

Antimaterie

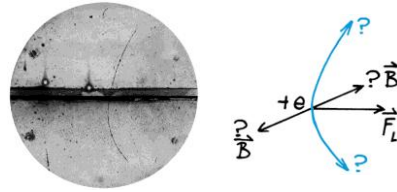
Vóór de meting in een PET-scanner wordt een suikeroplossing ingespoten die ^{18}F bevat, een positronstraler. Positronen in menselijk weefsel leven niet lang. Na circa 1 mm komen ze een elektron tegen en annihileren. Daarbij wordt de energie van de deeltjes ($E = mc^2$) omgezet in energie van twee gamma's. De halfwaardetijd van ^{18}F is 1,8 uur en de effectieve dosis bedraagt 14 mSv. Het ^{18}F is ontstaan door in een cyclotron water dat verrijkt is met ^{18}O te beschieten met protonen. Dan wordt een uur gewacht tot de suiker de plaats van bestemming heeft bereikt en wordt de meting van de twee synchrone gamma's gestart.

- Met welke factor is de activiteit van ^{18}F gedaald als de meting begint?
 - Bij de annihilatie wordt ook de impuls $m\vec{v}$ van de twee deeltjes overgedragen op de twee gamma's.
- Wat weet je van het positron als de twee gamma's precies onder 180° uit elkaar gaan?
- Hoe groot is de energie van iedere gamma?
 - De detectors kunnen signalen die 3 ns na elkaar binnenkomen, nog apart registreren. Computerprogramma's tellen de data op en bewerken ze.
- Hoe ver komt een gamma in 3 ns?

Dirac vermoedde als eerste in 1928 dat er ook een positief elektron bestond, maar hij twijfelde. Zijn relativistische bewegingsvergelijking voor de golf functie van het elektron gaf namelijk twee oplossingen alsof er ook een elektron bestond met negatieve massa. Hij legde zo een verband tussen de quantumnatuurkunde en de relativiteitstheorie.

Anderson onderzocht in 1932 met een nevelvat en een sterk magneetveld 'secundaire elektronen' in kosmische straling en was er niet zeker van of de banen linksom of rechtsom draaiden. Om daar achter te komen liet hij de deeltjes door een plaatje lood gaan zodat ze wat werden afgeremd en het spoor dus sterker gekromd werd. Uit die proef bleek dat hij met positieve elektronen te maken had en daarmee had hij het *positron* gevonden. Toen Dirac daarvan hoorde, was zijn reactie: 'My equation is smarter than I am!'

Links staat de originele opname van Anderson.

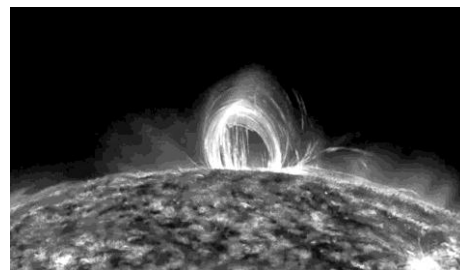


- Hoe bewoog het positron en hoe was het magnetisch veld gericht?

Dirac was een eigenaardige man, briljant maar waarschijnlijk autistisch. Hij voorspelde ook de monopool en die is pas kort geleden misschien gevonden. Bohr zei over hem tegen Rutherford: 'This Dirac, he seems to know a lot of physics, but he never says anything.'

In zijn Nobelprijzlesing in 1933 merkte Dirac op dat misschien de helft van de sterren opgebouwd zou kunnen zijn uit negatieve protonen en positieve elektronen; aan hun spectra kun je het verschil namelijk niet zien.

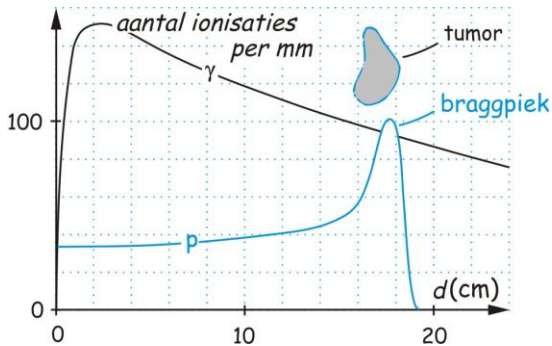
Met versnellers is al antihelium gemaakt: twee antiprotonen, twee antineutronen en twee positronen daarom heen. Kosmologen vragen zich af hoe het heelal er vlak na de oerknal heeft uitgezien, was er toen evenveel materie als antimaterie? En is de laatste soort toen vernietigd? NASA heeft ontdekt dat de zon antimaterie uitstoot in de kromgebogen zonnevlammen, want de bijbehorende radiostraling is andersom gepolariseerd dan bij gewone materie.



