



# Er was eens...

Een gerenommeerd theoretisch natuurkundige die

- veel heeft bijgedragen aan de *Snaartheorie*
- de *Humboldt-prijs* heeft gewonnen
- leken enthousiasmeert voor het vak

Wat gaan we doen?

# Zijn naam

Holger Bech Nielsen

Professor aan het Niels  
Bohr-instituut in Kopenhagen



Wat gaan we doen?

# Controversieel idee

*Wat gebeurt er met de natuurkunde wanneer we een  
imaginair deel toevoegen aan de actie?*

# Controversieel idee

*Wat gebeurt er met de natuurkunde wanneer we een imaginair deel toevoegen aan de actie?*

- “Dingen die nu gebeuren worden niet alleen beïnvloed door het verleden, maar ook door de toekomst.”
- “We krijgen het Higgsdeeltje nooit te zien, dit heeft het deeltje in de toekomst al besloten.”
- ...

# Controversieel idee

*Wat gebeurt er met de natuurkunde wanneer we een imaginair deel toevoegen aan de actie?*

- “Dingen die nu gebeuren worden niet alleen beïnvloed door het verleden, maar ook door de toekomst.”
- “We krijgen het Higgsdeeltje nooit te zien, dit heeft het deeltje in de toekomst al besloten.”
- ...

Een geniaal idee of een beetje over de top?

# Plan

- 1 Is dit een aanvaardbaar idee?
- 2 Met welke rekenmethoden kunnen we dit testen?
- 3 Hoe werken deze methoden ook al weer?
- 4 Hoe ziet zo'n berekening er uit?

# Plan

- 1 Is dit een aanvaardbaar idee?
- 2 Met welke rekenmethoden kunnen we dit testen?
- 3 Hoe werken deze methoden ook al weer?
- 4 Hoe ziet zo'n berekening er uit?



Is dit een aanvaardbaar idee?

# Valt wel mee

- Toevoeging aan bestaande wetten
- Ook gebeurt van klassiek naar kwantum
- *Zolang ze in de klassieke limiet geen invloed hebben!*

Is dit een aanvaardbaar idee?

# Valt wel mee

- Toevoeging aan bestaande wetten
- Ook gebeurt van klassiek naar kwantum
- *Zolang ze in de klassieke limiet geen invloed hebben!*

## De Broglie golflengte

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

Klein ten opzichte van object

⇒

kwantum effecten verwaarloosbaar.

# Plan

- 1 Is dit een aanvaardbaar idee?
- 2 Met welke rekenmethoden kunnen we dit testen?
- 3 Hoe werken deze methoden ook al weer?
- 4 Hoe ziet zo'n berekening er uit?

Met welke rekenmethoden kunnen we dit testen?

# Zoektocht

- Maakt gebruik van de *klassieke actie*:

$$S = \int_{t_A}^{t_B} L(x, \dot{x}, t) dt$$

- Legt link tussen actie en *kwantummechanica*
- Doet iets met *complexe getallen*

Met welke rekenmethoden kunnen we dit testen?

# Zoektocht

- Maakt gebruik van de *klassieke actie*:

$$S = \int_{t_A}^{t_B} L(x, \dot{x}, t) dt$$

- Legt link tussen actie en *kwantummechanica*
- Doet iets met *complexe getallen*

## Feynman padintegraal

$$K(B, A) = \int_{x_A}^{x_B} \exp[iS/\hbar] \mathcal{D}x(t)$$

Integraal over *alle mogelijke paden* van  $A$  naar  $B$ .

# Plan

- 1 Is dit een aanvaardbaar idee?
- 2 Met welke rekenmethoden kunnen we dit testen?
- 3 Hoe werken deze methoden ook al weer?
- 4 Hoe ziet zo'n berekening er uit?

Hoe werken deze methoden ook al weer?

# Twee spleten experiment

Hoe werken deze methoden ook al weer?

