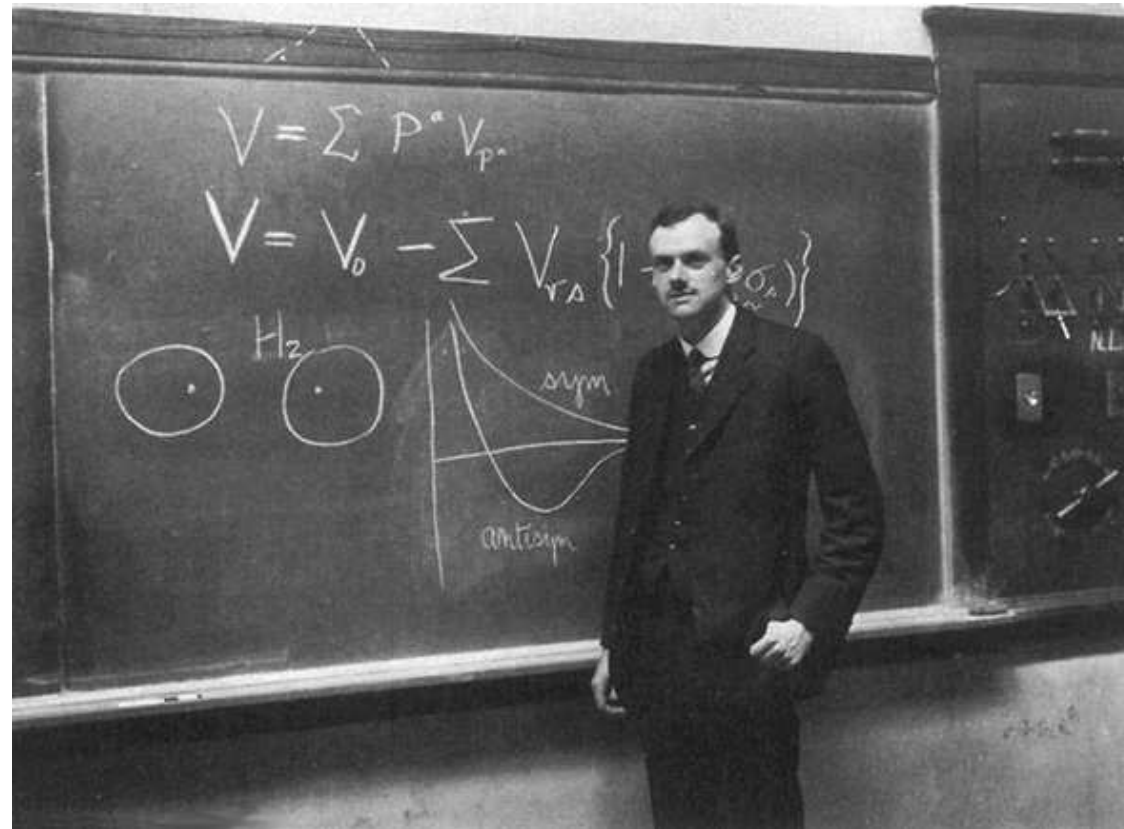


ZOEKEN NAAR HET POSITRON
een wiskundig succes
en de elegantie van een natuurwet

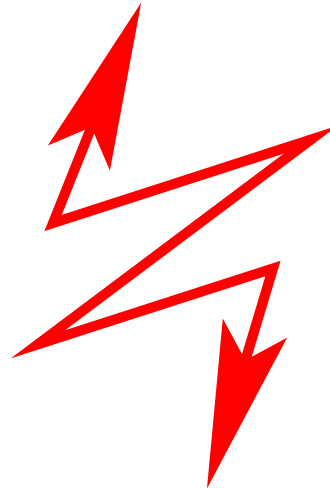
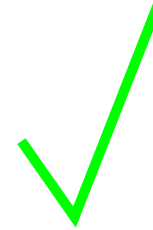


(en een ode aan Dirac)