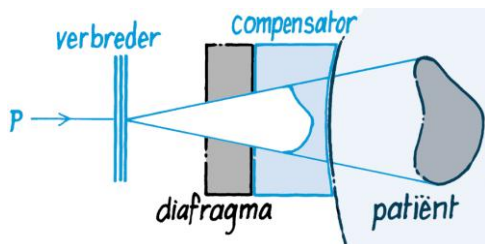
- Wat moest NASA – behalve de polarisatie van het licht – nog extra meten om vast te kunnen stellen dat het inderdaad om antimaterie ging?

Protonentherapie voor tumoren

Bestraling van tumoren met gamma's tast ook omliggend, gezond weefsel aan. Bragg ontdekte al in 1904 dat α 's hun energie in een stof door ionisatie van de atomen vooral afgeven als ze bijna stilstaan (zie p 241 van deel 1). Dat geldt ook voor protonen. De grafiek van het aantal ionisaties per mm tegen de diepte vertoont een *braggpiek*.



Beschieten met snelle protonen is weliswaar duur – er is een versneller nodig – maar levert een precisiebombardement en geen schot hagel. Diepe tumoren worden met dunne protonenbundels ‘bestraald’. Daardoor kan de dosis groter zijn en zijn de bijwerkingen geringer. Als de plaats van de tumor bekend is, wordt de energie zó gekozen, dat de braggpiek samenvalt met de achterkant van de tumor. Ná de tumor wordt dan géén schade aangericht en ervoor – vergeleken met gamma's – weinig. De braggpiek kan naar links worden verschoven door de protonen te vertragen met materiaal tussen bundel en huid. Zo zorg je ervoor dat de hele tumor wordt bestreken. De patiënt moet daarbij wel precies gefixeerd worden om vitale organen in de buurt te ontzien. De vorm van de protonenbundel wordt bepaald door een metalen diafragma. De diepte wordt ingesteld door middel van een uitgeholde schijf perspex.



Om vitale organen te ontzien kan de bundel zelfs om een hoek geleid worden.

- a Met wat voor soort veld?
- b Hoe hangt de uitholling samen met de tumorvorm (rechts) in de lengterichting?
- Protonen ioniseren pas sterk als hun snelheid klein is.
- c Wat zou daar de reden van kunnen zijn?

MRI

Nadat met een RF-puls de protonen in één xy-plak geactiveerd zijn, moeten alle voxels nog hun eigen unieke eigenschappen krijgen. Daarvoor zijn twee stappen nodig.

1 De rijen krijgen hun eigen fase

Vlak voordat een meting begint, wordt eerst in de y-richting *kort* een gradiëntveld aangelegd. Daardoor krijgen de protonen verschillende precessiefrequenties en gaan ze dus met elkaar uit de pas lopen. Na het uitschakelen van dat B_y -veld, krijgen de frequenties weer hun oude waarde, maar elke rij houdt zijn *faseverschil* met de burens.

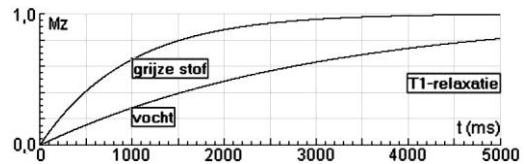
2 De kolommen krijgen hun eigen frequentie

Voordat het meten aan één rij begint, wordt in de x-richting een gradiëntveld aangelegd. Daardoor ontstaan kolommen waarin de protonen hun eigen precessiefrequenties hebben.

Vaak wordt met 256 rijen en 512 kolommen gewerkt: dus met 2^{17} unieke voxels. Via *fourieranalyse* ontrafelt de computer het meetsignaal zodat er een plaatje ontstaat.

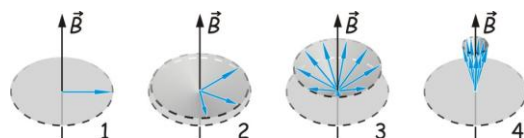
T1-Relaxatie

Op p. 32 heb je al gezien dat de nettovector \vec{M} ronddraaiend uit het xy-vlak terugkeert naar de z-as. Dit wordt *T1-relaxatie* genoemd. Deze twee $M_z(t)$ -grafieken van grijze stof en vocht in de hersenen laten het tempo zien waarin die terugkeer verloopt.