# Twee spleten experiment

$B$  ■



Hoe werken deze methoden ook al weer?

# Twee spleten experiment

$B$  ■

$D$



Hoe werken deze methoden ook al weer?

# Twee spleten experiment

$B$  ■

$S$

$D$

Hoe werken deze methoden ook al weer?

# Twee spleten experiment

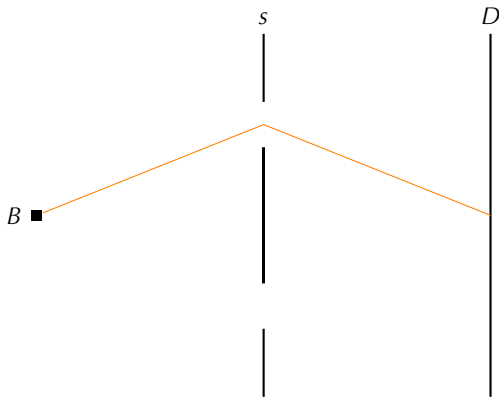
$B$  ■

$S$

$D$

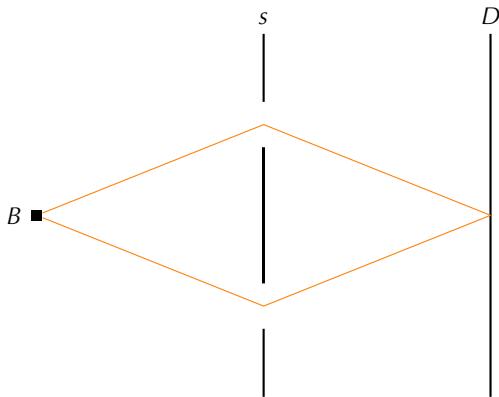
Hoe werken deze methoden ook al weer?

# Twée spleten experiment



Hoe werken deze methoden ook al weer?

# Twée spleten experiment



Hoe werken deze methoden ook al weer?

# Interferentie

$B$  ■

$S$

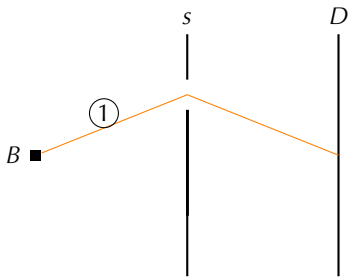


$D$



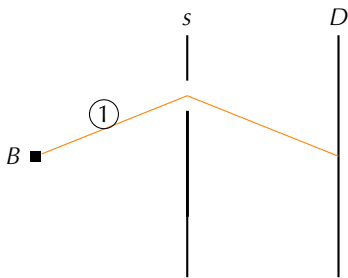
Hoe werken deze methoden ook al weer?

# Interferentie



Hoe werken deze methoden ook al weer?

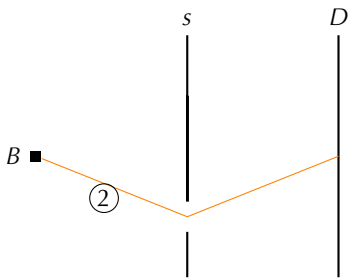
# Interferentie





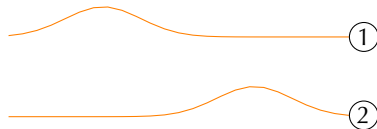
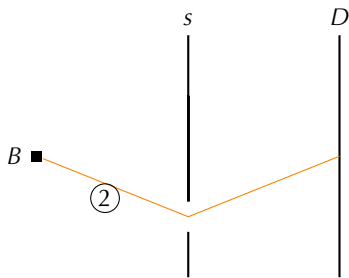
Hoe werken deze methoden ook al weer?