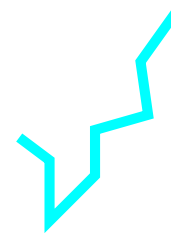
Norbert E. Ligterink

DE STAND VAN ZAKEN IN 1925

RELATIVITEITSTHEORIE

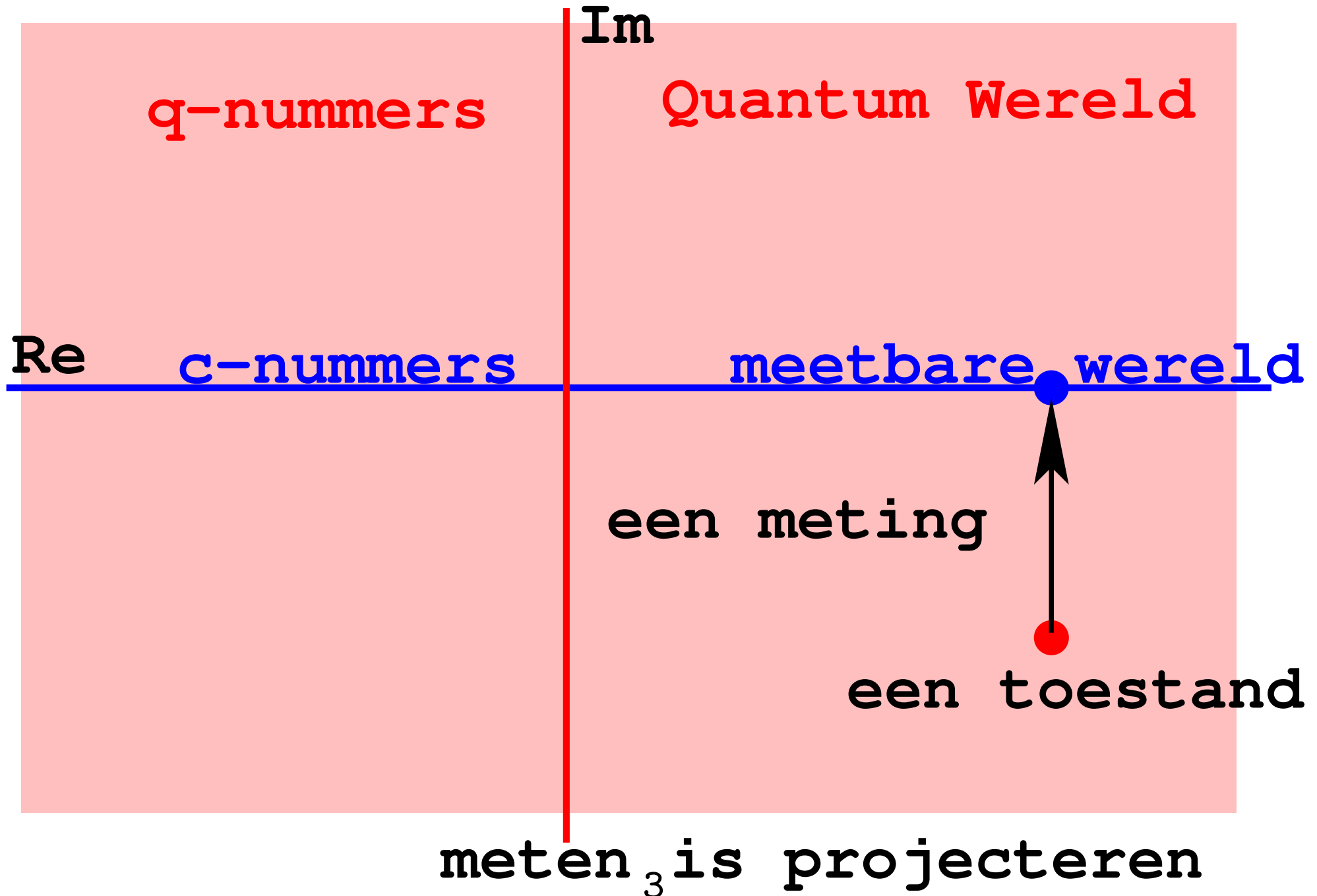


