Snelle en langzame fotonen

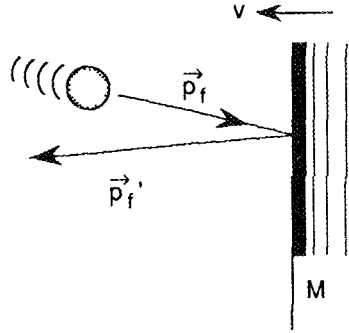
Iedereen weet, dat volgens de relativiteitstheorie de lichtsnelheid in vacuüm,  $c$ , de grootst mogelijke snelheid van een deeltje is, en aangezien fotonen al de lichtsnelheid hebben is het dus niet mogelijk om ze nog te versnellen. In een dielektricum is de snelheid van de fotonen wel kleiner dan  $c$ , maar als we het materiaal niet als een continuum voorstellen maar als discrete moleculen, atomen, of ionen met vacuüm ertussen, dan is alleen de effectieve snelheid of de driftsnelheid van de fotonen kleiner doordat ze tengevolge van herhaalde verstrooiing een langere weg moeten afleggen. Het is dus niet mogelijk, zoals u natuurlijk al wist, om fotonen te versnellen in de gewone zin van ze een grotere snelheid te geven. Met elektronen is dat anders, die kunnen zowel kleine als grote snelheden hebben en ze kunnen dus ook versneld worden. Omdat ze zo licht zijn, is er niet veel voor nodig om hun snelheid in de buurt

van de lichtsnelheid te brengen. In plaats van de klassieke mechanica geldt dan de relativistische, en er is steeds meer energie nodig om nog een heel klein beetje snelheidsvermeerdering te krijgen. Een elektron met een energie van 10 MeV bijvoorbeeld heeft als een snelheid die ca 99.9% van de lichtsnelheid is, zodat er niet erg veel meer te versnellen valt Toch bestaan er grote elektronenversnellers waar de elektronen al met meer dan 10 MeV geïnjecteerd worden, zodat de snelheid aan het eind nooit meer dan een paar tienduizendsten van de beginsnelheid groter kan zijn geworden. Als het echt om de snelheid zou gaan zou zo'n machine weinig zin hebben. Wat belangrijk is, is dat de elektronen, ook al wordt hun snelheid praktisch niet groter, meer energie en impuls krijgen en daardoor bruikbaar worden voor bepaalde interessante experimenten. Hetzelfde geldt voor versnellers van andere deeltjes. Op die manier zouden we kunnen zeggen dat we fotonen versnellen als er we er in slagen om ze een grotere energie te geven. In die zin lijkt een fotonenversneller niet bij voorbaat onmogelijk. Via de relatie  $E = \hbar\omega$  betekent een hogere energie voor het foton ook een hogere frequentie, zodat het bijbehorende elektromagnetische veld sneller wisselt; dat kan ook een reden zijn om het een sneller foton te noemen.

## 3. Mechanica van fotonen en elektronen

De vraag is nu: kunnen we de energie van fotonen vermeerderen? Men zou hierbij kunnen denken aan lichtversterking in een laser: het actieve medium staat energie af aan de lichtbundel. Dat is echter niet wat we zoeken, want de intensiteit van de lichtbundel neemt wel toe, maar niet omdat de afzonderlijke fotonen meer energie krijgen; er worden alleen veel meer van dezelfde fotonen aan de bundel toegevoegd. Een laser is dus niet een fotonen versneller maar een fotonen vermenigvuldiger. In dit op-

zicht lijken fotonen heel verschillend van elektronen: fotonen kan je er gemakkelijk bijmaken en weer laten verdwijnen, terwijl elektronen gewoonlijk alleen uit een materiaal komen waar ze al in zaten, en ook niet zo maar weer verloren gaan. Toch is dat ook maar een kwestie van interpretatie; van een foton dat geabsorbeerd wordt hoeven we niet te zeggen dat het niet meer bestaat; het zit gebonden in een molecuul of atoom, en kan later weer worden uitgezonden. Aan de andere kant zijn de elektronen in een vaste stof ook niet meer zo eenvoudig te herkennen als afzonderlijke deeltjes.



