

### Algemene relativiteitstheorie

Om meer over de zwaartekracht te weten te komen gaan we toch nog maar eens terug naar Albert Einstein, nu naar zijn **algemene relativiteitstheorie!** In hoofdstuk 5 heb ik al kort verteld dat hieraan een gedachte-experiment van Einstein over een lift ten grondslag ligt. Daar ik intussen nog steeds (te) weinig van het fenomeen zwaartekracht snap, ben ik nog maar eens in het gedachtegoed van onze vriend Albert gedoken. Einsteins gedachte-experiment gaat als volgt:

Stel voor: je bevindt je in een lift van een hoog gebouw en je daalt met een zekere, constante, snelheid omlaag. Dan gebeurt er iets: je merkt plotseling dat je niets meer weegt en dat ook eventuele andere voorwerpen in de lift ineens gewichtloos zijn: alles zweeft! Wat is er gebeurd?

Er zijn nu twee mogelijkheden:

-De kabel is gebroken en de lift is in een vrije val geraakt.

Of.....

-De zwaartekracht is plotseling uitgeschakeld!

Hoewel dat laatste zeer onwaarschijnlijk is, bestaat er voor de persoon in de lift **geen enkele manier** om door middel van metingen vast te stellen of men nu vrij valt doordat de kabel gebroken is of ... dat de zwaartekracht is uitgeschakeld! Je kunt namelijk niet naar buiten kijken. Na enige tijd zal je het natuurlijk wel merken! Einstein zal dit idee wel in een lift gekregen hebben, toen nog niet beseffende dat deze gedachte later een revolutionaire theorie tot gevolg zou hebben!

We kunnen z'n gedachtegang ook anders verwoorden: Stel, je bevindt je in een afgesloten kamertje, zonder ramen, en alles is "normaal". Je hebt gewoon "gewicht", evenals alle andere voorwerpen in het kamertje. Ook nu zijn er weer twee mogelijkheden: je bevindt je in een "zwaartekrachtveld" van één of ander hemellichaam of ..... je bevindt je in de "ruimte", buiten bereik van wat voor zwaartekracht dan ook, maar .... je hokje wordt versneld (dus niet eenparig) voortbewogen door de één of andere kracht, een "sleepraket" bijvoorbeeld! Bedenk wel, het is een "gedachte-experiment! Is de versnelling als gevolg van genoemde kracht, gelijk aan de valversnelling "g" op aarde, dan is je "gewicht" en dat van de eventueel aanwezige voorwerpen ook weer gelijk aan dat op aarde.



Fig 12.1 Einsteins kamertje

Er is al uitgebreid over geschreven en gerekend in een eerder hoofdstuk, maar deze aardse zwaartekrachtversnelling bedraagt ongeveer 10 "meter per seconde kwadraat", inhoudende dat de valsnelheid elke seconde met 10 meter toe zal nemen. Deze aardse zwaartekrachtversnelling wordt "g" genoemd. Preciezer bedraagt hij:  $9,81 \text{ m/sec}^2$ . Op de maan is de zwaartekracht veel kleiner en is de valversnelling slechts  $1,62 \text{ m/sec}^2$ , daar weegt een persoon van 90 kg (op aarde) dan slechts 14,9 kg (ongeveer een zesde van het aardgewicht).

Terug naar ons kamertje, wat voor conclusies trok Einstein uit dit denkwerk? Belangrijk is de constatering dat er geen enkel meetinstrument is, waarmee men binnen in het kamertje vast kan stellen of men zich nu versneld voortbeweegt of dat men zich in een gebied met zwaartekracht bevindt! Er is dus geen verschil tussen zwaartekracht veroorzaakt door een versnelling of door een grote massa (zoals de aarde). Albert Einstein ging eens flink over dit onderwerp nadenken en kwam uiteindelijk op zijn “Algemene Relativiteitstheorie”, die niet over eenparige bewegingen, maar juist over versnelde bewegingen en zwaartekracht handelt. Zijn uitgangspunt was: zwaartekracht kan zowel door een massa als door een versnelling veroorzaakt worden: ”het equivalentiebeginsel”.

Het begrip zwaartekracht is er intussen niet eenvoudiger op geworden. Het is echt een kracht, maar hoe wordt deze overgebracht? Volgens Albert Einstein is het geen aantrekkende kracht, maar zou een zekere massa de ruimte ter plaatse “krommen”. Daardoor zullen bewegende voorwerpen die kromming volgen. Maar... hoe moeten we ons een gekromde ruimte voorstellen, hoe rijmt dit zich met dit alles? Dat eerder genoemde rubberdoek met die biljartbal is tweedimensionaal! Maar driedimensionaal?

Volgens mij zag Einstein zelf het ook niet meer zo zitten en ging op zoek naar z'n “algemene velden” theorie, waarmee hij wilde trachten om alle krachten in het heelal te “unificeren” en te verklaren. Helaas voor hem, en ook voor ons, is dit hem toen niet gelukt! Tot op heden zoeken ook andere geleerden nog steeds (tevergeefs?) naar de unificatietheorie, de “theorie over alles”, de GUT: “Grand Unification Theory”!

## **Andere theorieën**

Over andere theorieën heb ik het al eerder gehad, bijvoorbeeld de theorie van James Carter met z'n expanderende aarde. Over de parachutist die uit een vliegtuig springt en een zo lang mogelijke vrije val maakt. Zonder parachute is hij gewichtloos en ziet de aarde angstig snel op hem afkomen. Je zou dan inderdaad op het idee komen dat de aarde zeer snel expandeert en op je afkomt! Zit er dan toch wat in? Het heelal zet zelf ook uit, aan de waarnemingsgrens zelfs met snelheden in de buurt van de lichtsnelheid!

En hoe zit het toch met die zogenaamde “zware massa” en “trage massa”? Is die nu wel of niet gelijk? Volgens de wetenschap zijn die, na veel metingen en denkwerk, inderdaad gelijk. Volgens Carter is er helemaal geen verschil; er is maar één soort massa!

Er is ook nog een Nederlandse student, die beweert dat niet het licht, maar wijzelf met de lichtsnelheid bewegen. Dat afstand in tijd gemeten wordt en licht een afdruk is die van onze beweging overblijft. Zit het zo? Te bizar, niet overtuigend! De “gravitonen” dan? Deeltjes die de zwaartekracht overbrengen? Nog steeds niet ontdekt!

Eerst maar naar de kwantumtheorie!