QUANTUMMECHANICA



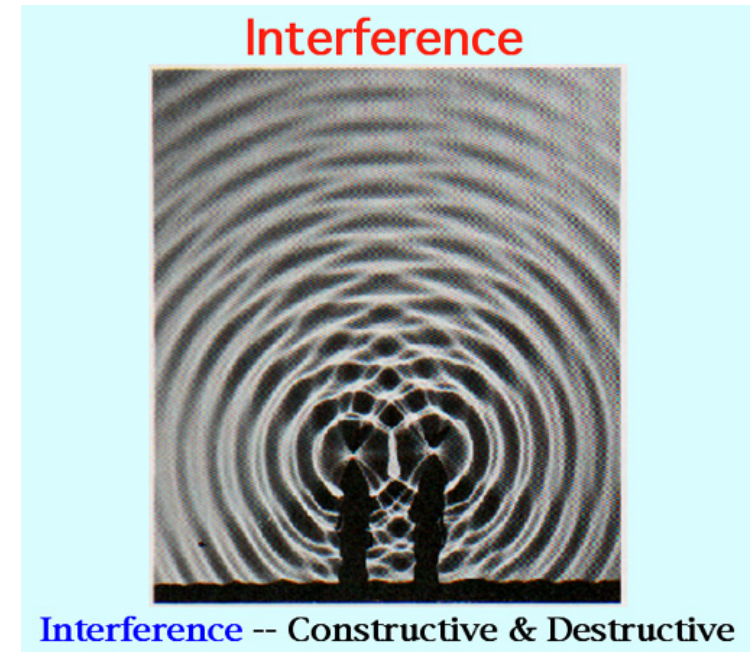
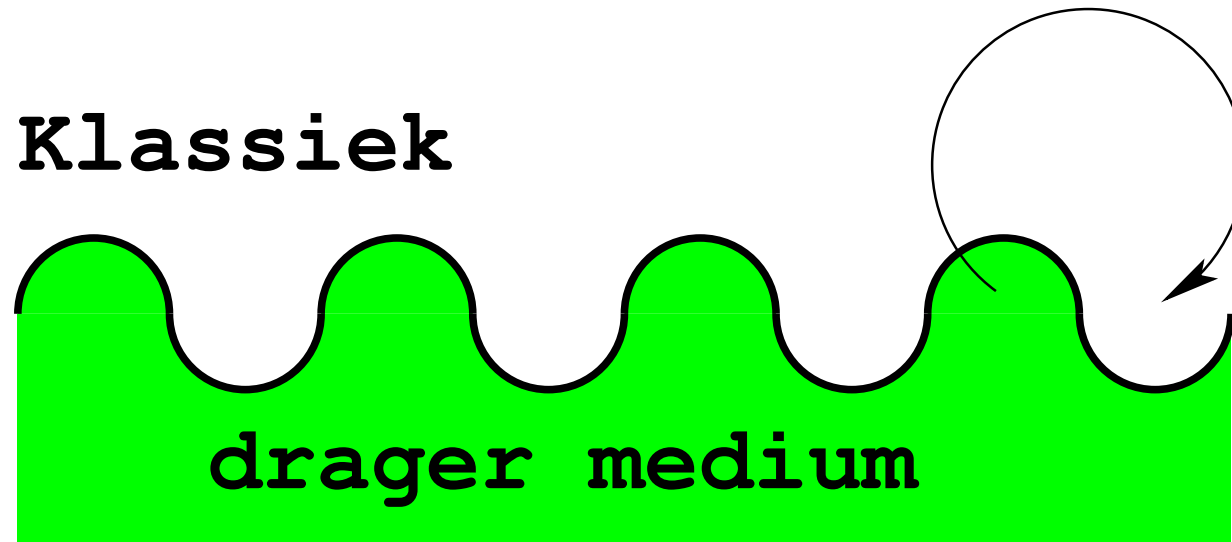
QUANTUMMECHANICA

(complexe vlak)