Figuur 1  
 Terugkaatsing van een foton ( $p_f = \hbar\omega/c$ ,  $E_f = \hbar\omega$ ) door een zwaar voorwerp ( $p_M = Mv$ ,  $E_M = p_M^2/2M$ )

Bij een optisch gepompte laser zou men kunnen zeggen dat de pomp-fotonen als laser-fotonen weer worden uitgezonden. Ook dan is het nog geen fotonenversneller, want de pomp-fotonen hebben altijd een hogere energie dan de laser-fotonen. Hoe kan je dan wel een foton meer energie geven? In principe is dat eenvoudig genoeg: geef er een klap tegen! Omdat een foton al met de lichtsnelheid loopt lukt het niet om het een duw in de rug te geven, want je haalt het nooit in, maar dat hoeft ook niet: impulsoverdracht is ook mogelijk door het terug te slaan als een bal, zie Fig. 1. Bij een klassieke elastische botsing zou, bij loodrechte inval, de absolute waarde van de snelheid van de bal toenemen met tweemaal de snelheid van het slaghout, als de massa van de eerste veel kleiner is dan van het laatste. Een foton is geen klassiek deeltje, maar de behoudswetten van energie en impuls blijven gelden, en als  $E_f = \hbar\omega \ll Mc^2$  is eenvoudig uit te rekenen dat  $E'_f/E_f = (1 + v/c)/(1 - v/c) \approx 1 + 2v/c$ . Dezelfde uitdrukking hadden we kunnen vinden door het gebeuren in Fig. 1 te beschouwen als terugkaatsing van licht tegen een bewegende spiegel, waarbij de frequentie verandert tengevolge van het Doppler-effect. Het is dus heel eenvoudig om met een spiegeltje een foton te versnellen, alleen het effect is erg klein omdat  $v$  altijd zeer veel kleiner is dan  $c$ . Met een

interferometer, waarin het gereflecteerde licht met een deel van de oorspronkelijke bundel interfereert, is het frequentieverval wel makkelijk te zien in de vorm van bewegende interferentielijnen, maar als we niet zouden weten van het golfkarakter van het licht, zou het effect van de energieverandering onmeetbaar klein zijn. Om het effect groter te maken, zouden we de fotonen tussen twee naast elkaar toe bewegende spiegels heen en weer kunnen laten lopen. De moeilijkheid daarbij is dat de kwaliteit van de spiegels wel erg goed moet zijn om de fotonen zonder problemen vaak genoeg te laten reflecteren. In plaats van een relatief langzaam bewegende spiegel om de fotonen mee terug te slaan, zouden we iets moeten hebben dat kan bewegen met een snelheid die niet verwaarloosbaar is vergeleken met de lichtsnelheid. Elektronen, die gemakkelijk voldoende versneld kunnen worden, komen daarvoor in aanmerking. Ook voor een elektron geldt nog dat  $m_e c \gg \hbar\omega/c^2$  zolang we niet met röntgenfotonen te doen hebben, zodat de energie-

verandering van het foton nog steeds gegeven wordt door  $E_f'/E_f = (1 + v/c)/(1 - v/c)$ , alleen is nu niet  $v \ll c$ . Het is in dat geval gebruikelijk de parameters  $\beta = v/c$  en  $\gamma = E_e/mc^2 = (1 - \beta^2)^{-1/2}$  in te voeren, waarmee we kunnen schrijven  $E_f'/E_f = (1 + \beta)/(1 - \beta) = (1 + \beta)^2/(1 - \beta^2) \approx 4\gamma^2$  als  $\beta \approx 1$ . Voor elektronen van bijvoorbeeld 10 MeV is  $\gamma \approx 20$ , zodat het verstrooide foton dan in één klap een maar liefst 1600 keer grotere energie krijgt dan het invallende. Vertaald naar het spectrum betekent dat een golflengteverschuiving naar het nabije infrarood. Zulke (inverse Compton-)verstrooiing speelt een rol in astrofysische processen. In het laboratorium is er een moeilijkheid als we niet alleen geïnteresseerd zijn in het principe maar ook enige efficiëntie willen. De kans op een botsing tussen een foton en een elektron is namelijk uiterst klein. De totale werkzame doorsnede voor foton-elektron verstrooiing is  $\sigma_T = 66 \times 10^{-30} \text{m}^2$ . Als we een elektronendichtheid  $n_e (\text{m}^{-3})$  hebben waar een fotonflux  $N_f (\text{s}^{-1})$  invalt, is het aantal fotonen dat verstrooid wordt binnen een afstand  $L (\text{m})$  gelijk aan  $N_S = N_f n_e \sigma_T L (\text{s}^{-1})$ . Voor een bundel elektronen met vrijwel de lichtsnelheid en met een stroomdichtheid  $J (\text{A/m}^2)$  is  $n_e = J/e c$ , zodat we hebben  $N_S/N_f = J \sigma_T L / ec \approx 10^{-18} J L$ . Om een enigszins acceptabele opbrengst aan verstrooide fotonen te krijgen moet  $J$  of  $L$  dus wel astronomisch groot zijn.