# Interferentie



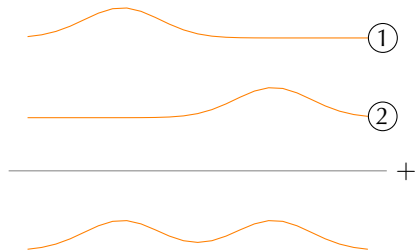
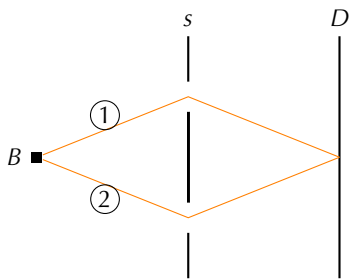
Hoe werken deze methoden ook al weer?

# Interferentie



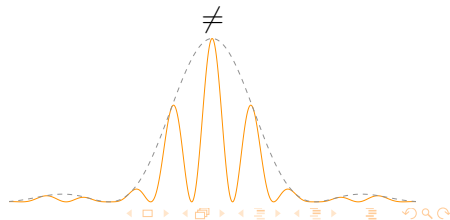
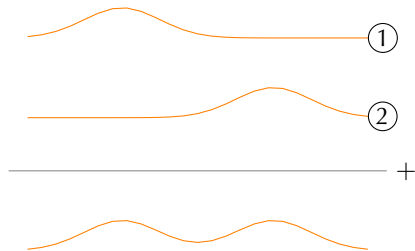
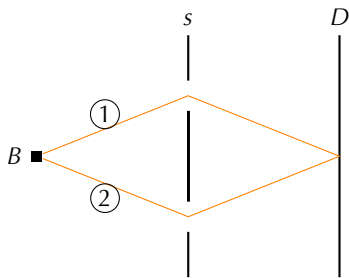
Hoe werken deze methoden ook al weer?

# Interferentie



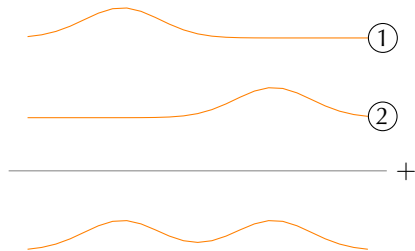
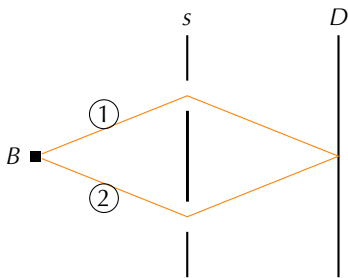
Hoe werken deze methoden ook al weer?

# Interferentie



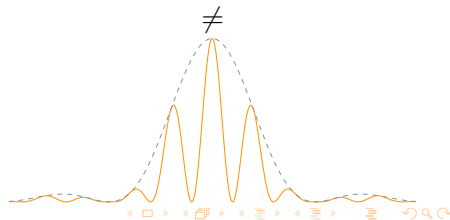
Hoe werken deze methoden ook al weer?

# Interferentie



Kansen niet optellen!

$$P \neq P_1 + P_2$$



# Postulaten

## Postulaat 1

$$P = |\psi|^2$$

$\psi$  is de complexe *waarschijnlijkheidsamplitude*

# Postulaten

## Postulaat 1

$$P = |\psi|^2$$

$\psi$  is de complexe *waarschijnlijkheidsamplitude*

## Postulaat 2

$$\psi = \psi_1 + \psi_2$$

die we *wel* bij elkaar mogen optellen

# Postulaten

## Postulaat 1

$$P = |\psi|^2$$

$\psi$  is de complexe *waarschijnlijkheidsamplitude*

## Postulaat 2

$$\psi = \psi_1 + \psi_2$$

die we *wel* bij elkaar mogen optellen

## Postulaat 3

$$\psi_n \sim \exp[iS_n/\hbar]$$

en wordt berekend met de actie!



# Plan

- 1 Is dit een aanvaardbaar idee?
- 2 Met welke rekenmethoden kunnen we dit testen?
- 3 Hoe werken deze methoden ook al weer?
- 4 Hoe ziet zo'n berekening er uit?

Hoe ziet zo'n berekening er uit?