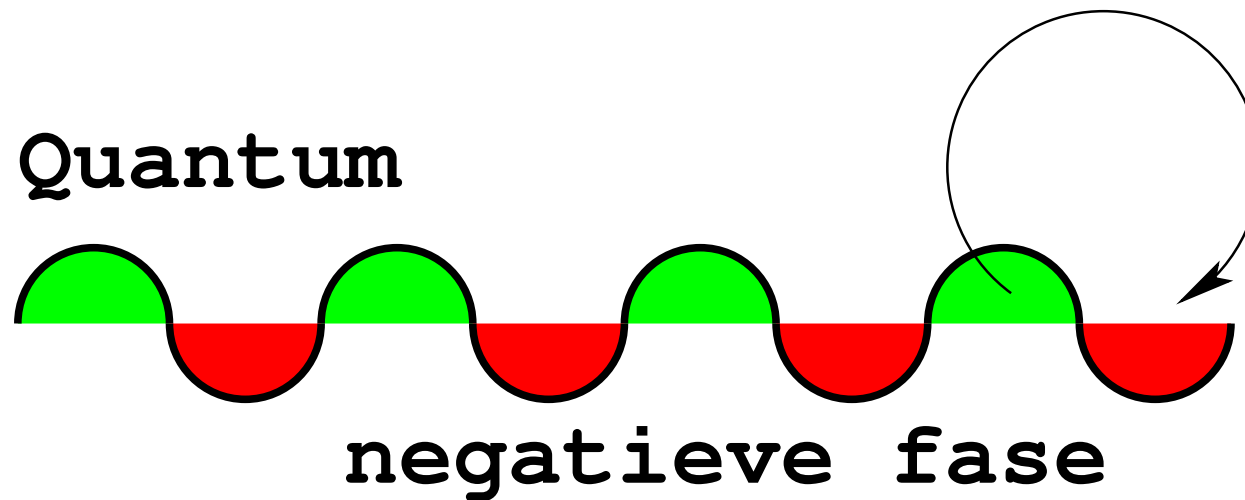


INTERFERENTIE IS FUNDAMENTEEL

Klassiek



Quantum



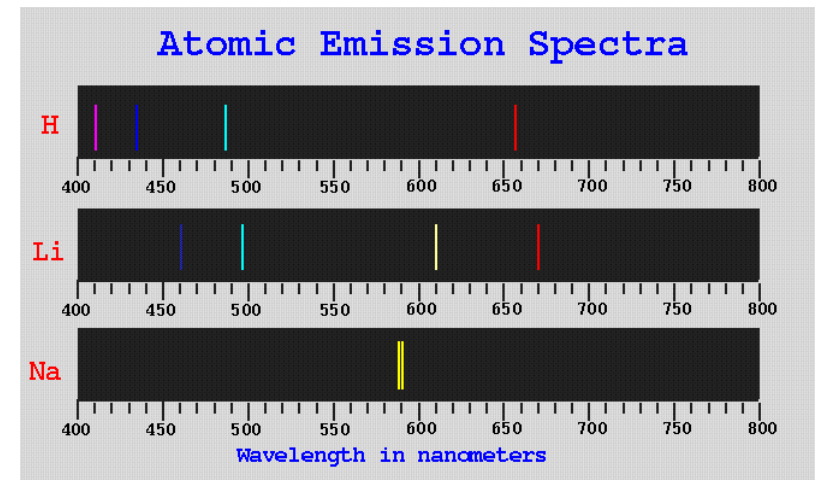
interferentie
zonder
medium

(Leiden, 1925)

DE ELECTRON SPIN-1/2



two measurable
toestanden:
 $+1/2$, $-1/2$



right-handed $(+1/2)$
left-handed $(-1/2)$

RELATIVITEITSTHEORIE

$$\frac{1}{c^2} \frac{d^2}{dt^2} = \frac{d^2}{dx^2} + \frac{d^2}{dy^2} + \frac{d^2}{dz^2}$$

Maxwell, Lorentz, ..