Dat er toch nog hoop is, kunnen we zien door het licht weer als golfverschijnsel te bekijken. De Compton-verstrooiing kan dan gezien worden als het gevolg van een door de invallende golf geïnduceerde oscillatie van het elektron, die op zijn beurt aanleiding geeft tot het uitzenden van een secundaire golf. Als de elektronen willekeurig verdeeld zijn in het verstrooiingsvolume, worden de door de verschillende elektronen verstrooide golven met willekeurige fasefactoren opgeteld, zodat er geen netto interferentie-effect overblijft. Het gevolg is

dat de intensiteit (d.w.z. het aantal fotonen) van de totale verstrooiing de som wordt van de intensiteiten van de afzonderlijke verstrooiingsprocessen. Anders wordt het, als de elektronen een systematische dichtheidsvariatie (of plaatscorrelatie) vertonen. De fasen zijn dan niet meer random verdeeld en bij het optellen van de deelgolven kan constructieve of destructieve interferentie optreden. Men kan zeggen dat de fotonen niet meer verstrooid worden door de afzonderlijke elektronen, maar door een met de dichtheidsvariatie overeenkomend rooster (vgl. Bragg-reflectie). Een invallende golf wordt bijvoorbeeld sterk teruggestrooid door een dichtheidmodulatie met periode  $d = \lambda/2$  in de voortplantingsrichting. Als alle  $N_e$  elektronen in het strooi-volume in dezelfde fase zouden verstrooien, zou de resulterende amplitude evenredig met  $N_e$  zijn en de intensiteit met  $N_e^2$  in plaats van met  $N_e$  zoals bij incoherente verstrooiing. Aangezien  $N_e$  een zeer groot getal kan zijn, kan de verstrooiing al veel sterker zijn dan de incoherente ook als er nog lang geen volledige coherentie is.

De vraag is natuurlijk hoe zo'n dichtheidsmodulatie op de schaal van een golflengte teweeg gebracht kan worden. Als de elektronen vrij kunnen bewegen komt de natuur ons hier te hulp, want dan kan de straling zelf zorgen voor het ontstaan van het dichtheidsrooster. Twee tegen elkaar in lopende golven van dezelfde frequentie vormen een staande-golf patroon. De stralingsdruk of de ponderomotorische kracht zorgt er dan voor dat de elektronen bij voorkeur op de knooppvlakken van het veld gaan zitten. Dat geeft precies de dichtheidsmodulatie die de verstrooiing van de golven versterkt. De vrije elektronen vormen een optisch niet-lineair medium, waarin een zelf geïnduceerd rooster kan ontstaan. We zijn er hier even vanuit gegaan dat de elektronen gemiddeld geen noemenswaardige snelheid hebben, dus als ze als geheel in een bundel bewegen dan geldt het voorgaande in een meebewegend coördinatenstelsel.

Om de daarmee corresponderende situatie in het laboratoriumstelsel te zien moeten we de benodigde Lorentz-transformaties maken. De met de bundel mee en de tegen de bundel in lopende golven hebben dan frequenties die zich verhouden volgens de relativistische Doppler-formule zoals we die eerder hadden voor invallende en teruggekaatste fotonen. De laagfrequente, langzame, fotonen worden door de elektronen terug verstrooid als snelle fotonen met ook precies de juiste frequentie om met de oorspronkelijke golf een interferentie patroon te geven dat met de snelheid van de bundel loopt en daarin een meebewegende dichtheidsmodulatie teweegbrengt. Op deze manier kan het oorspronkelijke effect versterkt worden, we hebben te maken met gestimuleerde Compton-verstrooiing. Het is dan niet alleen mogelijk om fotonen te versnellen, maar ook om te zorgen dat dat met een redelijke fractie van de fotonen gebeurt.

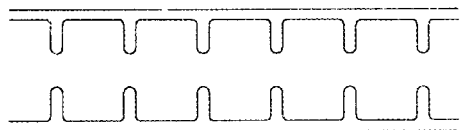
De praktische toepassing is overigens niet zo eenvoudig, omdat de ponderomotorische kracht bijzonder zwak is, zodat de intensiteit van de invallende bundel erg groot moet zijn om het effect op gang te brengen. De vrije-elektronen laser geeft een oplossing voor dat probleem, maar alvorens die te bespreken zullen we een omweg maken langs elektronenversnellers en microgolf oscillatoren.