## **Kwantumtheorie**

Tijdens Einsteins bestaan was er (begin twintigste eeuw) een nieuwe theorie ontstaan: de “kwantumtheorie. Max Planck was met tegenzin tot de conclusie gekomen dat energie “gekwantiseerd” was, dat wil zeggen, energie verliep niet geleidelijk maar in “quanta” of “kwanta”, afgemeten hoeveelheden! Dit was het begin van de kwantumtheorie!

De relativiteitstheorie gaat over zeer grote zaken, zoals hemellichamen, lichtsnelheid en zwaartekracht. Bij de kwantumtheorie gaat het juist om het zeer kleine: materiedeeltjes, fotonen, elektronen en zo. En nu is gebleken dat bij de bestudering van die minideeltjes, we alles wat we over beweging en snelheden van de ons bekende zaken weten, moeten vergeten! Het is een geheel andere, zeer eigenaardige wereld, die geheel in tegenspraak is met het voor ons mensen voorstelbare. Alles op kwantumniveau is “onvoorstelbaar”!

Het belangrijkste kenmerk van de kwantumtheorie is:

*“Energie kan slechts in bepaalde porties (kwanta) worden afgegeven of opgenomen. Deze hoeveelheid energie hangt af van de frequentie.”*

Dit is bij toeval rond 1900 bedacht door Max Planck, die daarmee de beroemde, al eerder genoemde, formule met de “Planck constante” opstelde.

Op dat moment waren er namelijk twee problemen waar de wetenschap maar geen verklaring voor kon geven. Dat waren:

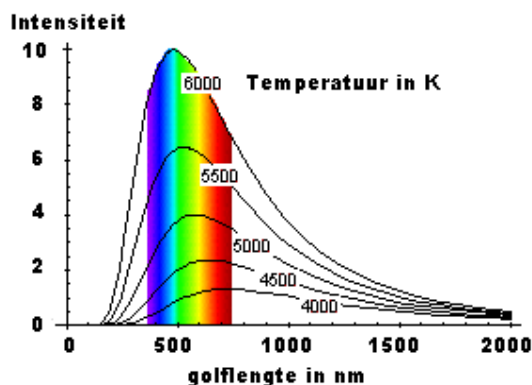
- De straling van een heet, “zwart lichaam”
- Het foto-elektrisch effect.

### De straling van een heet, zwart lichaam

Als er licht op een perfect zwart lichaam valt, wordt al het (zichtbare) licht geabsorbeerd en niets gereflecteerd, daarom zien wij... zwart. Een zwart lichaam blijkt energie te absorberen, maar ook uit te stralen! Een perfect zwart lichaam bestaat natuurlijk niet, maar bij bestudering van zo'n hitte stralend lichaam had men ontdekt dat de uitgestraalde energie afhankelijk was van de temperatuur van het lichaam en van de golflengte van de straling.

In een evenwichtstoestand, dus bij een bepaalde constante temperatuur, neemt een lichaam energie op, maar straalt het ook weer uit. Daarom kunnen we in het donker, bij relatief lage temperaturen, toch van alles “zien”, met een infrarood kijker, dat wel. Die lichamen zenden bij die temperatuur dus toch IR straling uit. Als je een “zwart lichaam” maar lang en sterk genoeg verhit straalt het eerst onzichtbaar infrarood licht uit, maar daarna zichtbaar licht: eerst rood, dan oranje, geel en ten slotte wit en witblauwig licht.

De wetenschap zat in z'n maag met deze straling, want als energie continue was, moest de energie met het korter worden van de golflengte uiteindelijk naar oneindig gaan. Maar ....het tegenovergestelde gebeurt: ze zakt juist in elkaar, de “UV catastrofe”! De zon zendt daardoor (gelukkig) hoofdzakelijk (zichtbaar) licht en warmte (IR) uit. De zon heeft aan de oppervlakte een temperatuur van ongeveer 6000 K en in de grafiek hiernaast zien



we dat dan hoofdzakelijk zichtbaar licht (ongeveer 400 – 800 nm) uitgestraald wordt. Bij lage temperatuur ligt de piek in het IR gebied (meer dan 800 nm). Laten we de temperatuur stijgen, dan zien we dat de piek heel langzaam richting UV (minder dan 400 nm) verschuift. Ondanks steeds hogere temperaturen zakt de curve na de piek in elkaar. Daar begreep men niets van, theoretisch moest die curve naar oneindig gaan. Men merkte wel dat dit niet zo was, maar hoe verklaar je dat. De gevestigde theorieën stonden op 't spel.

Fig. 12.2 Stralingsintensiteit versus golflengte

De wetenschap had er grote moeite mee. Ook Albert Einstein en Max Planck wilden dit gedrag graag verklaren. Max was na een gesprek met Albert zeer ontevreden over dit alles, ging gefrustreerd naar huis en kwam intuïtief op een idee. Hij bedacht dat de stralingsenergie

wel eens evenredig kon zijn met de frequentie (dus ook met de golflengte) van de straling. Hij ontdekte, tot z'n eigen ongenoegen, dat straling eigenlijk uit afzonderlijke hoeveelheidjes energie, die hij "quanta" noemde, bestond. Waarom tot z'n ongenoegen? Omdat dit al z'n theorieën omver gooide! Quanta (of kwanta) is het meervoud van quantum, Latijns voor "hoe grote hoeveelheid?".

Max was misschien niet zo blij met deze ontdekking, maar z'n stralingsformules bleken wel te werken. Hij wilde zelf niet geloven in energiekwanta, maar z'n frustratie had hem tot een formule geleid, die van alles verklaarde en waarin een constante: de "constante van Planck" voorkwam. Deze constante "h" bleek later veel belangrijker dan Planck ooit kon bevroeden. Zijn eigenlijk heel eenvoudige formule was het begin van het kwantumtijdperk en luidt:

$$E = n \cdot h \cdot \nu$$

Hierin is **E** de energie in joules,  **$\nu$**  de frequentie van de straling in Hertz (periodes per seconde). "**h**" = de "constante van Planck" en bedraagt  $6,63 \times 10^{-15}$  j.s (jouleseconde). Deze formule geldt voor een "stralende oscillator" zoals men toen zo'n zwart lichaam noemde. En die factor **n** dat zijn gehele getallen: 1, 2, 3 enz.. Dat **n** uit gehele getallen bestond, dát was de clou. Daardoor kon men het vreemde gedrag verklaren. Later, toen ze in verband gebracht werden met de elektronen, noemde men deze **n**-getallen de "hoofdkwantumgetallen" (daar later meer over).