Einstein

fundamentele
golfvergelijking
met constante
lichtsnelheid

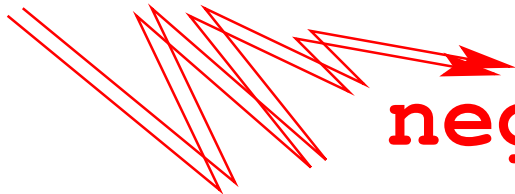
$$i \frac{d}{dt}$$

q-nummer voor energie

$$i \frac{d}{dx}$$

q-nummer voor impuls

Heisenberg



negatieve energie mogelijk

Dirac: wortel trekken uit de golfvergelijking

$$\frac{1}{c^2} \frac{d^2}{dt^2} - \frac{d^2}{dx^2} - \frac{d^2}{dy^2} - \frac{d^2}{dz^2} = 0$$

levert het product van twee eerste-orde vergelijkingen:

$$\Rightarrow \left(\gamma^t \frac{1}{c} \frac{d}{dt} + \gamma^x \frac{d}{dx} + \gamma^y \frac{d}{dy} + \gamma^z \frac{d}{dz} \right) \left(\gamma^t \frac{1}{c} \frac{d}{dt} - \gamma^x \frac{d}{dx} - \gamma^y \frac{d}{dy} - \gamma^z \frac{d}{dz} \right) = 0$$

*Dan moeten de γ -matrices **minimaal** 4×4 zijn.

*De oplossing van de ene vergelijking $\phi(t, x, y, z)$ gelijk de oplossing van de andere vergelijking met $\phi(t, -x, -y, -z)$ of $\phi(-t, x, y, z)$.

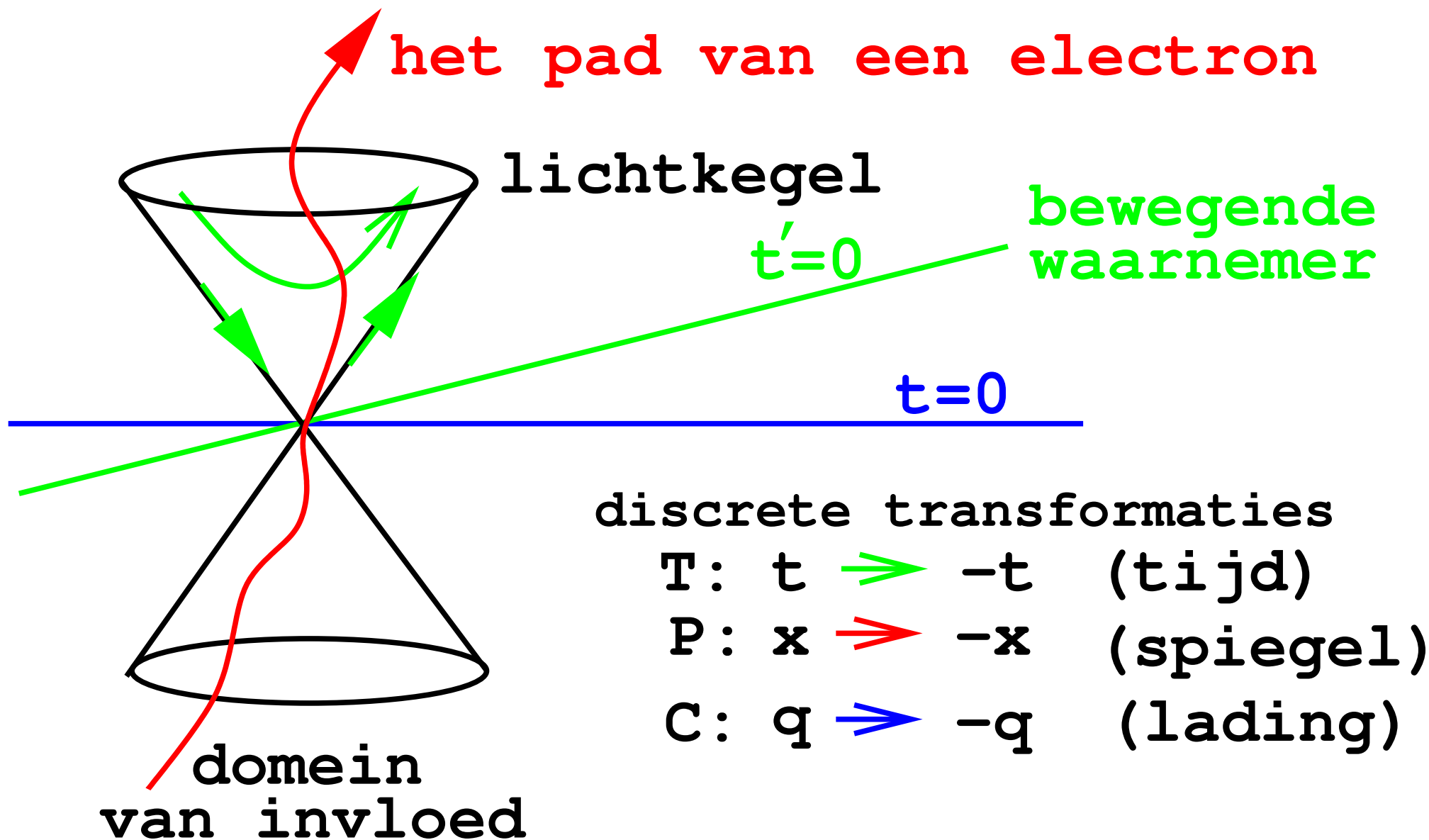
SPINORS:

Oplossingen van de DIRAC vergelijking:
(in Dirac representatie)

$$\text{in rust : } \phi = \begin{pmatrix} \text{spin - up} \\ \text{spin - down} \\ \text{anti - spin - up} \\ \text{anti - spin - down} \end{pmatrix}$$

Dus nog steeds negatieve energy oplossingen!

RELATIVITEITSTHEORIE

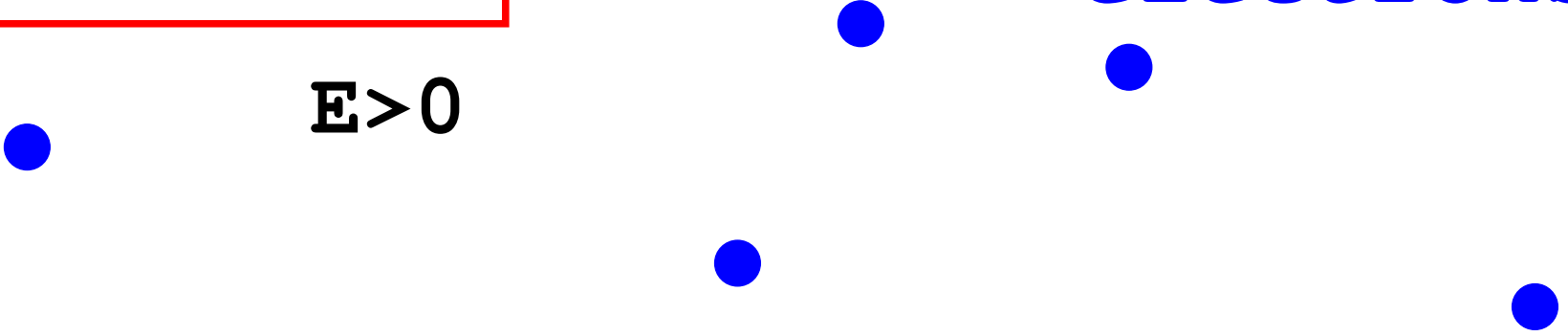


CPT is invariant (1956)