# Reflecties

Hoe ziet zo'n berekening er uit?

# Reflecties

$B$



Hoe ziet zo'n berekening er uit?

# Reflecties

 $B$  $D$ 

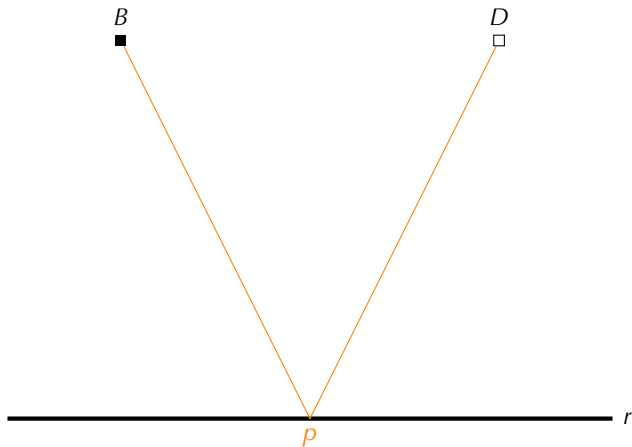
Hoe ziet zo'n berekening er uit?

# Reflecties

 $B$  $D$  $r$

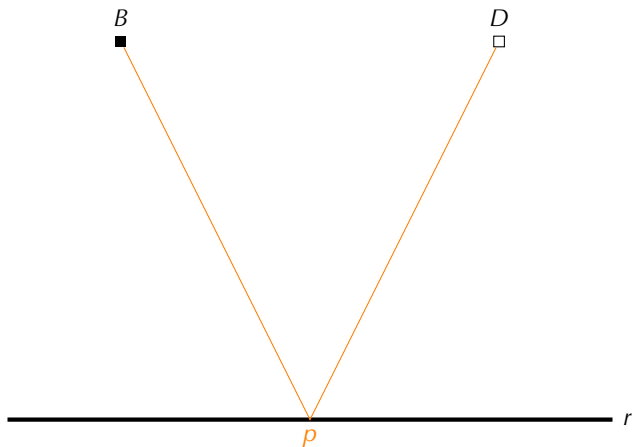
Hoe ziet zo'n berekening er uit?

# Reflecties



Hoe ziet zo'n berekening er uit?

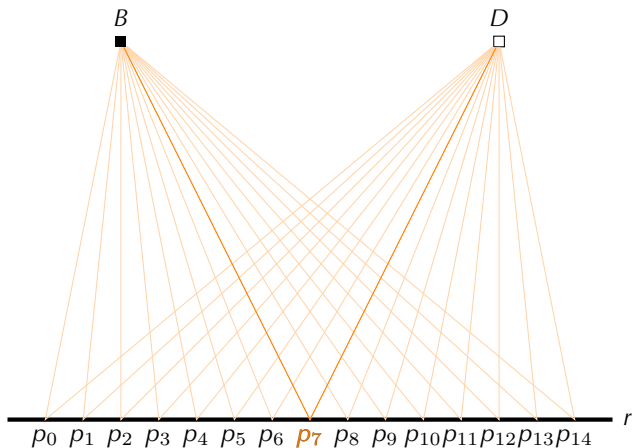
# Reflecties



Alle paden mogen meedoen, ook paden die klassiek onmogelijk zijn.

Hoe ziet zo'n berekening er uit?

# Reflecties



Alle paden mogen meedoen, ook paden die klassiek onmogelijk zijn.



Hoe ziet zo'n berekening er uit?

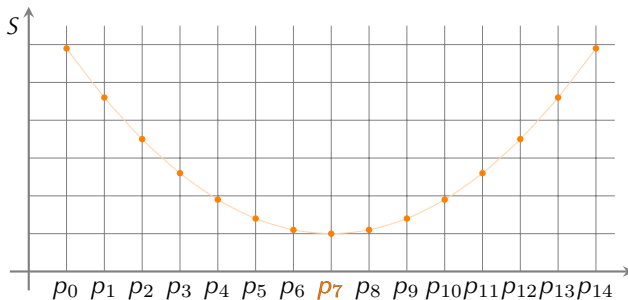
## Fases en acties

- Voor elk pad klassieke actie uitrekenen

Hoe ziet zo'n berekening er uit?

