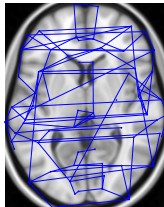


het brein en netwerken

Lourens Waldorp, Universiteit van Amsterdam



maggio

wat is het brein?



wat is het brein?



- een massa van ongeveer 1400 gram.

wat is het brein?



- een massa van ongeveer 1400 gram.
- uitgevouwen heeft het een oppervlak van ongeveer 4 A4tjes (A2).

wat is het brein?



- een massa van ongeveer 1400 gram.
- uitgevouwen heeft het een oppervlak van ongeveer 4 A4tjes (A2).
- ongeveer $2/3$ oppervlak ligt in groeven.

wat is het brein?



- een massa van ongeveer 1400 gram.
- uitgevouwen heeft het een oppervlak van ongeveer 4 A4tjes (A2).
- ongeveer $2/3$ oppervlak ligt in groeven.
- het is verbonden met het hele lichaam.

wat is het brein?



wat is het brein?



- het brein bestaat uit ongeveer 100 miljard neuronen.

wat is het brein?



- het brein bestaat uit ongeveer 100 miljard neuronen.
- de lengte ligt ongeveer tussen 1 mm en 1 m.

wat is het brein?



- het brein bestaat uit ongeveer 100 miljard neuronen.
- de lengte ligt ongeveer tussen 1 mm en 1 m.
- als je alle breincellen (alleen neuronen) aan elkaar maakt, dan heb je een 'touw' van ongeveer 1000 km.

wat is het brein?



wat is het brein?



- die massa van ongeveer 1400 gram...

wat is het brein?



- die massa van ongeveer 1400 gram...
- stelt het ons in staat te praten, lopen, ...

wat is het brein?



- die massa van ongeveer 1400 gram...
- stelt het ons in staat te praten, lopen, ...
- waar begin je met onderzoek?

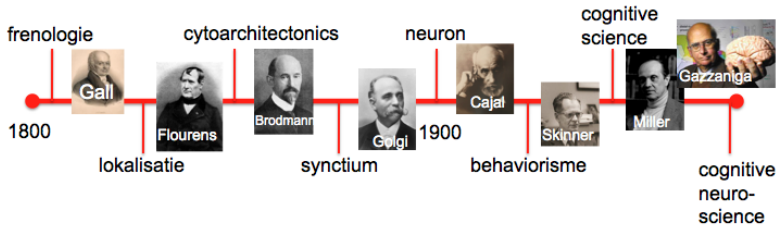
wat is het brein?



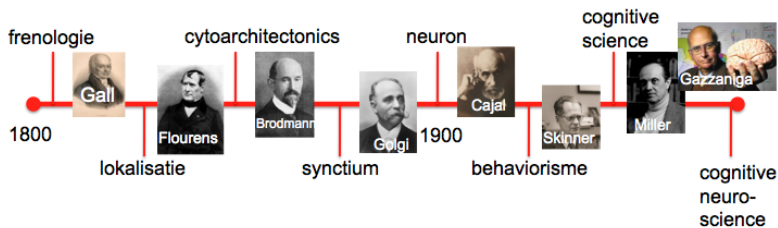
- die massa van ongeveer 1400 gram...
- stelt het ons in staat te praten, lopen, ...
- waar begin je met onderzoek?
- **eerste vraag is of er één ding is of dat kleine onderdelen samewerken.**

korte geschiedenis

korte geschiedenis

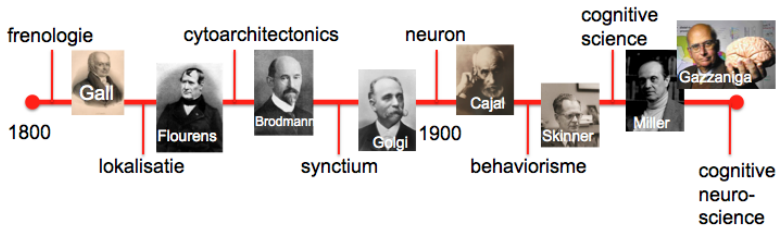


korte geschiedenis



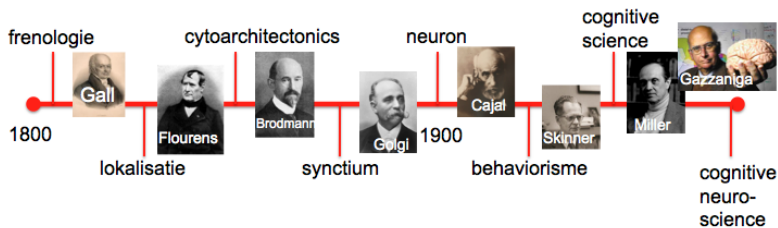
- functies zijn gelokaliseerd (Gall, Brodmann).

korte geschiedenis



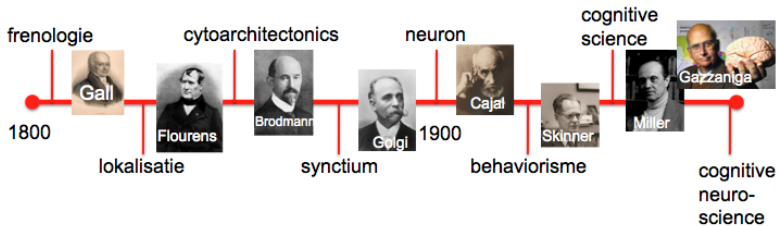
- functies zijn gelokaliseerd (Gall, Brodmann).
- de neuron is de kleinste betekenisvolle eenheid in het brein (Cajal v. Golgi).

korte geschiedenis



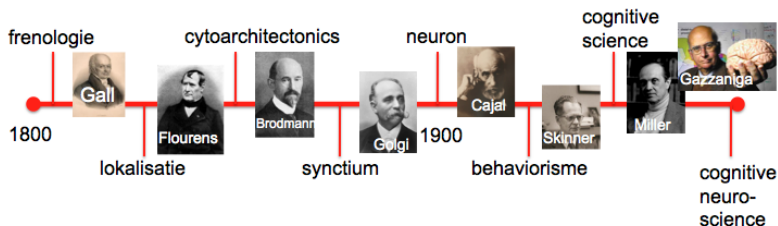
- functies zijn gelokaliseerd (Gall, Brodmann).
- de neuron is de kleinste betekenisvolle eenheid in het brein (Cajal v. Golgi).
- gedrag is alles (Skinner).

korte geschiedenis



- functies zijn gelokaliseerd (Gall, Brodmann).
- de neuron is de kleinste betekenisvolle eenheid in het brein (Cajal v. Golgi).
- gedrag is alles (Skinner).
- gedrag verklaren vereist het brein (Miller). [▶ go](#)

korte geschiedenis



- functies zijn gelokaliseerd (Gall, Brodmann).
- de neuron is de kleinste betekenisvolle eenheid in het brein (Cajal v. Golgi).
- gedrag is alles (Skinner).
- gedrag verklaren vereist het brein (Miller).
- het brein is de verklaring voor gedrag (Gazzaniga).

visuele illusie



is er een meer?

visuele illusie

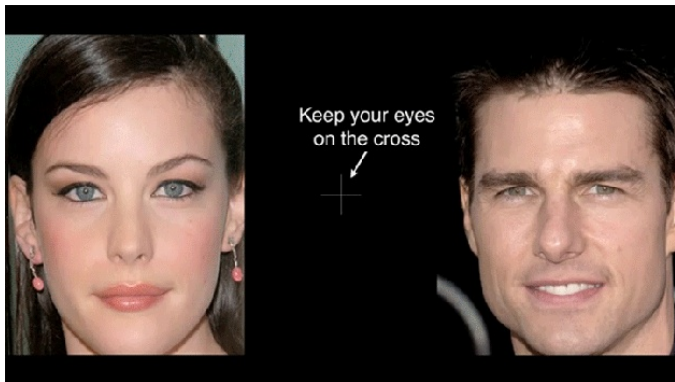


is er een meer?