Door deze formule kon men niet alleen de straling van "zwarte stralende lichamen", maar ook die van bijvoorbeeld een gloeidraad verklaren. Max Planck zelf beseftte het toen nog niet, maar hij had met deze ontdekking een heel nieuw gebied in de natuurkunde aangeboord: de kwantumtheorie, de kwantummechanica, de kwantumdynamica! Allerlei geleerden wierpen zich er op: Niels Bohr, Pauli, Heisenberg, de Broglie, Schrödinger en Einstein zelf.

### Het foto-elektrisch effect

Max Planck was dan wel de vader, z'n theorie strookte niet met z'n eigen opvattingen. Maar Einstein zag direct het belang van deze formule in. Hiermee kon hij eindelijk het "foto-elektrisch effect", het andere probleem van de toenmalige wetenschap, verklaren. Dit effect houdt in dat, wanneer men licht op bepaalde metalen of halfgeleiders laat vallen, er elektronen losgerukt worden. Licht van lange golflengte, bijv. geel licht, deed dat niet zo goed, al was het licht nog zo intens. Licht van kortere golflengte (hogere frequentie), bijv. violet licht, deed het veel beter!

Einstein zag in dat licht dus niet alleen als golf maar ook als deeltje gezien kon worden. Het was Einstein die meteen inzag dat  $E = h \cdot \nu$  (waarbij  $n = 1$ ) de energie van een "foton" was. Hij begreep nu dat deze "lichtkwanta", die nu "fotonen" genoemd worden, meer energie hadden als de golflengte korter was. Daarom werkte kortgolvig licht beter dan het rode langgolvlige licht en kon het "foto-elektrisch effect" verklaard worden!

Albert stelde ook dat licht een "dual" karakter heeft, het gedraagt zich zowel als deeltje alsook als golf! Deze vaststelling bracht grote beroering onder de onderzoekers, want wat was het nu: discrete deeltjes of continue golven? Volgens Einstein dus beide.

En De Broglie zag later in dat óók elektronen, niet alleen als deeltje, maar ook als golf gezien konden worden!

## Onzekerheid

Nu de wetenschap dit wist, doken allerlei wetenschappers de kwantumwereld in en trokken steeds meer conclusies die in 't geheel niet strookten met de ideeën tot dan toe. Heisenberg, de Broglie en Schrödinger bestudeerden de kwantumtheorie en kwamen met moeilijke vergelijkingen over de onzekerheid: in de wereld van het zeer kleine was namelijk alles anders, niets was meer zeker.

Één geleerde uit die tijd, een zekere John Bell, kwam zelfs met het volgende theorema:

*“De elementaire deeltjes, waaruit het heelal is opgebouwd, bestaan niet als zodanig, tenzij ze waargenomen worden. Ze zijn zelfs op het meest essentiële niveau niet afzonderlijk identificeerbaar van andere deeltjes, hoe ver ze er ook van verwijderd zijn!”*

De kwantumtheorie ontwikkelde zich verder en verder. Einstein, die zelf ook aan de ontwikkeling van de kwantumtheorie deelnam, begon te twijfelen. Het bleek dat men plaats en tijdstip van zeer kleine “deeltjes” niet meer met een paar waardes kon vastleggen, hoogstens de waarschijnlijkheid dat het betreffende deeltje daar ergens kan zijn. Elektronen bevinden zich niet meer “daar en daar in die en die baan”, maar met een zekere waarschijnlijkheid ergens in de “wolk” om de atoomkern.

De wetenschap die tot dan toe alles vast probeerde te leggen, moest er plotseling aan wennen dat dit in de kwantumwereld niet meer ging. Het **onzekerheidsbeginsel** stelde dat we van een deeltje bijvoorbeeld óf de plaats óf de “impuls” ( $m \cdot v =$  massa maal snelheid) kunnen bepalen maar nooit beide. We kunnen altijd maar één gegeven meten!

Maar... hoe komt dit nu? Ja, dat is toch wel vrij makkelijk te begrijpen! Laten we terug gaan naar onze wereld, de macro wereld! Neem een rijdende auto. Als wij wat van een voorbij rijdende auto willen weten kunnen we met kennis, apparatuur en enig meetwerk van alles vaststellen: “O, het is een Ford Focus, met kenteken WA 01 AR. Het is Dinsdag 1 april 2005. Om 11. 25 uur rijdt hij langs kilometerpaaltje 74,5 op de A2 en wel met een snelheid van 107,3 km/uur!” Hoe kunnen we dit allemaal weten? Vooral doordat we de auto “zien”! En daarom kunnen we er een kijker en een “lasergun” op richten en komen we er met geavanceerde technieken, zoals GPS, flitspalen, camera's, ingebouwde zendertjes en zo, van alles over te weten! Daarbij veranderen die metingen niets wezenlijks aan de auto zelf, die rijdt onverstoord verder.

Maar nu een zeer snel bewegend deeltje dat zich zowel als deeltje maar ook als golfje gedraagt. Daar is het heel andere koek! Willen we iets van dat deeltje weten dan moeten we het “zien” of “detecteren”. Maar wat is zien? We zien iets als er licht op dat “iets” valt: er wordt dan een deel van het licht teruggekaatst en dit bereikt onze ogen (de detectoren): we zien “het”! Licht bestaat uit fotonen, dus om een deeltje te “zien” moeten we er licht, dus fotonen, op af sturen. Maar... fotonen zijn energiepakketjes en raakt zo'n foton het betreffende deeltje, dan verandert dat deeltje volledig en ontstaat er acuut een andere toestand. De energie, de plaats, de snelheid, de richting, iets verandert er. We “zien” het deeltje dan misschien wel, maar weten eigenlijk nog niet veel. “Je zoekt met een stok in 't donker naar een stuiterende bal!” zei iemand. En als die bal je stok toevallig raakt, ja dan gaat hij anders stuiten!

We kunnen bedenken wat we willen, maar zodra we wat te weten willen komen van bewegende deeltjes, zullen we de toestand van het deeltje door de waarneming of de detectie veranderen en van de toestand daarvoor kunnen we dus niet veel meer zeggen!

Bij die bewegende auto veranderde er door de metingen niets, licht, laser, fotograferen, de auto rijdt rustig verder, of toch niet? Ook daar zal de chauffeur na detectie z'n rijgedrag wel eens kunnen veranderen, als hij merkt dat hij “gemeten” wordt.....