#### 4. Elektronenversnellers; elektronen en golven in periodieke structuren

Elektronen zijn gemakkelijk te versnellen doordat ze een elektrische lading hebben. In een elektrisch veld krijgt een vrij elektron 'vanzelf' een kinetische energie evenredig met het doorlopen potentiaalverschil. Het versnellen met een statisch veld moet echter beperkt blijven tot een tiental MeV, omdat hogere gelijkspanningen onhanter-

baar worden. Om elektronen meer energie te geven gebruikt men een wisselspanning. Dat kan, omdat het elektron beweegt en op tijd ergens anders is als het veld van richting omkeert. Men kan het elektron een aantal keren langs dezelfde plaats laten komen en het daar steeds even versnellen, of men laat het elektron rechthoekig gaan en zorgt dat het regelmatig of voortdurend een veld aantreft dat op dat ogenblik juist de goede richting heeft. In het laatste geval wordt het elektron als een surfer op een golf meegenomen. Op deze manier kan een elektron in een redelijke veldsterkte over een grote afstand versneld worden, althans meer energie krijgen. Een gewone elektromagnetische golf lijkt hiervoor in aanmerking te komen, maar helaas, zo'n golf heeft alleen een transversaal veld, terwijl het versnellende veld longitudinaal zou moeten zijn.

Men kan de golf een longitudinale component geven door hem in een golfpijp te laten lopen, maar tegelijk wordt dan de fasesnelheid groter dan  $c$ , zodat het elektron, al heeft het praktisch de lichtsnelheid, al snel in een verkeerde fase van de golf terecht komt. Dit probleem is op te lossen door de golfpijp te voorzien van een periodieke structuur. In Fig. 2 is een mogelijke uitvoering geschetst: de golfpijp kan hier gezien worden als opgedeeld in gekoppelde trielholten. De golfpatronen in de ver-



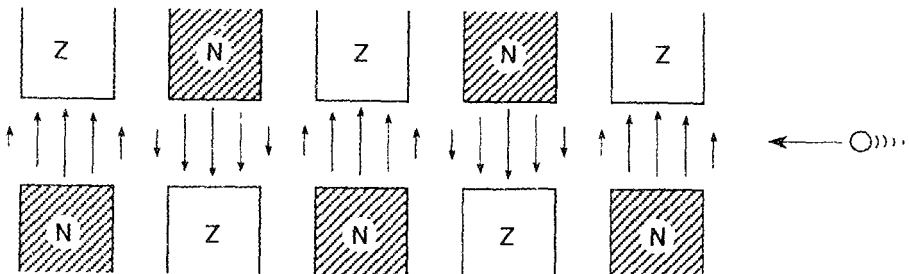
Figuur 2  
Schematische voorstelling van een golfpijp met een periodieke structuur om de fasesnelheid te verkleinen

schillende trilholten zijn via de gaten zodanig gekoppeld dat de fasen in opeenvolgende cellen juist zo zijn dat een langs de as vliegend elektron steeds de gewenste veldrichting voelt. Op deze manier kunnen in zulke lineaire versnellers (LINACS) elektronen tot honderden MeV 'versneld' worden, aangedreven door velden met frequenties in het GHz gebied. We kunnen zeggen dat de fotonen die de RF voeding in de golfpijp stuurt, de elektronen versnellen. Omgekeerd kunnen de elektronen ook energie afstaan aan het veld; het hangt af van de positie van een elektron ten opzichte van de fase van de golf of het wordt versneld of juist afgeremd. Op een analoge wijze kan men dus een elektronenbundel gebruiken om elektromagnetische golven op te wekken of te versterken in zo'n periodieke structuur. Microgolfbuizen zoals lopende-golf buizen en magnetrons werken op een dergelijke manier. De opgewekte frequentie wordt daarbij bepaald door de afmetingen van de resonantiestructuur; het is daardoor moeilijk om deze techniek door te trekken naar golf lengten korter dan enige millimeters.