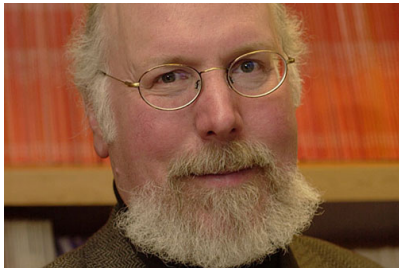
nee

visuele illusie

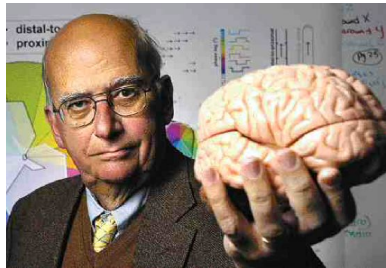


► illusion

visie van nu

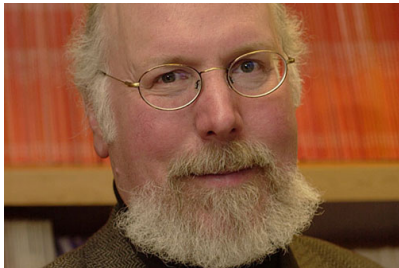


Stephen Kosslyn (1948-)

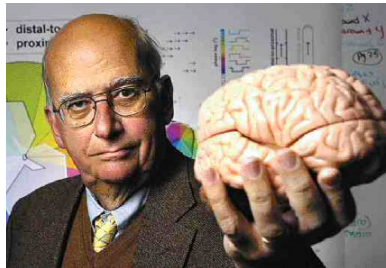


Michael Gazzaniga (1939-)

visie van nu



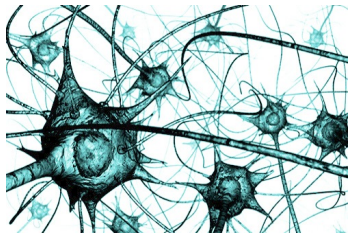
Stephen Kosslyn (1948-)



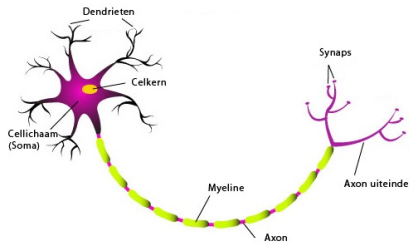
Michael Gazzaniga (1939-)

“Any given complex ability, then, is not accomplished by a single part of the brain. So in this sense, the globalists were right. The kinds of functions posited by the phrenologists are not localized to a single brain region. However, simple processes that are recruited to exercise such abilities are localized. So in this sense, the localizationists were right.”
(Kosslyn and Anderson, 1992)

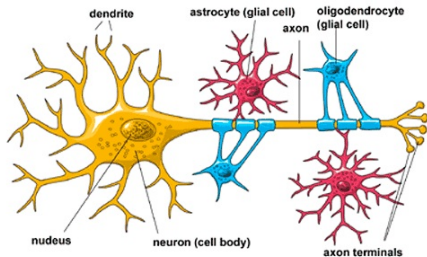
anatomie van het brein



neuronen



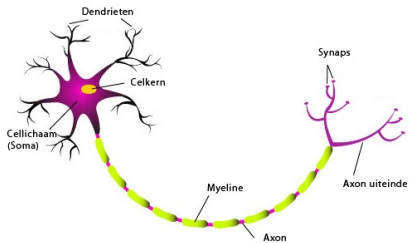
Neuron



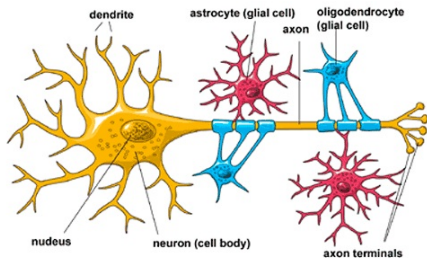
Gliacel

twee typen hersencel

neuronen



Neuron

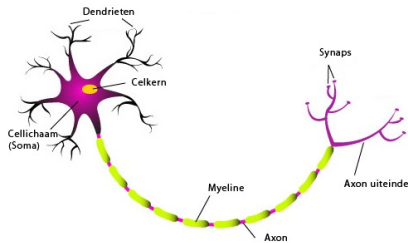


Gliacel

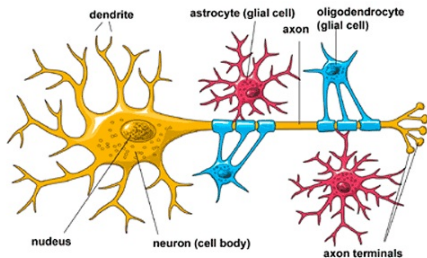
twee typen hersencel

- neuronen: verantwoordelijk voor gedrag.

neuronen



Neuron

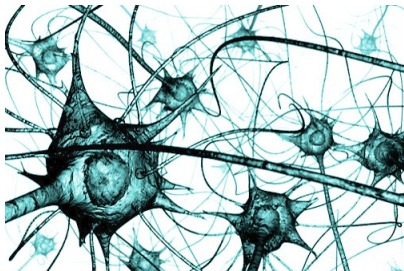


Gliacel

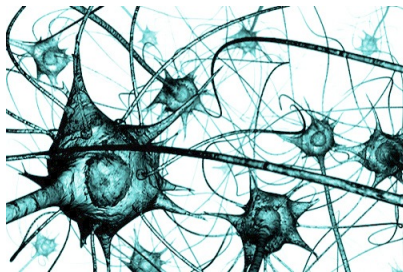
twee typen hersencel

- neuronen: verantwoordelijk voor gedrag.
- gliacellen: ondersteunende functie.

neuronen

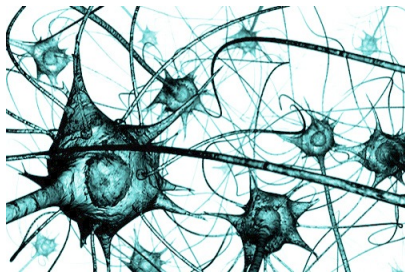


neuronen



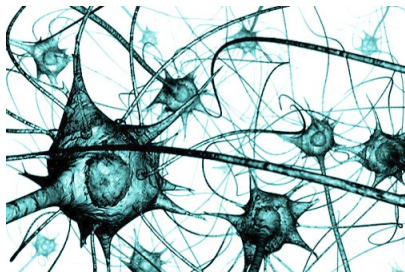
- de communicatie tussen neuronen maakt gedrag mogelijk.

neuronen



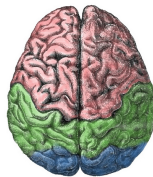
- de communicatie tussen neuronen maakt gedrag mogelijk.
- dit is een complex netwerk met ongeveer een miljard \times miljard aantal verbindingen (10^{18}).

neuronen



- de communicatie tussen neuronen maakt gedrag mogelijk.
- dit is een complex netwerk met ongeveer een miljard \times miljard aantal verbindingen (10^{18}).
- dat is ongeveer een miljard \times het aantal sterren in ons melkwegstelsel.

anatomie van het brein



hoe het brein in te delen?

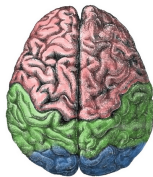
anatomie van het brein



hoe het brein in te delen?

- anatomisch: de structuur, vorm of celdichtheid bepaald het gebied.

anatomie van het brein

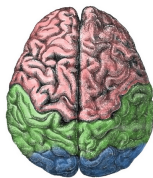
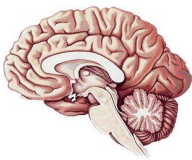


hoe het brein in te delen?

- anatomisch: de structuur, vorm of celdichtheid bepaald het gebied.