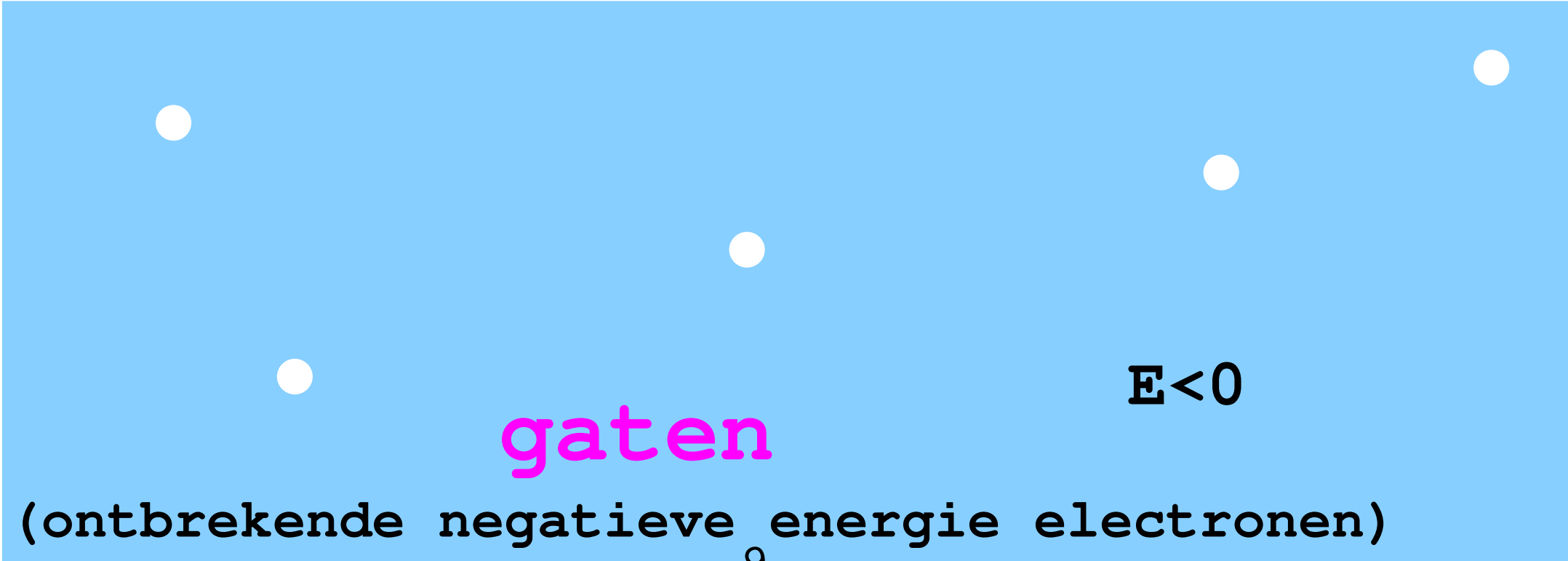
Het antwoord van Dirac:

De Dirac zee

electrons



$E > 0$



$E < 0$

gaten

(ontbrekende negatieve energie electronen)

Anderson vindt het positron in 1932.