# Fases en acties

- Voor elk pad klassieke actie uitrekenen

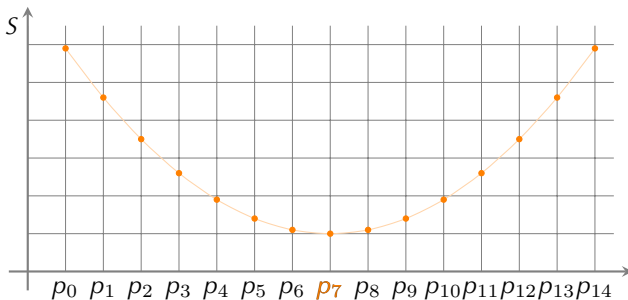


Hoe ziet zo'n berekening er uit?

# Fases en acties

- Voor elk pad klassieke actie uitrekenen
- Geeft ons een *fasor*

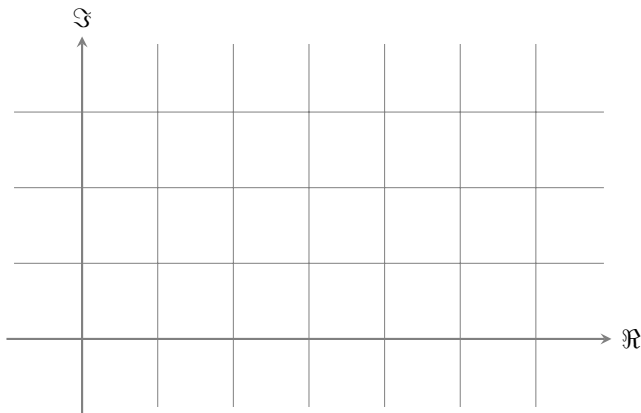
$$\psi_n \sim \exp[iS/\hbar] \equiv \exp[i\varphi]$$





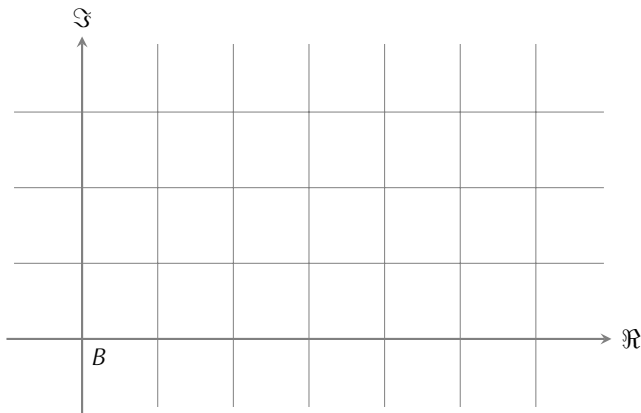
Hoe ziet zo'n berekening er uit?

# Som over paden



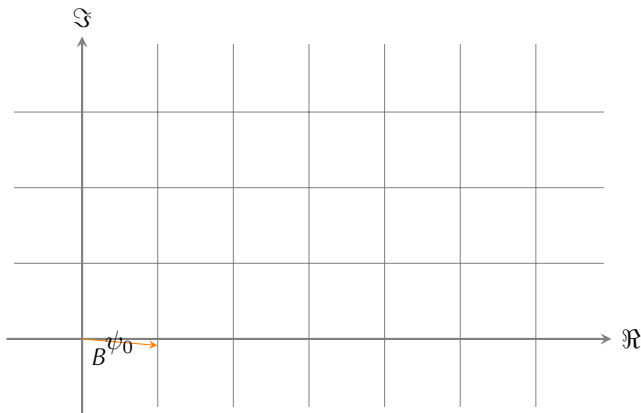
Hoe ziet zo'n berekening er uit?