Brodman gebieden

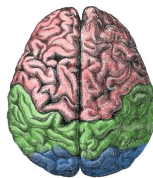
anatomie van het brein



hoe het brein in te delen?

- anatomisch: de structuur, vorm of celdichtheid bepaald het gebied.
Brodmann gebieden
- functioneel: de reactie op een bepaald type stimulus bepaald het gebied.

anatomie van het brein



hoe het brein in te delen?

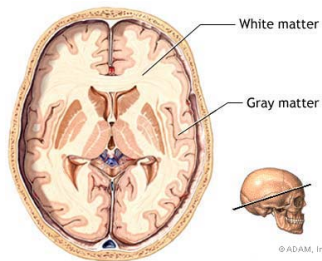
- anatomisch: de structuur, vorm of celdichtheid bepaald het gebied.

Brodman gebieden

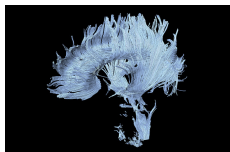
- functioneel: de reactie op een bepaald type stimulus bepaald het gebied.

Visuele gebied

anatomie van het brein



witte en grijze stof

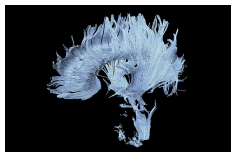
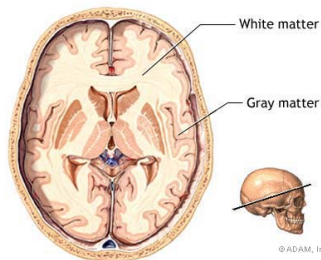


witte stof



grijze stof

anatomie van het brein



witte stof

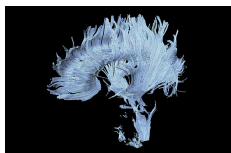
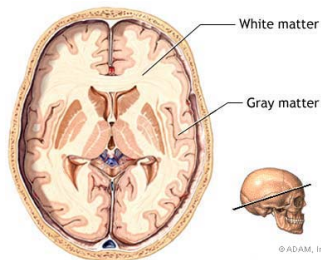


grijze stof

witte en grijze stof

- grijze stof aan de rand bevat cellichamen van de neuronen (cortex).

anatomie van het brein



witte stof

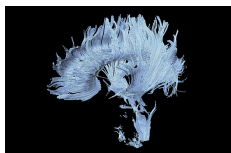
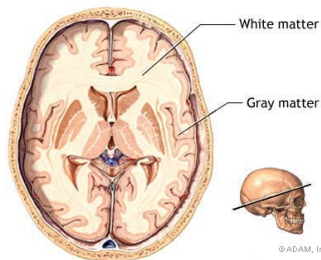


grijze stof

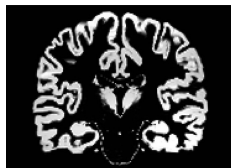
witte en grijze stof

- grijze stof aan de rand bevat cellichamen van de neuronen (cortex).
- witte stof bevat de axonen met de myeline die melkwit is.

anatomie van het brein



witte stof

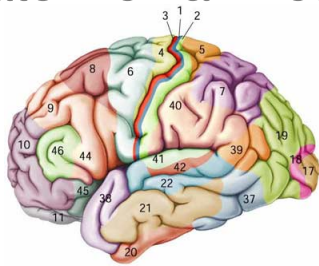


grijze stof

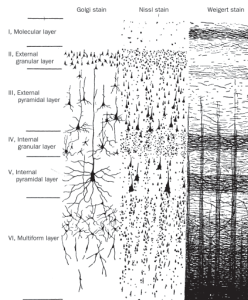
witte en grijze stof

- grijze stof aan de rand bevat cellichamen van de neuronen (cortex).
- witte stof bevat de axonen met de myeline die melkwit is. verbind corticale gebieden met elkaar (cortico-corticale verbindingen).

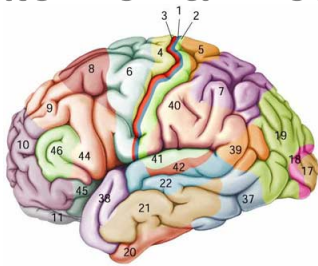
anatomie van het brein



Brodman gebieden

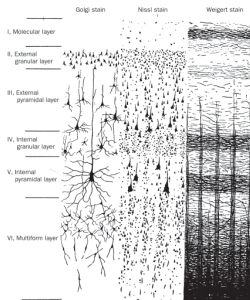


anatomie van het brein

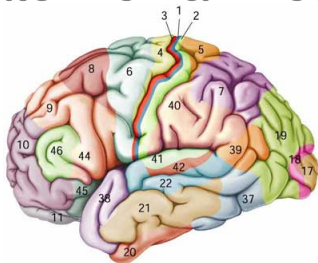


Brodman gebieden

- o indeling van de cortex naar de vorm en organisatie van neuronen (*cytoarchitectonics*).

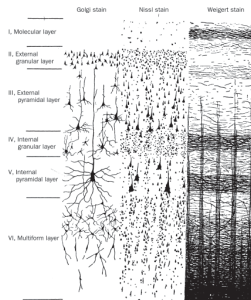


anatomie van het brein

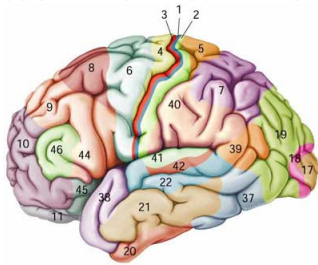


Brodman gebieden

- indeling van de cortex naar de vorm en organisatie van neuronen (*cytoarchitectonics*).
- er zijn 52 gebieden, in (willekeurige) volgorde van onderzoek.

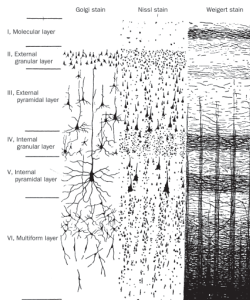


anatomie van het brein



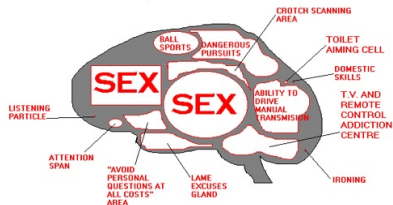
Brodman gebieden

- indeling van de cortex naar de vorm en organisatie van neuronen (*cytoarchitectonics*).
- er zijn 52 gebieden, in (willekeurige) volgorde van onderzoek.
- ideaal voor combinatie met functies. Bijvoorbeeld, BA17 is V1.



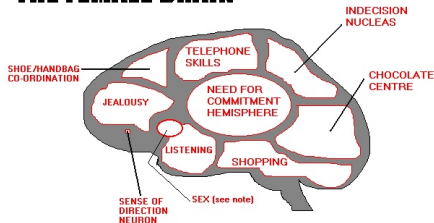
anatomie van het brein

The Male Brain



FOOTNOTE: the "Listening to children cry in the middle of the night" gland is not shown due to it's small and underdeveloped nature. Best viewed under a microscope.

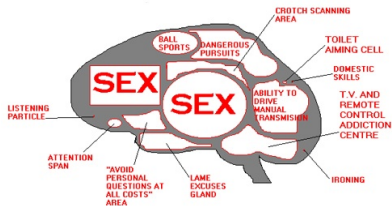
THE FEMALE BRAIN



FOOTNOTE: Note how closely connected the small sex cell is to the listening gland.

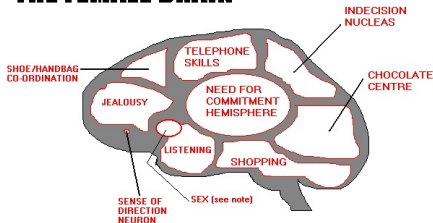
anatomie van het brein

The Male Brain



FOOTNOTE: the "Listening to children cry in the middle of the night" gland is not shown due to it's small and underdeveloped nature. Best viewed under a microscope.