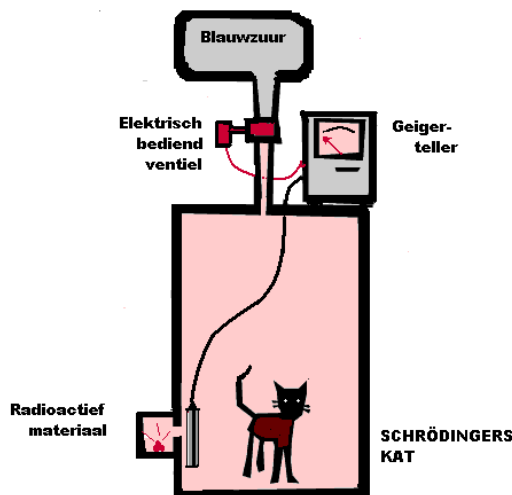
Dit fenomeen, dat in de wereld van het zeer kleine alles onzeker wordt en alleen nog met een zekere waarschijnlijkheid vastgelegd kan worden, had tot gevolg dat men van alles moest herzien en er allerlei nieuwe gezichtspunten kwamen.

Werner Heisenberg beweerde bijvoorbeeld:

*“De subatomaire wereld laat steeds zien dat we leven in een psychedelische wereld die, voor ons gezond verstand, volkomen absurd is.”*

Schrödinger kwam met z'n vergelijkingen en “Schrödingers kat”. Wolfgang Pauli met z'n Pauliverbod. Heisenberg met z'n onzekerheidsbeginsel. Ook Albert Einstein en Niels Bohr werkten volop met het begrip “kwantum” en kwamen uit op steeds vreemdere zaken, waar iedereen het moeilijk mee had. Leeft de kat van Schrödinger nu wel of niet? Heeft een deeltje nu wel of geen contact met z'n “partner”deeltje? Kan een deeltje terugreizen in de tijd? Waar bevindt zich nu een elektron in de “wolk”? Is een deeltje nu een golf of een “particle”? Er kwam een kwantummechanica, een kwantumdynamica enz.enz., kortom de wetenschap was in de ban van het kwantum, alles was gekwantiseerd (of schrijf je gekwantificeerd?).

Fig 12.3 Schrödingers kat



### Schrödingers kat

Erwin Schrödinger heeft een belangrijke rol gespeeld in de kwantummechanica door zijn (behoorlijk moeilijke) “Schrödinger vergelijkingen”. Omdat velen niet begrepen wat hij nu precies bedoelde, kwam hij met een (beetje vreemd) gedachte-experiment, dat beroemd is geworden en als “Schrödingers kat” de geschiedenis is ingegaan. Een kat zit voor een bepaalde tijd in een kistje, met een kleine hoeveelheid radioactief materiaal, een geigerteller en een tankje met blauwzuur. Dit radioactieve spul kan vervallen of niet. Als het vervalt zal de geigerteller een ventiel bedienen die het giftankje opent, waardoor de kat onmiddellijk zal sterven.

Maar... buiten de kist weten we dus niet wanneer dit radioactieve spul vervalt, dat hangt af van de halfwaardetijd. Volgens mij kan het dus eigenlijk maar om één radioactief atoom, met een bepaalde halfwaardetijd, gaan en inderdaad spreken sommige beschrijvingen over één atoom radioactief materiaal met korte halfwaardetijd.

Laten we die halveringstijd nu eens op één uur stellen en laten we de doos ook één uur gesloten houden. In dat uur kan het atoom dus fifty fifty, wél of niet vervallen. In dat uur dat de doos dicht is, weten we dus niet of de kat dood is of nog leeft! We weten wel dat, naarmate de tijd verstrijkt, de kans dat de kat nog leeft kleiner wordt.

Nu komt het: in de kwantumwereld houdt dit in dat, zo lang het uur niet verstreken is, de kat met een zekere waarschijnlijkheid zowel *dood als levend* is! Men noemt dit “*superpositie*”, de kat bevindt zich in superpositie!

Nou, zo ken ik er ook nog wel een! Als ik onze hond uitlaat, heb ik altijd kleine hondenkoekjes in m'n broekzak, allemaal gelijk, in twee kleuren: lichtgele en donkerbruine! Maar..... in mijn broekzak is het donker en zonder licht zijn ze noch licht, noch donker, ze zijn eigenlijk niks: *Ze zijn in superpositie!* Pas als ik in m'n broekzak frommel en er één tevoorschijn haal, vallen er fotonen (licht) op en op dat moment besluit zo'n koekje

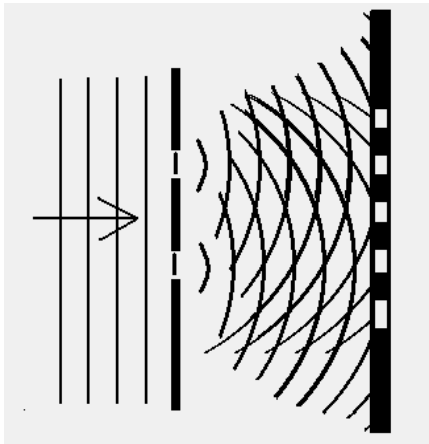
donkerbruin of lichtgeel te worden! Zit zo de kwantumwereld in elkaar? Volgens de kwantumboys wel.

Waarom is die kat van Schrödinger zo beroemd geworden? Die kat leeft toch gewoon of hij is dood? En als je de doos openmaakt? Wel dan weet je dat zeker. Maar ja, Erwin vond het allemaal nogal absurd en wilde wat duidelijk maken: “*superpositie*”. Of hij daarin geslaagd is? Hmm... Ik vind het trouwens ook nogal een wrede idee! Arme kat! Gelukkig is het maar een gedachte-experiment!

Uit lang vervlogen tijd stamt nog een ander beroemd experiment, dat wél echt uitgevoerd is en ook in onze tijd nog steeds voor discussie zorgt, er wordt eindeloos over gesproken:

## Het twee spleten experiment

Dit beroemde experiment werd al lange tijd geleden uitgevoerd (18<sup>e</sup> eeuw) door een zekere Young om te bewijzen dat licht uit golven bestond. Een bundel licht schijnt door een schot met twee nauwe spleten. Op de muur erachter ziet men dan een zogenaamd interferentiepatroon. Dat bestaat uit lichte en donkere strepen en kan alleen verklaard worden doordat de lichtgolven elkaar versterken en uitdoven.



Maar.... wat gebeurt er als dit zelfde experiment uitgevoerd wordt met elektronen of nog beter: met “losse” fotonen? Vroeger was dit niet mogelijk, maar nu kan men naar wens steeds één foton op het spleetenschot “afvuren”. En wat blijkt? We weten dan niet door welke spleet zo’n foton gaat, want, daar komt het, een foton is een golf en verkeert, ongedetecteerd, in “superpositie”, gaat door beide spleten tegelijk en interfereert met zich zelf! Hoe kan dat nu? Tja, dat is nu de kwestie, de kwantumtheorie is niet te begrijpen!