Er is een andere manier om elektronen te laten koppelen met een elektromagnetische golf. In plaats van de golf een longitu-

dinale component te geven, geeft men het elektron een transversale oscillatie. Als deze oscillatie een vaste faserelatie heeft met de golf kan er weer energie uitgewisseld worden. In een gyrotron bijvoorbeeld wordt de transversale beweging in stand gehouden door een longitudinaal magneetveld waarin de elektronen in een schroefbaan lopen door de combinatie van translatiesnelheid en cyclotronbeweging. Een andere mogelijkheid is het gebruik van een undulator, een afwisseling van tegengesteld gerichte magneten (zie Fig. 3), waardoor het elektron periodiek iets van zijn rechte baan wordt afgebogen. Het voordeel van deze systemen is dat de golf zich vrij, of 'quasi-optisch', kan voortplanten, er is geen speciale structuur op de schaal van de golf lengte nodig

In alle genoemde gevallen van energieuitwisseling is de onderlinge positie of fase van elektronen en golf van belang. Om alleen energie van de golf naar de elektronen te laten gaan of andersom, moeten alle elektronen ongeveer dezelfde positie ten opzichte van de golf hebben. Voor een homogene, continue elektronenbundel is dat niet het geval. Soms kan aan de eis voldaan worden door alleen op de juiste momenten elektronen te injecteren zoals in

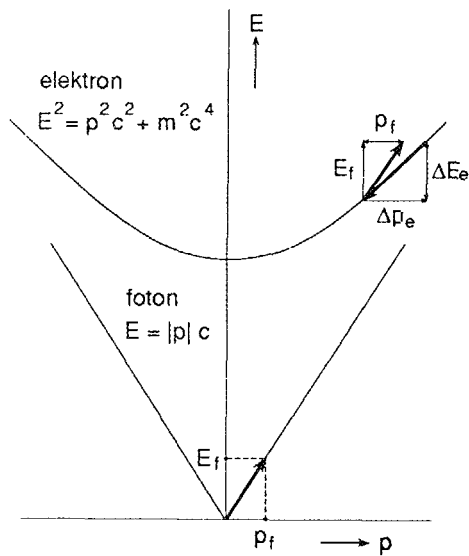


Figuur 3

Schematische voorstelling van een undulator. Het elektron wordt periodiek afgebogen loodrecht op het vlak van de tekening

LINACs gebeurt. In de andere gevallen ontstaat de benodigde 'bunching' via de ponderomotorische kracht doordat al een golf van de juiste frequentie aanwezig is: Deze golf kan eventueel in een resonator uit de ruis zijn opgebouwd.

De energie van de in zo'n oscillator opgewekte golf komt in eerste instantie uit de transversale beweging van de elektronen. Via de externe structuur die deze oscillatie exciteert, wordt die transversale energie op zijn beurt onttrokken aan de longitudinale translatie energie van de elektronen



Figuur 4  
E-p diagram voor vrije elektronen en fotonen. Het elektron kan het foton met  $E_f = -\delta E_e$  niet uitzenden omdat dan niet voldaan wordt aan het impulsbehoud

### 5. Fotonen in versnellers en oscillatoren

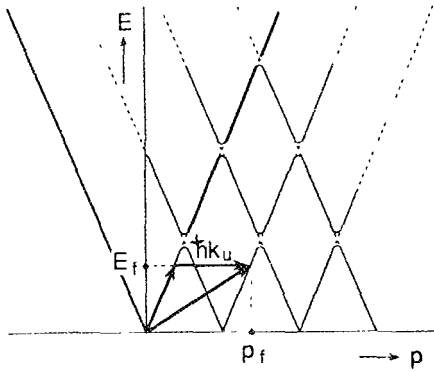
We zullen nu het voorgaande bekijken vanuit het gezichtspunt van de straling als bestaande uit fotonen.

Dat een vrij elektron geen energie kan uitwisselen met een transversale golf betekent in het deeltjesbeeld dat een vrij elektron geen vrij foton kan absorberen of emitteren. Dit is te verklaren uit de behoudswetten voor energie en impuls. De relativistische relatie tussen energie en impuls voor het elektron is  $E_e^2 = p_e^2 c^2 + m_e^2 c^4$ , terwijl voor het foton, dat geen rustmassa heeft, geldt  $E_f = \Delta p_f \Delta c$  (zie Fig 4). Als het elektron van  $E_e$  naar  $E_e - \Delta E_e$  zou gaan onder uitzending van een foton met  $E_f = \Delta E_e$ , dan blijft er impuls over, want  $\Delta p_e \approx 1/\beta c \Delta E_e < \Delta E_e$ , terwijl  $p_f = 1/c \Delta E_e$ . Of andersom geredeneerd: er is niet genoeg energie om een foton te maken dat de impulsverandering van het elektron meeneemt. Het is voor een elektron toch niet zo eenvoudig om zomaar uit het niets een foton te maken.

(In een dielektricum waar voor de fotonen geldt  $E_f = \Delta p_f \Delta c/n$  kan het impulsbehoud voor elektronen met  $\beta \geq 1/n$  wel kloppend gemaakt worden; er kunnen dan Cerenkov-fotonen worden uitgezonden onder een hoek  $\theta$  met de elektronenbeweging waarbij  $\cos \theta = 1/n$ . Ik laat dat verder buiten beschouwing.)