# Som over paden



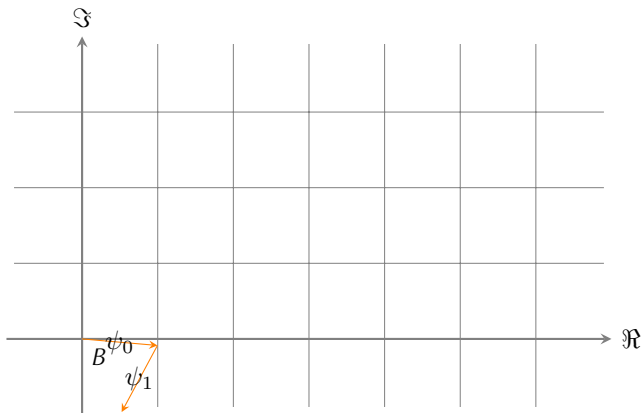
Hoe ziet zo'n berekening er uit?

# Som over paden



Hoe ziet zo'n berekening er uit?

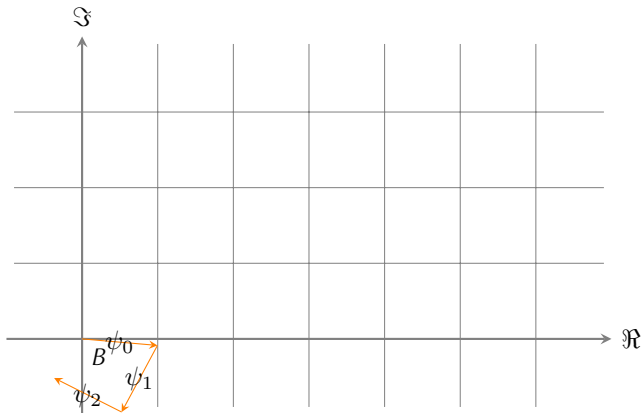
# Som over paden





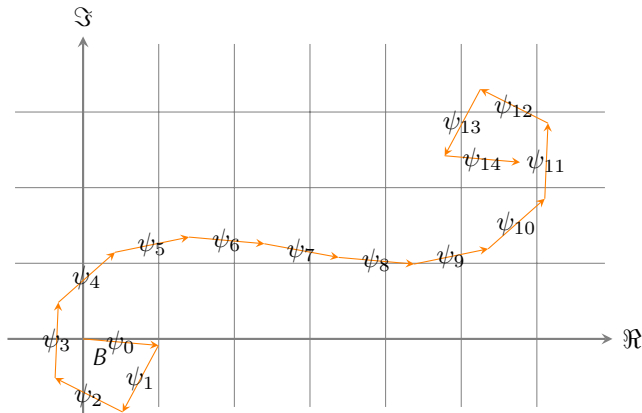
Hoe ziet zo'n berekening er uit?

# Som over paden



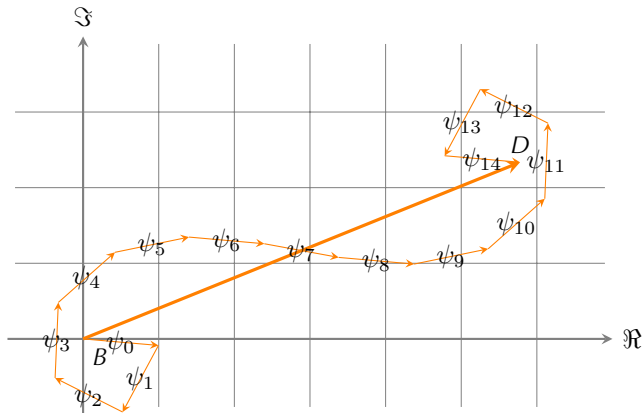
Hoe ziet zo'n berekening er uit?