Fig. 12.4 Twee spleten experiment

Maar hoe manifesteert die “interferentie met zichzelf” zich? Als men op de muur er achter een fotografische plaat aanbrengt dan blijkt na een tijdje, als er dus een heel stel fotonen op gevallen zijn, eveneens hetzelfde interferentiepatroon te ontstaan. (Dit gebeurt trouwens ook met elektronen!)

Maar.... als we nu een detector bij één van de spleten plaatsen, dan weten we wél door welke spleet elk foton vliegt. Maar.... dan is er ook geen interferentie meer! Door de detectie is er wat veranderd, de fotonen zijn veranderd in deeltjes en geven gewoon twee lijnen op de achtergrond. Ze hebben blijkbaar een bewustzijn en weten dat we ze in de gaten willen houden! We hebben voor onze beurt in de doos gekeken om iets te weten te komen over die rot kat! En ...ik heb met een lampje in m’n broekzak gekeken!

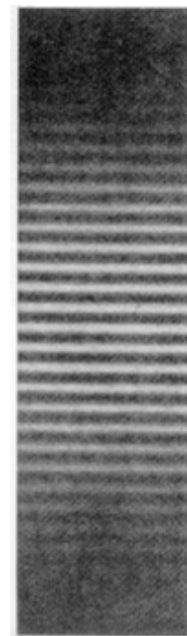


Fig. 12.5 Interferentiepatroon

Tot het kwantumtijdperk geloofde men in ’t “determinisme”, zeg maar: “alles ligt vast en alles kan vastgelegd worden”. Maar nu bleek dat alles hoogstens waarschijnlijk was! Velen

hadden het er moeilijk mee. Ook Einstein, ondanks z'n eigen rol in de nieuwe theorie, had z'n bedenkingen. "De Oude dobbelt niet" merkte hij op. Maar in de kwantumwereld blijken alleen kansberekening en statistiek van waarde! Exacte vastlegging van positie en beweging tegelijk bleek in de kwantumwereld niet mogelijk! "Wie ben jij om God te verbieden te dobbelen!" zei iemand tegen Einstein. En zo is het. Hoewel niemand meer precies snapte wat er in de wereld van het zeer kleine plaats vond, met de nieuwe theorie kon men wél allerlei zaken berekenen en verklaren.

In de kwantumwereld blijken de zeer kleine deeltjes dus een duaal karakter te hebben: ze gedragen zich als golven en worden bij detectie ineens deeltjes. Hun posities kunnen slechts als waarschijnlijkheden worden aangeven.

Er kwamen vreemde denkbeelden die op 't eerste gezicht gewoon niet waar kunnen zijn. Neem bijvoorbeeld een elektronenpaar. Dat paar moet, volgens het Pauli-verbod, verschillende spins hebben, men noemt ze "up" en "down". Het is wél zo dat, zolang ze een paar vormen, de totale spin nul is, want  $+1/2$  plus  $-1/2 = \text{nul}$ . Stel nu dat, op de één of andere wijze, het paar zich splitst en ieder een andere kant opvliegt. Nu komen wij één zo'n deeltje tegen en beïnvloeden de spin, bijvoorbeeld met een magnetisch veld. De spin van dat ene deeltje verandert dan. En wat gebeurt er met het andere deeltje? Dat verandert óók van spin en wel op 't zelfde moment! Hoe ver ze van elkaar verwijderd zijn maakt niet uit. Ja, maar niets kan toch sneller dan de lichtsnelheid? 't Maakt niets uit, als de één verandert moet de ander ook veranderen en wel op 't zelfde moment!

Dit "gedachte-experiment" van Einstein, samen met twee andere geleerden: Podolsky en Rosen, staat bekend als de "EPR paradox" en stamt uit 1935. Einstein geloofde er namelijk niets van dat deeltjes, hoe ver ze ook van elkaar af waren, toch direct, zonder tijdverlies, contact met elkaar zouden hebben om aan de nieuwe bevindingen te voldoen. Dit contact zou dus "instantly" plaats moeten hebben, maar dat was volgens hen absurd: "Spoken op afstand" noemde Einstein het!

Maar... Alain Aspect zou in 1981 bewezen hebben dat deze "kwantumverstrengeling" wel degelijk bestaat en ook geleerden zoals John Bell en Terry Clark hebben in de 90er jaren de zogenaamde "non-lokaliteit" van deeltjes met experimenten kunnen bevestigen!

Ook zeer vreemd is het volgende. Fotonen hebben geen massa, dus voor hen geldt er ook geen tijd: voor hen staat de klok stil! Vul maar in in de tijdformule van de relativiteitstheorie:

$$t' = t \cdot \sqrt{1 - v^2/c^2}$$

Hierin is:  $t'$  = de tijd voor een foton  
 $t$  = onze tijd  
 $v$  = de snelheid van een foton en die is gelijk aan  $c$ !

De tijd gezien vanuit een foton, die zich in 't luchtledige met de lichtsnelheid  $c$  beweegt is dus:

$$t' = t \cdot \sqrt{1 - c^2/c^2} = t \cdot \sqrt{1 - 1} = t \cdot \sqrt{0} = 0$$

Een foton is ook z'n eigen antideeltje. Er bestaan dus wel "antifotonen" maar die zijn precies gelijk....! (Later las ik dat er toch verschil kan zijn!)

Nu komt het. Uit een energierijk "gamma" foton (een gammastralingdeeltje) kan volgens de kwantumtheorie een deeltjespaar ontstaan. Het zijn dan wél materie-antimaterie



deeltjesparen, bijvoorbeeld een elektron-positronpaar. Zo'n paar heeft een zeer korte levensduur. Maar .... stel nu dat in deze korte tijd het positron een leuk elektroontje ontmoet! Een flinke klap, er ontstaat een gammafoton en... het andere, net gevormde, enkele elektron gaat in plaats daarvan verder. Nu kan op dezelfde wijze één enkel elektron achtereenvolgens twee (gamma)fotonen ontmoeten. Dit elektron zou zich dan korte tijd *terug in de tijd* moeten bewegen. Ja, maar dat kan toch niet? Volgens weer een andere geleerde, Richard Feynman, kan dat wél: deeltjes kunnen in de tijd terugreizen! (Maar wel zeer kort!) Hij tekende diagrammen, de "Feynmandiagrammen" dus, waaruit één en ander zou blijken.

Fig 12.5 Feynmandiagram.