THE FEMALE BRAIN

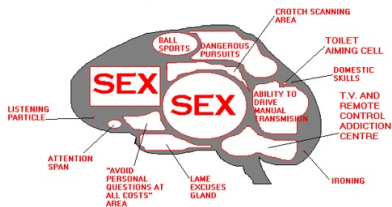


FOOTNOTE: Note how closely connected the small sex cell is to the listening gland.

- o functionele kaart van het brein.

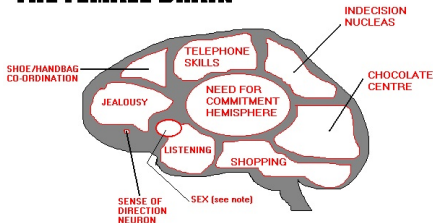
anatomie van het brein

The Male Brain



FOOTNOTE: the "Listening to children cry in the middle of the night" gland is not shown due to it's small and underdeveloped nature. Best viewed under a microscope.

THE FEMALE BRAIN

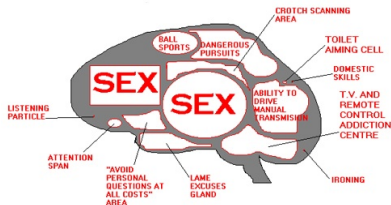


FOOTNOTE: Note how closely connected the small sex cell is to the listening gland.

- functionele kaart van het brein.
- verondersteld volledige lokalisatie (neofrenologie);

anatomie van het brein

The Male Brain



FOOTNOTE: the "Listening to children cry in the middle of the night" gland is not shown due to it's small and underdeveloped nature. Best viewed under a microscope.

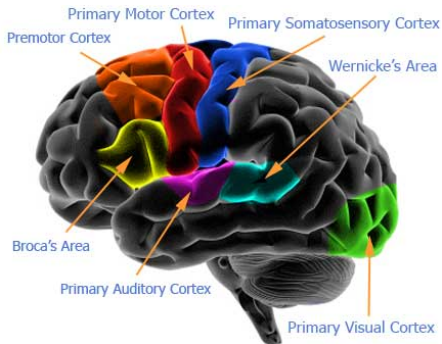
THE FEMALE BRAIN



FOOTNOTE: Note how closely connected the small sex cell is to the listening gland.

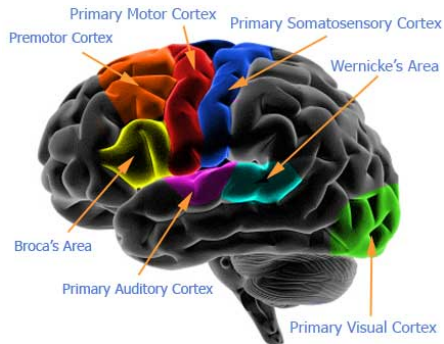
- functionele kaart van het brein.
- verondersteld volledige lokalisatie (neofrenologie);
- alles in de wereld heeft een eigen plekje in het brein. **Klopt dat wel?**

anatomie van het brein



functionele indeling

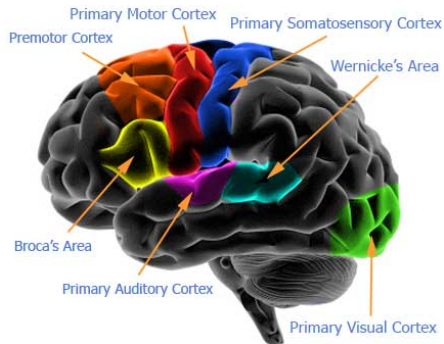
anatomie van het brein



functionele indeling

- o **motorcortex**

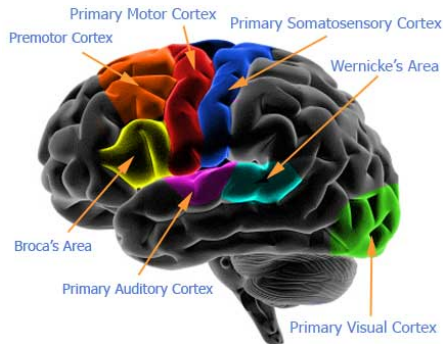
anatomie van het brein



functionele indeling

- **motorcortex**
- **somatosensorische cortex**

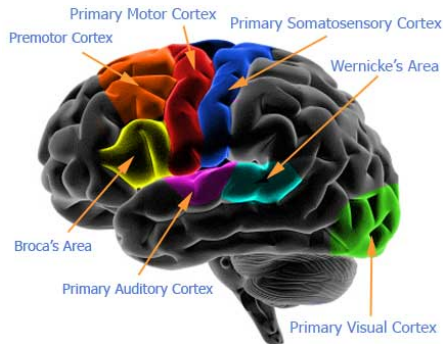
anatomie van het brein



functionele indeling

- **motorcortex**
- **somatosensorische cortex**
- **visuele cortex**

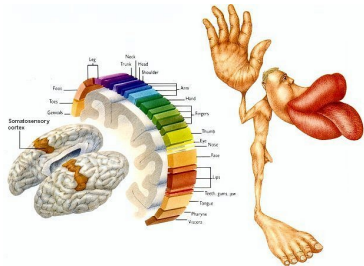
anatomie van het brein



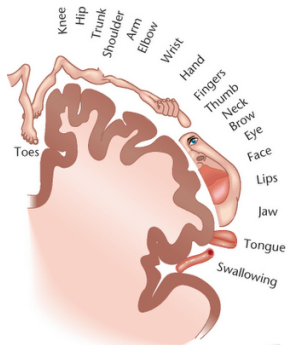
functionele indeling

- **motorcortex**
- **somatosensorische cortex**
- **visuele cortex**
- **auditieve cortex**

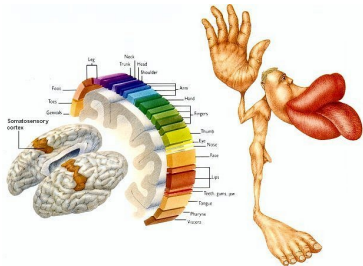
anatomie van het brein



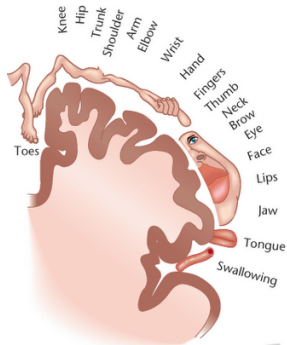
primair sensorisch gebied



anatomie van het brein

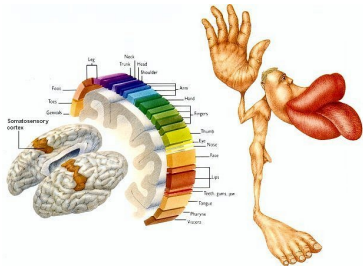


primair sensorisch gebied

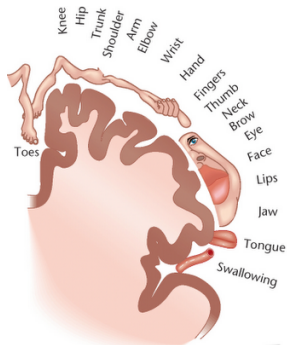


- o ieder gebied met zenuwen in het lichaam is gelokaliseerd op SI.

anatomie van het brein



primair sensorisch gebied



- ieder gebied met zenuwen in het lichaam is gelokaliseerd op SI.
- de grootte van het gebied representeert het aantal zenuwen in het corresponderende lichaamsdeel (**frenologie?**).

connectiviteit van het brein



<http://www.youtube.com/watch?v=YadP3w7vkJA>

connectiviteit van het brein



- hoe komt het dat vogels zo goed samen vliegen?