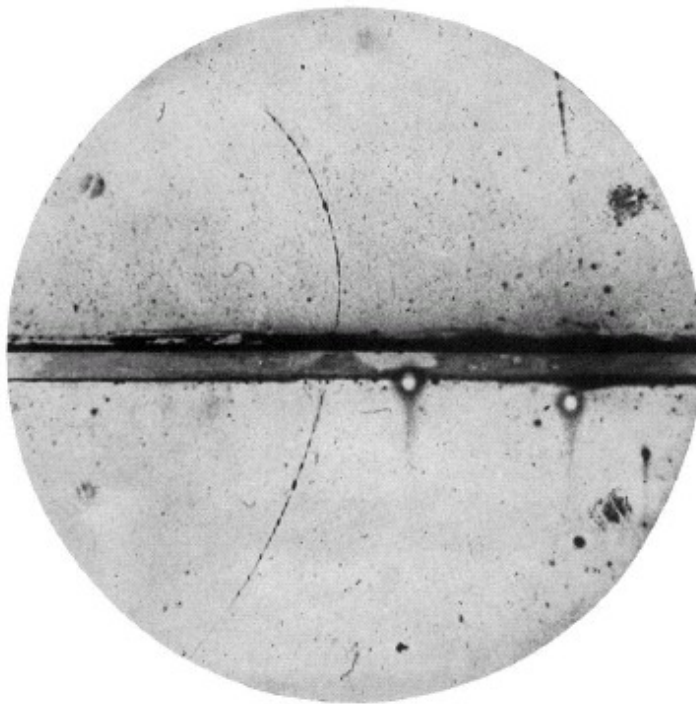
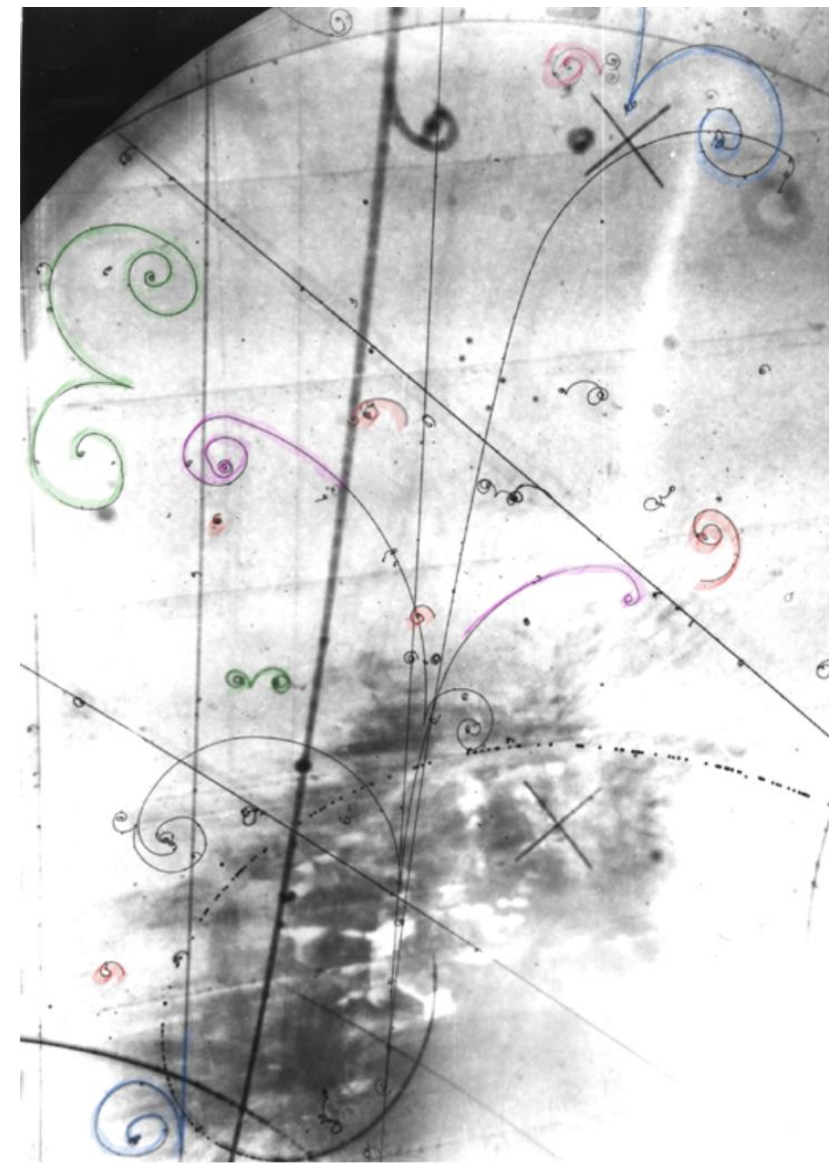


FIG. 1. A 65 million volt positron ($H_p = 2.1 \times 10^6$ gauss-cm) passing through a 6 mm lead plate and emerging as a 23 million volt positron ($H_p = 7.5 \times 10^4$ gauss-cm). The length of this latter path is at least ten times greater than the possible length of a proton path of this curvature.



in een wolken-kamer met een magneetveld

In 1949 verving
Feynman de gaten in
de Dirac zee door
terug-in-de-tijd
electronen: $CP \Rightarrow T$