Die hele kwantumtheorie blijkt dus eigenlijk een theorie met zeer vreemde consequenties, die je (ik) als gewoon mens niet kan bevatten. Niet voor niets deed een andere kwantumgeleerde, John Bell, de volgende uitspraak over de kwantumfysica:

*"De kwantumfysica blijkt bij alle proefnemingen juist te zijn, zowel in de micro- als macrowereld. Zij (de kwantumfysica dus) heeft alle verschijnselen met succes verklaard, terwijl de gezond-verstandopvatting van de wereld op alle fronten onjuist blijkt zijn."*



Ja, als je dat leest, wat hebben mijn pogingen de wereld en het heelal te begrijpen en één en ander te verklaren nog voor zin? Het is ook geen wonder dat allerlei figuren, in het schemerlicht van de wetenschap, de kwantumtheorie gretig aanpakken om er van alles mee te verklaren: telepathie, telekinese (lepelje buigen), levitatie (je verheffen boven de aarde) en zo voort.

Ook theologen en "gelovigen" gebruiken de theorie om er van alles mee te verklaren. En.... misschien hebben ze allemaal wel enigszins gelijk, de werkelijkheid is vreemder dan we ooit konden bedenken! En... misschien is alles wel gekwantiseerd.

Als we lopen gaan we ook steeds een stapje (kwantum) verder. Elke film, in bioscoop of op televisie, zien we als continue bewegende beelden, maar die bestaan toch uit afzonderlijke beeldjes (kwanta), met een heel korte tussentijd. Daar we ze snel achterelkaar zien lijkt het een continue beweging, maar die beweging is wel degelijk gekwantiseerd!

Zo zou je alles kunnen zien. Als we netjes, met constante snelheid autorijden, staan we misschien wel steeds héél even stil, bewegen een kwantum en staan dan opnieuw stil en zo voort! Daar de tussentijden en kwanta zo kort en klein zijn, voelt het toch aan als een continue beweging! Zit het zo? Is dat uiteindelijk hoe de (kwantum)wereld werkt?

De kwantumtheorie leidde de wereld uiteindelijk wel naar allerlei nieuws: lasertechnologie, elektronenmicroscop, microchip, supergeleiding, MRI scan, GSM enzovoort. En intussen heeft de micro- en nano-elektronica een enorme vlucht genomen. Men werkt nu zelfs aan een kwantumcomputer! Deze werkt niet met gewone "bits" maar met quantumbits of "qubits"!

Bij de huidige computers zijn de "bits" elektrische spanninkjes van een paar volt die "hoog" of "laag" zijn. Computers werken met énen en nullen, waarbij "een hoog spanninkje" een 1 en "een laag spanninkje" een 0 is. Men tracht nu deeltjes, bijvoorbeeld elektronen, als (qu)bits te gebruiken. Dan moeten we ze gebruiken als ze zich in "*superpositie*" bevinden, geen 1 geen 0, zodat er dan later enen en nullen van gemaakt kunnen worden.

Maar ja, dan moet je hun toestand wél kunnen detecteren en dat kan dus niet zonder ze te verstoren. Toch heeft men nu een methode gevonden waarbij dat wel kan. In de buurt van het absolute nulpunt bestudeert men hoe die deeltjes microgolven reflecteren. Bij die

temperatuur blijkt dit “bestuderen” hun toestand niet te verstoren! Niets inventiever dan de mens! Hoe kan dit nu? Dat willen we toch weten, ja toch?

Het is nogal een moeilijk verhaal, maar men maakt daarbij gebruik van een “Josephsonsverbinding”, dat is een sandwich van twee laagjes “supergeleidend” materiaal met daartussen een laagje isolatiemateriaal. Deze isolerende laag zou volgens de klassieke wetenschap voor elektronen ondoordringbaar moeten zijn, maar in de kwantumwereld is deze laag dat wel! De elektronen kunnen er bij zeer lage temperatuur toch af en toe door gaan. Als men even niet oplet, slippen ze er stiekem doorheen! Die sandwich kan dan als een soort condensator werken, die zich wel of niet ontlad. Nou ja, de kwantumcomputer zal nog wel even op zich laten wachten, maar hij komt er aan!

Supergeleiding heeft wel een probleem: de benodigde zeer lage temperatuur! Wat is “supergeleiding”? Sommige materialen blijken, bij zeer lage temperatuur, stroom zonder weerstand te kunnen geleiden. Onze eigen Kamerling Onnes heeft dit fenomeen ooit ontdekt en kon daarmee in z’n Leidse lab een elektrisch stroompje (haast) eindeloos rond laten lopen. Dit werkte echter alleen vlak bij het absolute nulpunt:  $-273^0$  Celsius (0 graad Kelvin = 0 K). En Kamerling Onnes kon die zeer lage temperatuur bereiken, met verdampende Helium!

Intussen heeft men materialen gefabriceerd die bij veel hogere temperaturen (maar nog steeds tientallen graden onder nul) supergeleidend zijn. Van al deze ontdekkingen maakt bijvoorbeeld de “MRI” (“magnetic resonance imaging”) scanner gebruik.

MRI is een afgeleide van NRM, “nuclear magnetic resonance”, een in 1945 ontdekt fenomeen: “kernspinresonantie”, waarmee men zeer veel meer over de samenstelling van allerlei materialen te weten is gekomen. Hiervoor heeft men een zeer sterk magnetisch veld nodig en met supergeleidende magneten kan men dat opwekken. Zo’n zeer sterk magneetveld kan met gewone elektromagneten maar moeilijk opgewekt worden, ze zouden zeer veel energie vragen en extreem heet worden. Sinds men de supergeleiding beter onder de knie heeft, kan dit wél en heeft het MRI scannen een grote vlucht genomen.

## **MRI scanner**

Die MRI scanner heeft me al lang geïntrigeerd. Vanwege een sluimerende “hernia” wilde ik m’n uitpuilende tussenwervelschijven wel eens (laten) bekijken. Met een MRI scanner zou dat moeten kunnen. Intussen heb ik er echter “mee leren leven” (hangen helpt) en ben dus (nog) niet met MRI gescand.

Er bestaan allerlei soorten scanners. We hebben CT scanners (computer tomografie) die met Röntgenstraling werken, er is echografie/scopie, die met geluidsgolven werkt, maar de MRI scanner? Ja, die werkt met magnetisme, maar hoe? Hoe werkt zo’n MRI scanner eigenlijk? Tja, dat blijkt niet zo eenvoudig te zijn.

In de term “MRI scanner” zitten vier woorden:

- “Magnetic”, magnetisch
- “Resonance”, resonantie
- “Imaging”, beeldvorming
- “Scanner”, aftaster

Wat kan zo’n MRI scanner eigenlijk? Beelden vormen van zachte delen van het menselijk lichaam of delen ervan. En ook beelden van de loop van lichaamsvloeistoffen weergeven.