<http://www.youtube.com/watch?v=YadP3w7vkJA>

connectiviteit van het brein



<http://www.youtube.com/watch?v=YadP3w7vkJA>

- hoe komt het dat vogels zo goed samen vliegen?
- is er een vogel die alle andere vogels in de gaten houdt?

connectiviteit van het brein



<http://www.youtube.com/watch?v=YadP3w7vkJA>

- hoe komt het dat vogels zo goed samen vliegen?
- is er een vogel die alle andere vogels in de gaten houdt?

regels voor dit gedrag:

connectiviteit van het brein



<http://www.youtube.com/watch?v=YadP3w7vkJA>

- hoe komt het dat vogels zo goed samen vliegen?
- is er een vogel die alle andere vogels in de gaten houdt?

regels voor dit gedrag:

1. cohesie: beweeg naar de gemiddelde positie van je **buren**.

connectiviteit van het brein



<http://www.youtube.com/watch?v=YadP3w7vkJA>

- hoe komt het dat vogels zo goed samen vliegen?
- is er een vogel die alle andere vogels in de gaten houdt?

regels voor dit gedrag:

1. cohesie: beweeg naar de gemiddelde positie van je **buren**.
2. separatie: beweeg niet te dicht op je **buren**.

connectiviteit van het brein



<http://www.youtube.com/watch?v=YadP3w7vkJA>

- hoe komt het dat vogels zo goed samen vliegen?
- is er een vogel die alle andere vogels in de gaten houdt?

regels voor dit gedrag:

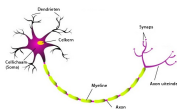
1. cohesie: beweeg naar de gemiddelde positie van je **buren**.
2. separatie: beweeg niet te dicht op je **buren**.
3. richting: beweeg in de gemiddelde richting van je **buren**.

connectiviteit van het brein

niveau

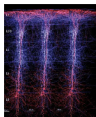
schaal

neuron



microschaal

minikolom



mesoschaal

parcellatie



macroschaal

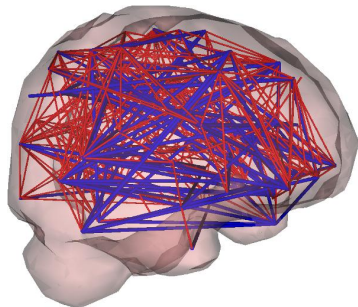
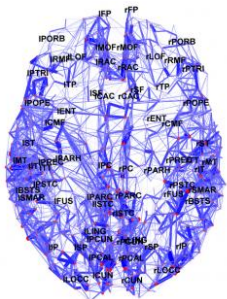
gedrag



connectiviteit van het brein

anatomisch

functioneel



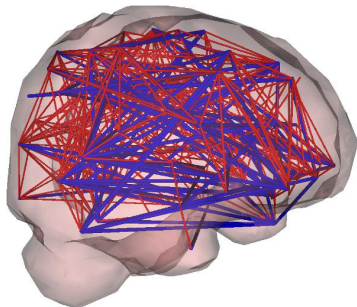
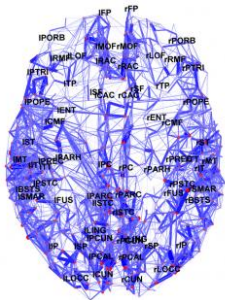
fysieke verbindingen

correlaties van activatie

connectiviteit van het brein

anatomisch

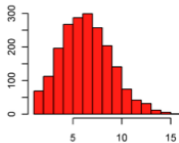
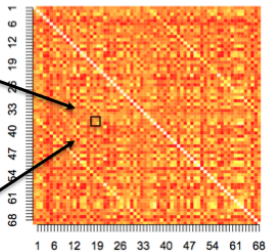
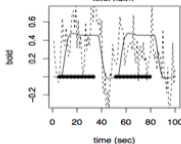
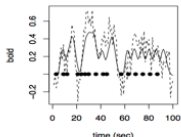
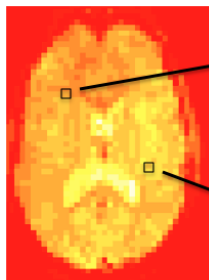
functioneel



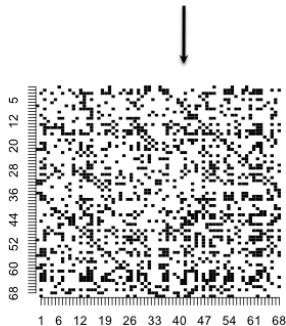
fysieke verbindingen

correlaties van activatie

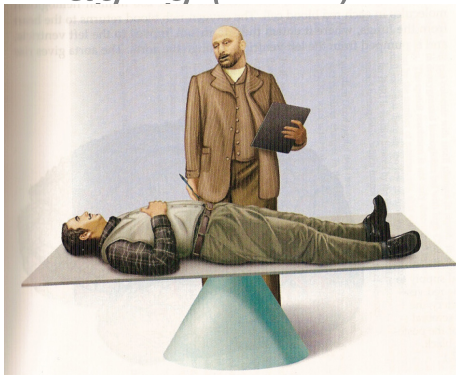
connectiviteit van het brein



$$\sigma = \frac{\gamma/\gamma_{RN}}{\ell/\ell_{RN}}$$

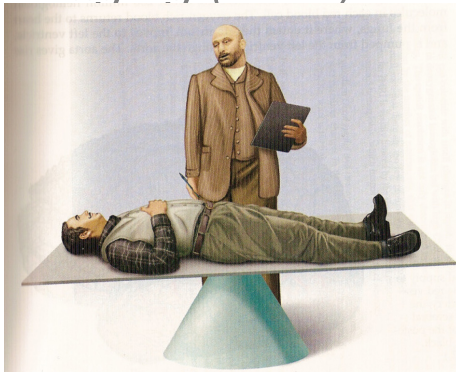


functional Magnetic Resonance Imaging (fMRI)



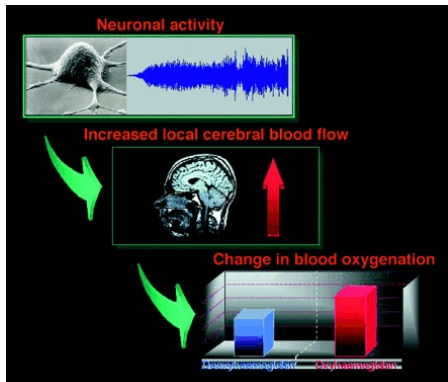
Angelo Mosso (1846 – 1919)

functional Magnetic Resonance Imaging (fMRI)

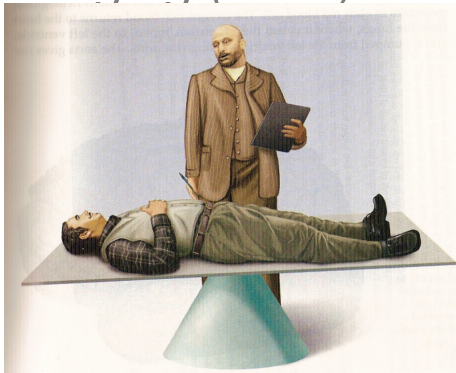


Angelo Mosso (1846 – 1919)

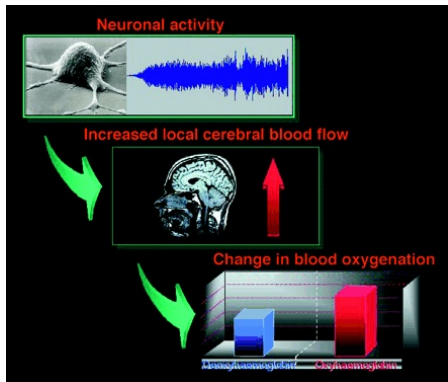
- volume van bloed t.o.v. doorstroming



functional Magnetic Resonance Imaging (fMRI)

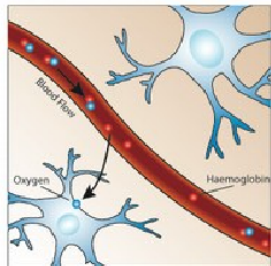


Angelo Mosso (1846 – 1919)