In een golfpijp is een foton alleen nog vrij in de longitudinale richting, in de transversale richting is de impuls niet behouden.  $E_f$  geldt dan.  $E^2 = p^2 c^2 + E_n^2$ , waarin p de impuls in de longitudinale richting is en  $E_n$  de (gequantiseerde) transversale energie. Met zo'n foton is nog moeilijker tegelijk te voldoen aan het energie- en (longitudinale) impulsbehoud, want bij dezelfde E is p nu nog kleiner. Als de fotonen in de voortplantingsrichting ook niet meer helemaal vrij zijn, maar gestoord worden door een periodieke structuur zoals in Fig. 2, dan is ook de lon-

gitudinale impuls niet meer echt behouden, deze is dan alleen nog bepaald tot op een veelvoud van  $\hbar k_U$ , waarin  $k_U = 2\pi/\lambda_U$  en  $\lambda_U$  de periodelengte van de structuur is. De E-p relatie ziet er dan ongeveer uit zoals in Fig 5, net als voor een bijna vrij elektron in een periodieke potentiaal. In zo'n structuur is het wel mogelijk om een foton te creëren of absorberen met passende energie en impuls; het impulsverschil wordt goedge maakt met één of meer eenheden  $\hbar k_U$ , die eigenlijk geleverd of opgenomen worden door de externe structuur.



Figuur 5  
E-p diagram voor fotonen in een periodieke longitudinale structuur. Een foton kan een extra impuls  $\hbar k_U$  opnemen of afstaan.

De andere methode, waarbij het elektron een transversale oscillatie uitvoert, komt ongeveer op hetzelfde neer. Nu is het foton vrij maar ondervindt het elektron een uitwendige periodieke kracht, waardoor een extra impuls  $\hbar k_U$  kan worden overgedragen. In het geval van het gyrotron is er geen periodieke structuur, de Lorentzkracht verandert periodiek van richting door de beweging van het elektron zelf. We

kunnen hier zeggen dat het elektron een transversale energie heeft met niveaus op afstanden  $\hbar\omega_{\text{gr}}$ ,  $\zeta\alpha\alpha_{\text{gr}}\omega_c$  de (relativistische) cyclotronfrequentie is. In dit geval wordt niet de impuls maar de energie aangepast om een passend foton te kunnen uitzenden

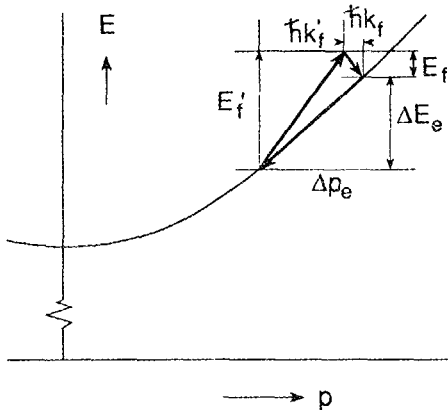
In het geval van de periodieke structuur kunnen we de energie van het passende foton gemakkelijk berekenen. Er hoeft dan geen longitudinaal veld te zijn, dus in de transversale richting kan het foton praktisch vrij zijn, zodat  $E_f = \Delta p_f^* \Delta c$ , met  $p_f^* = p_f \text{ mod } (\eta\hbar k_U)$  wegens de longitudinale periodiciteit. Met  $E_f = \Delta E_{\theta} \approx \beta c \Delta p_{\theta}$  en  $p_f^* + n\hbar k_U = \Delta p_{\theta}$  vinden we dan

$$E_f = \hbar k_U c / (1 - \beta) = \hbar k_U c (1 + \beta) / (1 - \beta^2) \approx 2\gamma^2 \hbar k_U c \text{ als } \beta \approx 1$$

Voor de bijbehorende golflengte geldt dus:  $\lambda_f = 2\pi c / \omega_f = 2\pi \hbar c / E_f = \lambda_U / 2\gamma^2$ . De verhouding tussen de golflengte van het uitgezonden foton en de golflengte van de periodieke structuur is op een factor twee na dezelfde als de verhouding tussen de golflengten van het Compton-verstrooide foton en van het invallende foton in paragraaf 4. In Fig. 6 is dat geval ook in een E-p diagram weergegeven. Het enige verschil tussen de periodieke structuur en het invallende foton in het laatste geval is dat de vector die het impuls- en energiebehoud goed maakt in het ene geval horizontaal staat en in het andere onder een hoek die met de lichtsnelheid correspondeert. Dit is ook de oorzaak van de factor twee (eigenlijk  $1 + \beta$ ) verschil.