Inderdaad, voor de beeldvorming van harde delen, zoals schedel en botten, kan je beter een CT (computer tomografie) scanner gebruiken, die met Röntgenstraling werkt. Maar die zachte menselijke delen (bijv. hersens, tussenwervelschijven) en lichaamsvloeistoffen zoals

hersenvloeistof, bloed e.d., die bevatten allemaal water en zoals we weten bestaat water uit zuurstof en vooral waterstof. Dat water is ongelijk aanwezig in het lichaam. Het is dan ook de verdeling van het water, preciezer gezegd de waterstofconcentraties, die de MRI scanner zichtbaar kan maken: veel water: licht, geen water: zwart, en alles ertussen: grijs tinten. Op die “MRI images” kan men van alles zien: tumoren en allerlei afwijkingen worden zichtbaar voor het geoefende oog!

Die beeldvorming gebeurt “scannend”, dat wil zeggen: het te bestuderen lichaamsdeel wordt volgens een vast patroon afgetast en geanalyseerd en dan als een serie beelden (foto’s) weergegeven. In zo’n scanner beweegt je dan ook “gekwantiseerd”, steeds een vast afstandje verder en na elke verschuiving wordt er dan weer een beeld van je gemaakt. Wordt nu bijvoorbeeld je hersenpan gescand, dan krijg je uiteindelijk een aantal foto’s van de verschillende “hersenschijven” en desgewenst in verschillende doorsneden.

Om de MR (magnetic resonance of kernspinresonantie”) goed te bestuderen heeft men dus een zeer sterk magnetisch veld nodig, dat met “supergeleiding” eindelijk opgewekt kon worden zonder een enorme koelinstallatie. Maar... toch is een koelinstallatie nodig. De supergeleiding moet door koeling wél op gang gebracht worden. Draait de stroom eenmaal zonder weerstand rond, dan geeft hij geen warmte meer af! En heeft men de elektromagneet eenmaal opgestart, dan blijft hij, zelfs min of meer zonder vermogen, werken. Er moet alleen wat verlies gecompenseerd worden.

Dat koelen van die magneetspoelen valt niet mee, want de temperatuur waarbij supergeleiding in koperdraad op treedt is zeer laag, in de buurt van het absolute nulpunt! Dat betekent dat men magneetspoelen van conventioneel koperdraad met vloeibare Helium moet koelen! Men komt dan tot 4 graden Kelvin ( $4\text{ K} = -269\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

Koelen met Helium is duur en technisch moeilijk, maar intussen heeft men materialen ontwikkeld waarbij al bij  $80\text{ K}$  ( $-193\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) supergeleiding optreedt en waarvan ook draad voor magneetspoelen gemaakt kan worden. Men kan dan koelen met vloeibare stikstof, dat is veel makkelijker en... goedkoper!

Intussen zijn er zelfs materialen die nog eerder “super” geleiden! Het record voor supergeleiding is nu (2006):  $139\text{ K}$  ( $-134\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Wat voor materiaal? “Kwik barium calcium koperoxide”, meer weet ik ook niet! Maar... is dat materiaal wel geschikt? Je moet er wél draad van kunnen maken om spoelen van te wikkelen, anders heb je er nog niet veel aan!

Door de supergeleiding kan men thans magneetvelden van meerdere “Tesla” (dat is een eenheid van magnetisme) opwekken. De nieuwste MRI scanners hebben een magnetisch veld van 7 Tesla, voor hersenonderzoek. Deze scanners geven scherpe beelden met een hoge resolutie (van rond  $0,1\text{ mm}$ ) en kunnen een grote serie doorsneden van de schedel leveren. Men kan thans zelfs al magnetische velden van 17 Tesla opwekken! Ter vergelijking: 1 Tesla =  $10.000\text{ Gauss}$  en het aardmagnetisme heeft een sterkte van  $0,5\text{ Gauss}$ . Toch laat zelfs dit zwakke aardmagnetische veld kompasnaalden een Noord-Zuid stand innemen!

## “Kernspinresonantie”

Maar ..... hoe maakt men nu dat “water” in je lichaam zichtbaar? Dat is niet zo eenvoudig uit te leggen, maar ik doe m’n best. De MRI scanner maakt, zoals gezegd, gebruik van een eigenschap van kerndeeltjes die men “kernspinresonantie” noemt. Deze eigenschap is in 1945 ontdekt door Bloch en Mills Purcell. Zij ontdekten dat niet alleen elektronen maar ook protonen (positief geladen kerndeeltjes), zich als “tollende magneetjes” gedragen. Dit “tollen” noemt men spin: “kernspin” dus. Ook hier geldt: of ze werkelijk draaien is niet bekend maar dat is volgens de geleerden ook niet belangrijk, ze gedragen zich alsóf ze draaien!

Maar... hoe kan men met deze eigenschap beelden van lichaamsdelen produceren. Een korte (aangepaste Belgische) uitleg is deze:

*“Waterstofkernen (protonen), geplaatst in een sterk magnetisch veld en daarin ook nog kort aan een hoogfrequent elektromagnetisch veld onderworpen, zenden daarna een “resonantie” signaal uit. Dit signaal is afhankelijk van de aard van het weefsel van het lichaamsdeel, waarin de waterstofkernen zich bevinden. Door deze signalen te lokaliseren kan een beeld geconstrueerd worden.”*

Leuk geprobeerd, maar erg begrijpelijk is deze uitleg niet. Ik zoek verder. Het blijkt dus dat, als kerndeeltjes van waterstof (dat zijn dus protonen) in een gelijkmatig (homogeen) magnetisch veld geplaatst worden, een deel zich langs de veldlijnen van het magnetische veld “richten”, net als kompasnaalden. We krijgen dan protonen in de (daar heb je het weer) kwantumtoestand: “spin up”! Ze “spinnen” trouwens niet alleen, ze waggelen, “precederen”, ook nog, om hun as.

Hebben dan niet alle waterstofkernen kernspin? Volgens de wetenschap zeker wel, maar niet allen richten zich. Maar als één procent (en dat is gebruikelijk) zich richt, is dat al voldoende. Ook zijn de protonen nogal eens afgeschermd door elektronen in de buurt en dan worden ze anders beïnvloed. Het hangt natuurlijk ook af van de soort lichaamsweefsels of lichaamsvloeistoffen, die gescand worden.