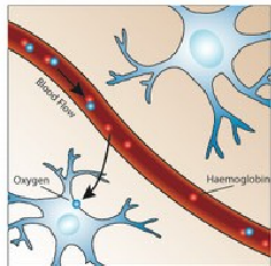
- volume van bloed t.o.v. doorstroming
- verandering in doorstroming → veranderingen in magnetisch veld

functional Magnetic Resonance Imaging (fMRI)

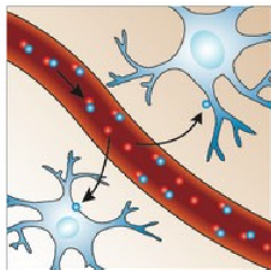


Resting

functional Magnetic Resonance Imaging (fMRI)



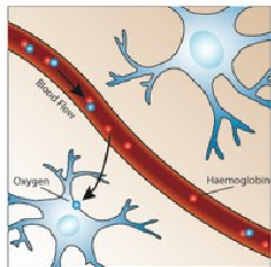
Resting



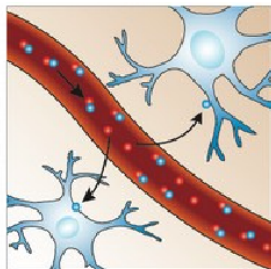
Activated

- zuurstof is energie voor neuronen.

functional Magnetic Resonance Imaging (fMRI)



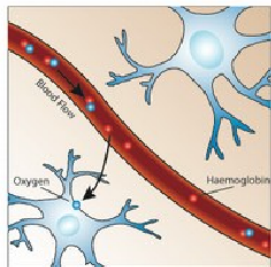
Resting



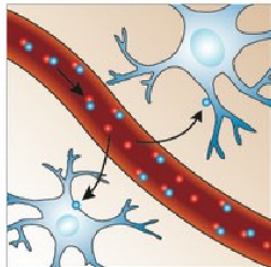
Activated

- zuurstof is energie voor neuronen.
- bij hard werken wordt er lokaal meer zuurstof geleverd via het bloed.

functional Magnetic Resonance Imaging (fMRI)



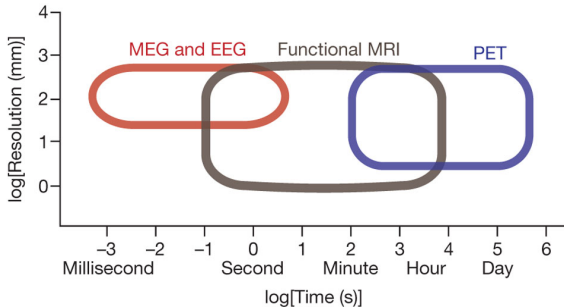
Resting



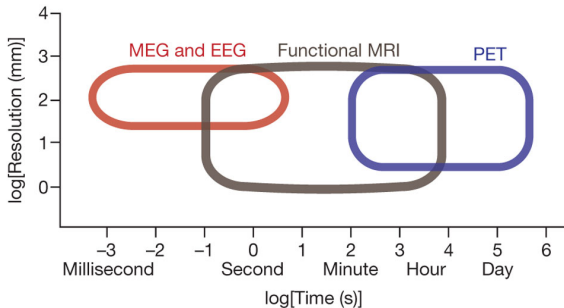
Activated

- zuurstof is energie voor neuronen.
- bij hard werken wordt er lokaal meer zuurstof geleverd via het bloed.
- blood Oxygenated Level Dependent (BOLD)

functional Magnetic Resonance Imaging (fMRI)

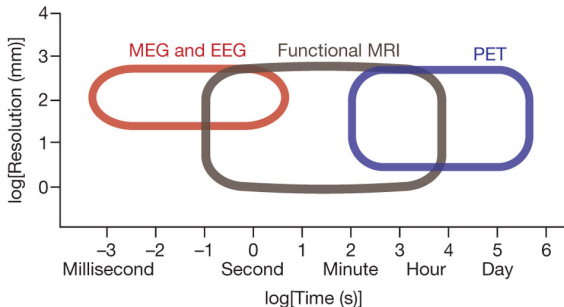


functional Magnetic Resonance Imaging (fMRI)



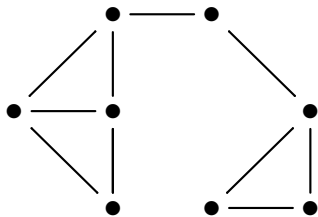
- tijdsresolutie van fMRI is laag (sec).

functional Magnetic Resonance Imaging (fMRI)

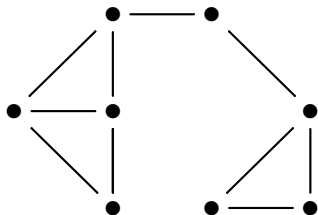


- tijdsresolutie van fMRI is laag (sec).
- spatiële resolutie van fMRI is hoog (mm).

betweenness centraliteit

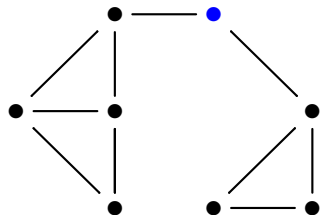


betweenness centraliteit



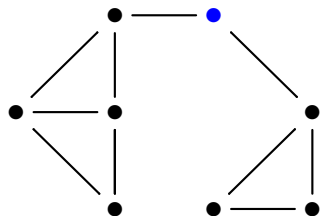
- de persoon die iedereen verbindt

betweenness centraliteit



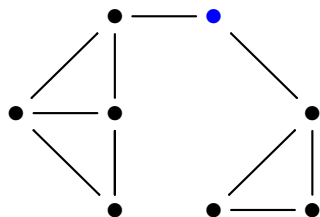
- de persoon die iedereen verbindt

betweenness centraliteit



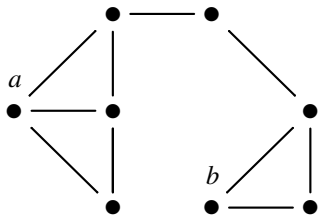
- de persoon die iedereen verbindt
- een persoon is belangrijk als ie vaak wordt 'gebruikt' om van a naar b te komen in het netwerk

betweenness centraliteit

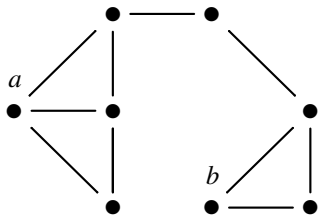


- de persoon die iedereen verbindt
- een persoon is belangrijk als ie vaak wordt 'gebruikt' om van a naar b te komen in het netwerk
- zo'n knoop wordt *cutpoint* genoemd als het 't netwerk in tweeën kan splitsen

betweenness centraliteit

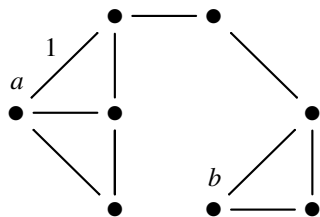


betweenness centraliteit



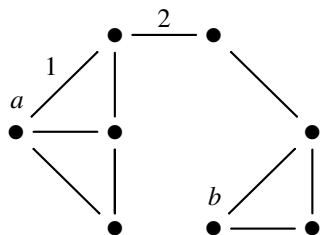
- er zijn meerdere paden tussen a en b

betweenness centraliteit



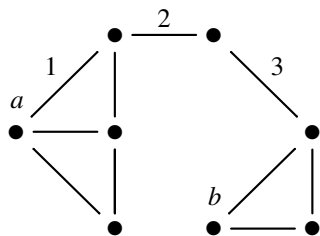
- er zijn meerdere paden tussen a en b

betweenness centraliteit



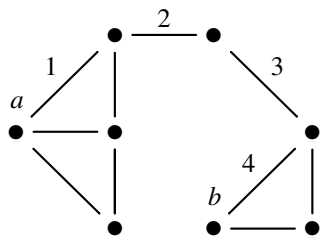
- er zijn meerdere paden tussen a en b

betweenness centraliteit



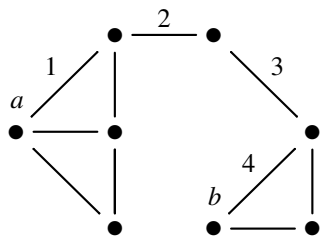
- er zijn meerdere paden tussen *a* en *b*