T2-relaxatie

De component van \vec{M} in het xy-vlak, $\vec{M}_{x,y}$, bestaat uit zeer veel deelvectoren die direct na de start-puls met elkaar in de pas lopen, maar in zeer korte tijd uit de pas gaan lopen (*defaseren*) zodat $\vec{M}_{x,y}$ versplinterd wordt. Dit wordt *T2-relaxatie* genoemd.

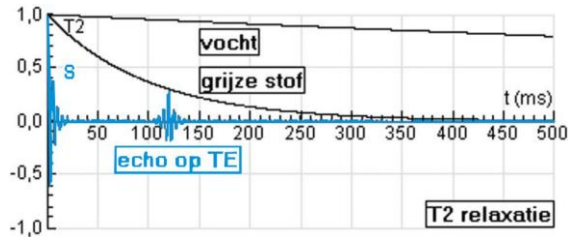


- a Hoe heet het verschijnsel dat de ronddraaiende vector $\vec{M}_{x,y}$ een spanning opwekt in de meetspoel?
- b Leg uit dat in situatie 3 geen spanning meer wordt opgewekt in de meetspoel.

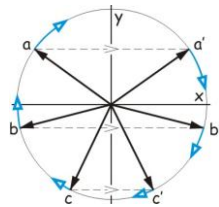
Een echo

Het geven van de RF-puls en het opvangen van het signaal S van de ronddraaiende vector $M_{x,y}$ gaat met dezelfde spoel. Daarom kan niet meteen na de RF-puls begonnen worden met meten. In die verloren tijd wordt de sterkte van S dankzij de T2-relaxatie heel snel nul.

Gelukkig kan van S een *echo* gemaakt worden. De hoogte van die echo wordt bepaald door de waarde die de T2(t)-grafiek op dat moment heeft. Direct nadat de echo zijn top bereikt heeft, daalt de sterkte van S weer naar nul. Nu staat de meetspoel echter klaar om het signaal op te vangen.



De truc bestaat uit het geven van een *refaseringspuls* zodat er na enige tijd op $t = TE$ een echo ontstaat. Door die puls worden de vectoren omgeklapt om de y-as:



$a \rightarrow a'$ $b \rightarrow b'$ enz.

De omgeklapte vectoren blijven met hun oude snelheid in dezelfde richting ronddraaien.

c Leg uit hoe het komt dat er een echo ontstaat.

Beeldcontrast

Het aflezen van alle voxels in één rij gaat razendsnel. Daarna moet de volgende rij in orde worden gemaakt. De tijd tussen het meten aan twee rijen heet de *repetitietijd* (TR). De combinatie van TE en TR bepaalt welk soort contrast je krijgt.

TE = 20 ms en TR = 600 ms

Deze instelling wordt gebruikt om anatomie weer te geven. Uit de T2-grafieken blijkt dat zowel bij vocht als grijze stof na 20 ms een goede echo gemaakt kan worden.



Als je na 600 ms aan een nieuwe rij wilt gaan meten, is er volgens de T1-grafieken voor vocht nog weinig herstel langs de z-as. Voxels met veel vocht zullen dus donker worden.

Deze instelling wordt T1-gewogen genoemd.

TE = 120 ms en TR = 3000 ms

Deze instelling wordt gebruikt om ziektebeelden met veel vocht op te sporen.



Na 3000 ms zijn M_z van zowel vocht als grijze stof redelijk hersteld.

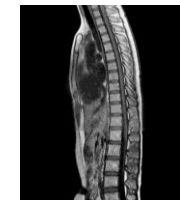
Nu gaan de T2-grafieken een rol spelen, vandaar dat deze instelling T2-gewogen wordt genoemd.

d Leg uit dat de echo van vocht bij deze instelling veel groter is dan die van grijze stof.

e Leg uit dat de voxels met vocht nu wit worden.

TE = 10 ms en TR = 2000 ms

Deze instelling wordt gebruikt om voxels weer te geven die veel protonen bevatten, zoals banden, pezen en kraakbeen.



Daarom wordt deze instelling PD-gewogen genoemd.

PD komt van *proton density*: hoe meer protonen, hoe witter het plaatje.

f Leg uit dat vocht en grijze stof bij deze instelling ongeveer dezelfde beelden geven.