Hiermee zijn we bijna terug bij de vrije-elektronen laser, en aan het eind van de omweg.





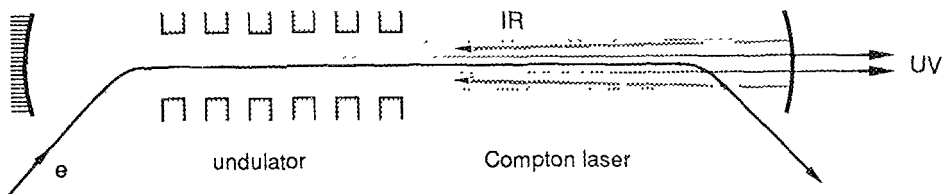
Figuur 6  
E-p diagram voor (inverse) Compton-verstrooiing van een foton door een elektron

## 6. Vrije-elektronenlasers, fotonenversnellers en fotonentransformatoren

Rond 1970 opperde Madey een idee om de hoge invallende stralingsintensiteit te omzeilen die nodig is om gestimuleerde Compton-verstrooiing te krijgen [2]. Voor relativistische elektronen zien elektromagnetische velden er anders uit dan voor ons in het laboratoriumstelsel. De Lorentz-transformaties die voor de vertaling zorgen, maken dat elektrostatistische velden in het ruststelsel ook magnetische velden te zien geven in het bewegende stelsel, terwijl pure magnetische velden ook tot elektrische velden aanleiding geven. Als men nu de transformatie uitvoert voor een ruimtelijk periodiek wisselend maar statisch magnetisch veld, zoals van de undulator in Fig. 3, dan blijkt het getransformeerde veld er uit te zien als een transversale elektromagnetische golf, op een correctie na die klein wordt als  $\beta$  naar 1 gaat. Voor de elektronen werkt het undulatorveld dus als een tegemoetkomende stroom fotonen. Omdat het

niet zo moeilijk is om een redelijk sterk magnetisch veld te maken, kan de intensiteit van deze fotonenbundel buitengewoon groot zijn. We kunnen zeggen dat de undulator een reservoir is van virtuele fotonen die wij niet zien omdat ze statisch zijn, maar voor een elektron dat er met de lichtsnelheid doorheen vliegt zijn het gewone fotonen die verstrooid kunnen worden. De verstrooiing kan weer gestimuleerd worden door passende geïnjecteerde of eerder geproduceerde fotonen. Madey gaf ook de experimentele bevestiging van zijn theorie en noemde het resultaat een vrije-elektronen laser. De vrije-elektronen laser heeft twee bijzonder aantrekkelijke eigenschappen. Ten eerste kan de output golflengte in principe willekeurig gekozen worden door de  $\gamma$  van de elektronen en de  $\lambda_U$  van de undulator geschikt te kiezen. Ten tweede kan het laservermogen zeer hoog zijn door dat het primaire vermogen in de elektronenbundel groot kan zijn, terwijl het ongebruikte vermogen niet in de laser zelf gedissipeerd hoeft te worden. De overtollige energie verlaat de laser met de elektronen zo snel als het licht en kan op een veilige plaats gedempt of zelfs teruggewonnen worden.

Is dit nu een fotonenversneller? Ik heb eerder gezegd dat een laser er alleen maar fotonen bij maakt in plaats van gegeven fotonen te versnellen. Dat geldt ook voor de vrije-elektronen laser, tenzij we zeggen dat we uitgaan van de virtuele fotonen die aanvankelijk geen netto snelheid hebben en vervolgens door de elektronen versneld worden. Wel een echte fotonenversneller is de twee-traps vrije-elektronen laser [4]. Omdat de vrije-elektronen laser zo'n intense bundel fotonen kan leveren, is er nu een mogelijke bron voor de pomp-fotonen van een Compton-laser. Het is zelfs mogelijk om dezelfde elektronen daar nog eens bij te gebruiken. In Fig. 7 is zo'n twee-traps laser schematisch aangegeven: in het eerste



Figuur 7  
Schematische voorstelling van een twee-traps vrije-elektronen/Compton laser

deel wordt met een undulatormagneet een intense ver-infrarood bundel gegenereerd, die na terugkaatsing door de rechter eindspiegel de elektronen weer tegenkomt en daarbij samen met de heengaande bundel aanleiding geeft tot gestimuleerde Compton-verstrooiing, met energetische ultraviolet-fotonen als resultaat. Hoewel zo'n apparaat nog niet echt gebouwd is, kunnen we toch wel zeggen dat een fotonenversneller hiermee mogelijk is geworden.