betweenness centraliteit



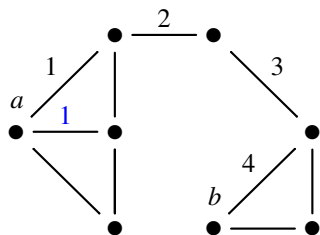
- er zijn meerdere paden tussen a en b

betweenness centraliteit



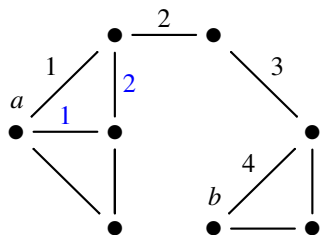
- er zijn meerdere paden tussen a en b
- $d(a, b) = 4$ is het kortste pad tussen a en b

betweenness centraliteit



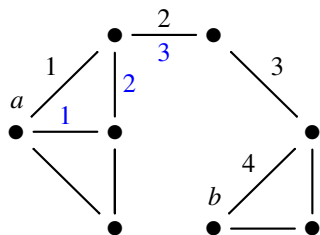
- er zijn meerdere paden tussen a en b
- $d(a, b) = 4$ is het kortste pad tussen a en b

betweenness centraliteit



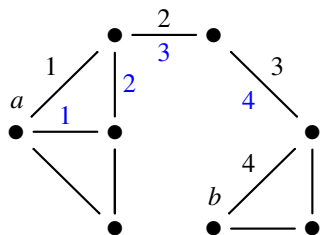
- er zijn meerdere paden tussen a en b
- $d(a, b) = 4$ is het kortste pad tussen a en b

betweenness centraliteit



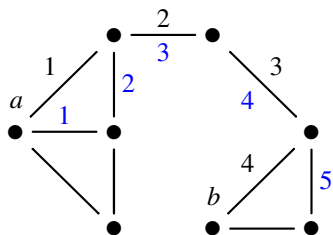
- er zijn meerdere paden tussen a en b
- $d(a, b) = 4$ is het kortste pad tussen a en b

betweenness centraliteit



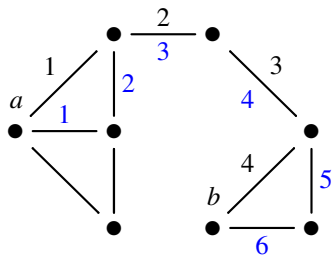
- er zijn meerdere paden tussen a en b
- $d(a, b) = 4$ is het kortste pad tussen a en b

betweenness centraliteit



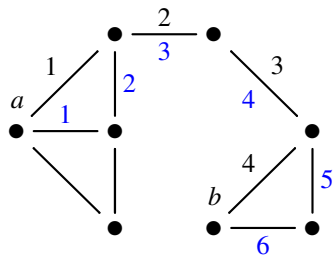
- er zijn meerdere paden tussen a en b
- $d(a, b) = 4$ is het kortste pad tussen a en b

betweenness centraliteit



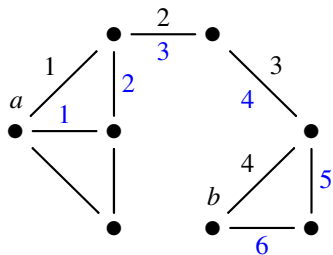
- er zijn meerdere paden tussen a en b
- $d(a, b) = 4$ is het kortste pad tussen a en b

betweenness centraliteit



- er zijn meerdere paden tussen a en b
 - $d(a, b) = 4$ is het kortste pad tussen a en b
-
- betweenness centraliteit is afhankelijk van de kortste paden;

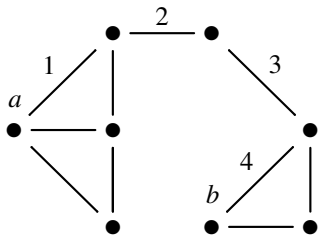
betweenness centraliteit



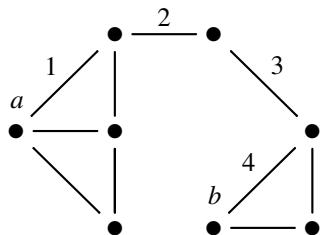
- er zijn meerdere paden tussen a en b
- $d(a, b) = 4$ is het kortste pad tussen a en b

- betweenness centraliteit is afhankelijk van de kortste paden;
- het geeft aan hoeveel *flow* er door de knoop kan

betweenness centraliteit

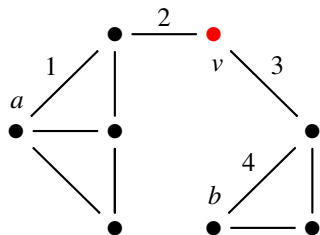


betweenness centraliteit



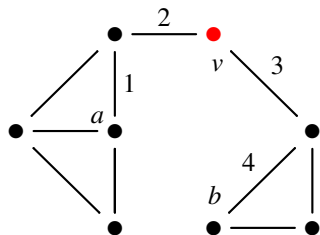
tel het aantal kortste paden
 $d(a, b)$ die door knoop v
gaan voor alle paren a en b ,
dit is $s(v)$

betweenness centraliteit



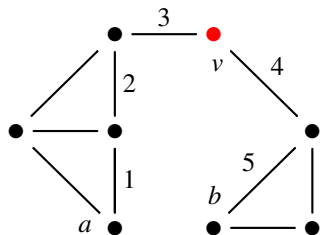
tel het aantal kortste paden
 $d(a, b)$ die door knoop v
gaan voor alle paren a en b ,
dit is $s(v)$

betweenness centraliteit



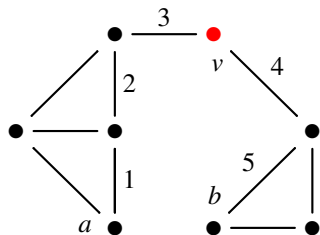
tel het aantal kortste paden $d(a, b)$ die door knoop v gaan voor alle paren a en b , dit is $s(v)$

betweenness centraliteit



tel het aantal kortste paden $d(a, b)$ die door knoop v gaan voor alle paren a en b , dit is $s(v)$

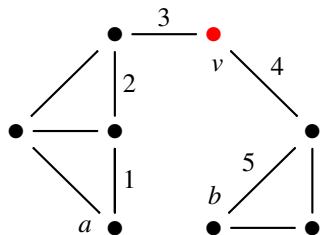
betweenness centraliteit



tel het aantal kortste paden $d(a, b)$ die door knoop v gaan voor alle paren a en b , dit is $s(v)$

- betweenness centraliteit van knoop v is $s(v)$ (soms ook genormeerd)

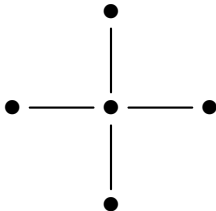
betweenness centraliteit



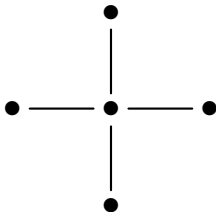
tel het aantal kortste paden $d(a, b)$ die door knoop v gaan voor alle paren a en b , dit is $s(v)$