# Som over paden

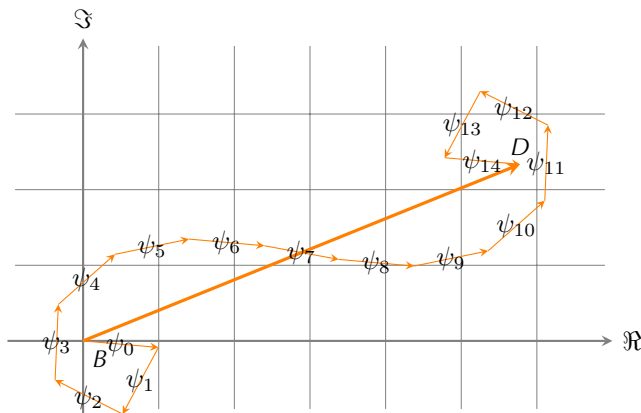


Hoe ziet zo'n berekening er uit?

# Som over paden

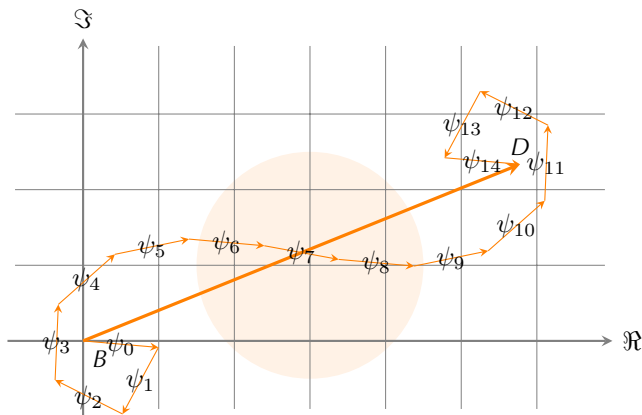


# Som over paden



- Lengte resulterende vector geeft kans

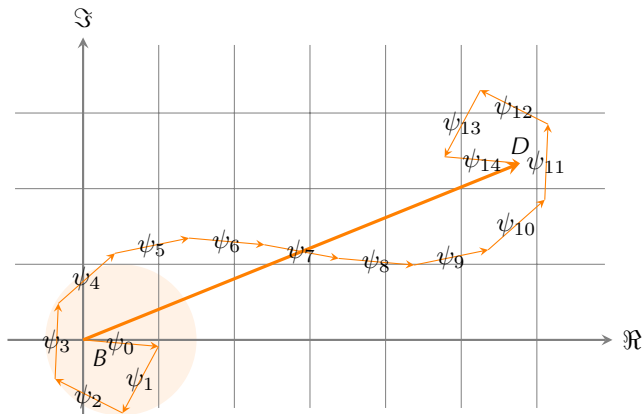
# Som over paden



- Lengte resulterende vector geeft kans
- Dichtbij klassieke pad: fase varieert weinig

Hoe ziet zo'n berekening er uit?

# Som over paden



- Lengte resulterende vector geeft kans
- Dichtbij klassieke pad: fase varieert weinig
- Totaal niet klassieke paden: fases variëren snel

Hoe ziet zo'n berekening er uit?

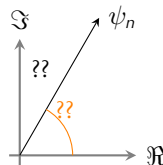
# Imaginair deel

$$S \mapsto S_r + iS_i$$

$$\varphi \mapsto \varphi_r + i\varphi_i$$

Imaginair deel

$$\varphi \mapsto \varphi_r + i\varphi_i$$



- hoek
- lengte

("absorptie" of "impact" door reflecterende plaat)

## Simulatie om effecten te onderzoeken



Wat hebben we gezien?

## (Voorlopige) antwoorden

- 1 Aanvaardbaar om bestaande wetten uit te breiden
- 2 Testen met padintegralen
- 3 Oplossen door sommeren van fasoren
- 4 Complexe actie verandert lengte en hoek fasor