Hoewel Madey zijn vrije-elektronen laser quantummechanisch als een 'echte' laser beschreef, bleek later dat deze ook geheel klassiek behandeld kan worden en zelfs dat hij eigenlijk al bestond, tenminste in een niet-relativistische versie: het ubitron [3]. Het ubitron is een microgolf oscillator uit de familie van de elektronenbundels met transversale elektronen oscillatie (zie paragraaf 4).

De elektronenbundel voor een vrije-elektronen laser wordt vaak geleverd door een LINAC. Zoals we in paragraaf 4 gezien hebben, is zo'n versneller ook verwant aan het ubitron en dus aan de vrije-elektronen laser, alleen werkt hij andersom, de fotonen versnellen de elektronen. De combina-

tie van een LINAC en een vrije-elektronen laser werkt eigenlijk als een fotonentransformator er gaan RF fotonen in en er komen optische fotonen uit, waarbij de elektronen voor de energie-overdracht zorgen. Het is zelfs in principe mogelijk de beide periodieke structuren, die van de LINAC resonatoren en die van de undulator, dezelfde periode te geven en te integreren, zodat de beide delen in elkaar geschoven worden. De elektronen worden dan tegelijk versneld door de RF-fotonen en vertraagd door de undulator fotonen, of: de RF-fotonen worden door de structuur inclusief de elektronenbundel getransformeerd van langzame naar snelle fotonen. Men kan met dit soort transformaties nog een tijdje doorgaan, want een intense laserbundel kan weer gebruikt worden om zeer grote veldsterkten te genereren, bijvoorbeeld in een plasma, waarin dan weer elektronen tot extreme energieën versneld kunnen worden. Aan de andere kant zijn de RF fotonen ook weer gegenereerd in een klystron met behulp van een (langzame) elektronenbundel.

## 7. Besluit

Net zo goed als relativistische elektronen kunnen fotonen nog versneld worden in die zin dat ze meer impuls en energie krijgen. We hebben gezien dat er een uitgebreide familie van apparaten bestaat waarin fotonen energie uitwisselen met de translatie-energie van een bundel elektronen. Afhankelijk van de toepassing worden de elektronen versneld of vertraagd door de fotonen, die daarbij energie verliezen of winnen.

Door het massaverschil is er een asymmetrie in het effect van botsingen tussen elektronen en fotonen. Om een elektron noemenswaardig van energie te laten veranderen zijn heel veel fotonen nodig; in een elektronenversneller legt het elektron een lange weg af en wordt het met veel kleine beetjes versneld. Voor de fotonen die versneld of vertraagd worden door elektronen is het daarentegen alles of niets; in één klap kan een foton al zijn energie verliezen, het wordt geabsorbeerd of 'komt tot stilstand', of in een ander geval krijgt het zoveel meer energie dat het een nieuw foton lijkt. Dat een foton een groot aantal keren na elkaar wordt versneld komt niet voor. Een machine waarin fotonen versneld worden op een overeenkomstige manier als elektronen bestaat dan ook niet.

Als we ook virtuele, 'stilstaande', fotonen meetellen bestaan er wel fotonenversnellers in de vorm van lopende-golf buizen en vrije-elektronen lasers.

Een Compton-laser waarin reële fotonen versneld worden bestaat nog niet, maar waarschijnlijk zal dat niet lang meer duren.

## Literatuur

- [1] A. Lagendijk 'Lokalisatie van licht', Ned. Tijdschr. v. Fotonica **15** (6), december 1989, p. 7-17.
- [2] J.M.J. Madley, 'Stimulated emission of bremsstrahlung in a periodic magnetic field, J. Appl. Phys. **42** 1906-1913 (1971).
- [3] R.M. Philips, 'History of the ubitron', Nucl. Instr. and Meth **A272** 1-9 (1988).
- [4] L.R. Elias 'Free-electron laser research at the University of California, Santa Barbara', IEEE J. Quantum Electron. **QE23** 1470-1475 (1987)
- [5] G. Dattoli, A. Renieri, 'Experimental and theoretical aspects of the free-electron laser, in Laser Handbook Vol 4, M.L. Stitch and M. Bass, eds., North-Holland, Amsterdam 1985.
- [6] A. Friedman, A. Gover, G. Kurizki, S. Ruschin, A. Yariv, 'Spontaneous and stimulated emission from quasifree electrons', Rev. Mod. Phys. **60** 471-535 (1988)