De volgende stap is dat deze gerichte protonen met “RF” (radio frequentie) straling “aangeslagen” worden. RF straling is voor de mens (waarschijnlijk) volkomen ongevaarlijk, ze ligt in het “radiogebied”. De juiste frequentie van die straling is afhankelijk van de sterkte van het magneetveld.

Dit “aanslaan” houdt in dat de spinnende kernen in “spin down” toestand gebracht worden. Geef je namelijk zo’n waggelend, spinnend proton precies op het juiste moment het juiste RF signaal, dan zullen ze omflippen en een iets hogere energie hebben. Wordt het RF signaal beëindigd, dan komen de “aangeslagen” protonen weer enigszins tot rust, ze flippen weer terug in hun “oude” toestand (spin up). Dit duurt even en intussen geven ze dan ook weer een (RF) signaal van dezelfde frequentie terug, inderdaad: de “resonantie”! En “afgeschermd” protonen resoneren weer een iets andere frequentie, naar ik begrijp.

De tijd die het duurt om weer in de grond (spin up) toestand terug te keren (de “relaxatietijd”) en het resonantiesignaal van de betreffende protonen kunnen worden gemeten en zo verkrijgt men (bruikbare) informatie over de Waterstofkernen.

Zoals gezegd, de MRI scanner is een “spin off” van de “NMR” (nuclear magnetic resonance) spectrograaf, waarmee al veel langer de samenstelling van materialen onderzocht wordt. Met deze “kernspinresonantie” kunnen vele materialen geanalyseerd worden, maar in de MRI scanner bestudeert men (tot nu toe) alleen Waterstofkernen.

Ons lichaam bestaat voor ruim 60 % uit water en in elk molecuul water (H<sub>2</sub>O) bevinden zich twee atomen waterstof. Waterstofatomen zijn de simpelste atomen, ze hebben een kern met slechts één proton en die zijn voor de MRI van belang. Zoals gezegd, slechts een klein deel van de waterstofkernen richt zich in het magnetische veld, maar 1 % is natuurlijk nog steeds een reusachtig aantal. Maar hoe sterker het magnetische veld, hoe meer er zich richten! Dus een sterker magneetveld geeft meer informatie en daardoor scherpere beelden.

De frequentie van de radiogolven (de RF straling), waarmee de protonen aangeslagen worden moet zeer precies zijn. Deze frequentie kan vrij eenvoudig berekend worden, ze hangt af van de sterkte van het magneetveld. Deze frequentie wordt de: “Larmorfrequentie” genoemd en ligt tussen de 15 – 80 Mhz (= 20 – 3,75 meter”band”). Larmor zal wel de ontdekker zijn! Het resonantie signaal kan men met een antenne opvangen en meten. Ook de “relaxatietijd”, de tijd die het de protonen kost om tot rust te komen, wordt gemeten. Er

worden twee tijden gemeten: “T1” en “T2” (volgens de geleerden van de langs- en dwarsgolven) en zo kan men twee verschillende beelden krijgen, óf met veel zwart óf met veel wit, afhankelijk wat men wil zien!

Blijkbaar duurt het nogal lang voordat alle protonen weer rustig en gericht in het veld liggen, want men meet niet de totale tijd maar de tijd die het kost tot dat 63 % van de protonen “relaxed” is. Waarom precies 63 %? Omdat ons lichaam voor 63% uit water bestaat? “Dat zal wel toeval zijn!” Nee, het is net zoiets als de halfwaardetijd bij radioactieve stoffen, alleen heeft men hier voor een ander percentage gekozen. 100 % zal wel te lang duren!

Nu moet men de metingen nog “even” zichtbaar maken. Niet alleen de meting is van belang, vooral ook de locatie! Er komen allerlei metingen binnen. Maar ....., je moet dan wél weten wáár deze groepjes protonen, ook nog in verschillende kwantumtoestanden, zich in het magnetische veld bevinden!

Daartoe heeft men “gradiëntspoelen” aangebracht (een uitvinding van de Amerikaan Peter Lauterbur) waardoor in het zeer homogene magneetveld toch een “gradiënt” ontstaat, een soort verloop. Daarmee kan men vaststellen wáár in het veld de resonantie van de “kernspin” plaats vindt. Voor driedimensionale beelden zijn er dan drie van deze gradiëntspoelen nodig!

Om de locatie van de gemeten protonen zichtbaar te maken maakt men gebruik van de “Fourier-analyse”, een wiskundige methode om signalen op een scherm zichtbaar te maken. Met de sterke, moderne computers die er nu zijn, kan men zeer scherpe, duidelijke beelden produceren. Door het te bestuderen lichaam(sdeel) steeds iets op te schuiven, krijgt men dan een serie beelden van “lichaamsschijven”. Ook het toepassen van speciale contrastvloeistof, die in het lichaam(sdeel) geïnjecteerd wordt en zich daar aan “zieke” delen hecht, komt de duidelijkheid van de beelden ten goede.

Naast Lauterbur heeft ook een zekere Peter Mansfield een belangrijke rol in de ontwikkeling van de MRI gespeeld. Hij kreeg hiervoor, samen met Peter Lauterbur, in 2003 de Nobelprijs. Een andere geleerde, Raymond Damadian kreeg geen Nobelprijs, maar vindt zelf dat hij hem ook verdiend heeft en laat dit overal duidelijk weten! Hij blijkt inderdaad al lang geleden een soort MRI beelden geproduceerd te hebben. Ook onder geleerde mensen komen ordinaire ruzies en jalousie nogal eens voor!

Nu nog even de constructie van zo’n apparaat! Een MRI scanner bestaat uit de volgende onderdelen:

- Een enorme ringvormige DC (gelijkstroom) magneet voor een sterk, homogeen magneetveld (nu in 2006: 7 Tesla).
- Afschermspoelen om het magnetisme naar buiten tegen te houden.
- RF (radio frequency) spoelen voor het radiosignaal.
- RF antenne voor het opvangen van de resonantiesignalen.
- Gradiëntspoelen om in het meetgebied een verloopend veld te verkrijgen voor de plaatsbepaling.

Fig 12.5 MRI scanner



- Koeling om de supergeleiding in stand te houden (met vloeibare Helium en/of Stikstof).
- Mechanisme om de patiënt de scanner binnen te voeren. Hiermee wordt de patiënt dus stukje voor stukje door de scanner getransporteerd. Na iedere verschuiving wordt het RF signaal kort uitgezonden, het resonantiesignaal opgevangen, de locatie ervan en de relaxatietijden T1 en T2 gemeten, waarna de patiënt weer een stukje verder schuift.
- Computerapparatuur voor gegevensverwerking. Beeldscherm en printer om de beelden te zien en vast te leggen (bijv. op film.)