- betweenness centraliteit van knoop v is $s(v)$ (soms ook genormeerd)
- de knoop met de hoogste waarde $s(v)$ heeft de hoogste *betweenness centraliteit*

betweenness centraliteit

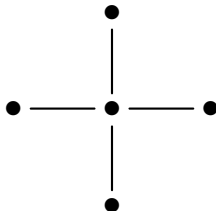


betweenness centraliteit



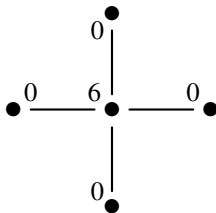
- (a) wat is de betweenness van de centrale knoop?

betweenness centraliteit



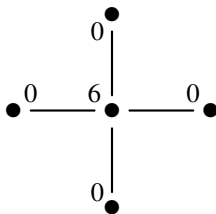
- (a) wat is de betweenness van de centrale knoop?
- (b) wat is de betweenness van de andere knopen?

betweenness centraliteit



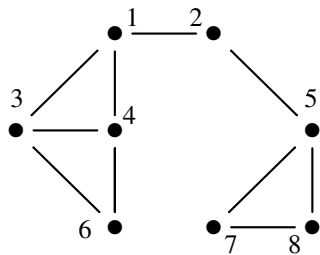
- (a) wat is de betweenness van de centrale knoop?
- (b) wat is de betweenness van de andere knopen?

betweenness centraliteit



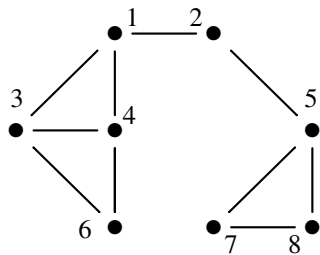
- (a) wat is de betweenness van de centrale knoop?
- (b) wat is de betweenness van de andere knopen?
 - o de centrale knoop in een ster heeft $s(v) = (n - 1)(n - 2)/2$

betweenness centraliteit

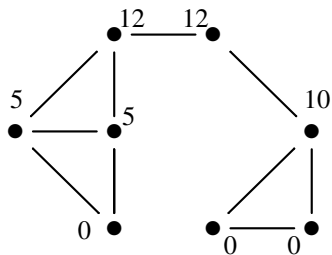


graaf G

betweenness centraliteit

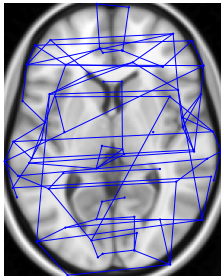


graaf G



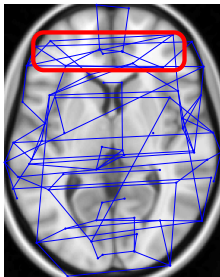
betweenness

het *flow* gebied



magging

het *flow* gebied

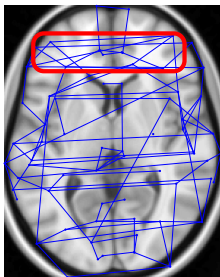


magging



- *superior frontal region* heeft de hoogste betweenness;

het *flow* gebied



magging

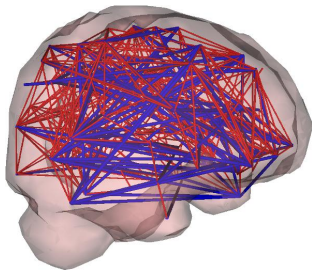


- *superior frontal region* heeft de hoogste betweenness;
- veel 'informatie' verkoopt via dit gebied

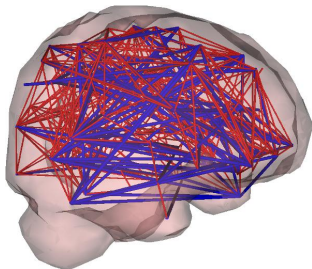
small-world of random



small-world of random

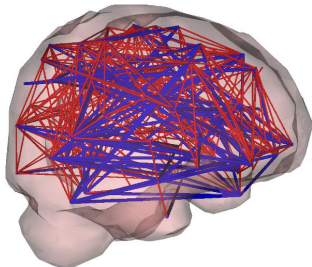


small-world of random



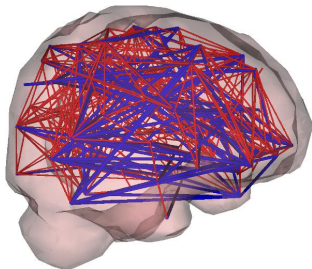
- *small-world*: ik ken mensen in mijn omgeving en Zijne Excellentie wordt verkouden van mij via (gemiddeld) 6 andere tussenpersonen.

small-world of random



- *small-world*: ik ken mensen in mijn omgeving en Zijne Excellentie wordt verkouden van mij via (gemiddeld) 6 andere tussenpersonen.
- zeer efficiënt netwerk.

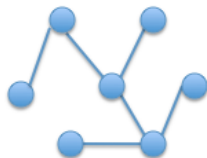
small-world of random



- *small-world*: ik ken mensen in mijn omgeving en Zijne Excellentie wordt verkouden van mij via (gemiddeld) 6 andere tussenpersonen.
- zeer efficiënt netwerk.
- het brein is een *small-world*.

small-world of random

small-world of random



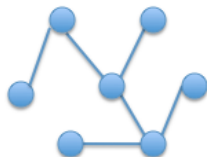
random network

- in een random netwerk zit geen structuur, willekeurige verbindingen.

small-world of random



small-world



random network

- in een random netwerk zit geen structuur, willekeurige verbindingen.
- een small-world heeft
 1. een hoge lokale verbondenheid (lokale clustering)
 2. een korte padlengte tussen alle knopen

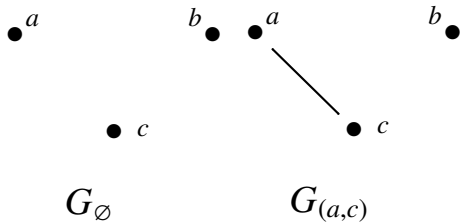
random netwerken met 3 knopen

random netwerken met 3 knopen



G_\emptyset

random netwerken met 3 knopen



random netwerken met 3 knopen

a



c



G_{\emptyset}

b



a

c

$G_{(a,c)}$

b



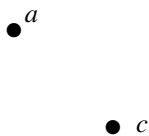
a

b

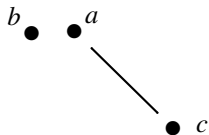
c

$G_{(a,b)}$

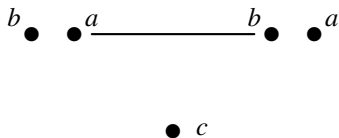
random netwerken met 3 knopen



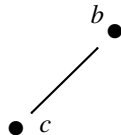
G_{\emptyset}



$G_{(a,c)}$



$G_{(a,b)}$



$G_{(b,c)}$

random netwerken met 3 knopen

a



b

c

G_{\emptyset}

b



a

c

$G_{(a,c)}$

b



a

b

c

$G_{(a,b)}$

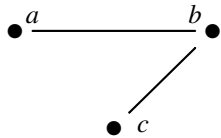
b



c

$G_{(b,c)}$

a

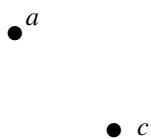


b

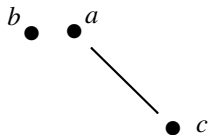
c

$G_{(a,b),(b,c)}$

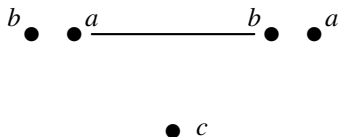
random netwerken met 3 knopen



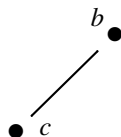
G_{\emptyset}



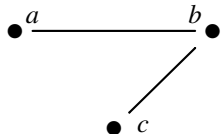
$G_{(a,c)}$



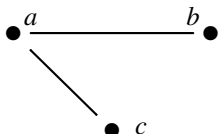
$G_{(a,b)}$



$G_{(b,c)}$



$G_{(a,b),(b,c)}$



$G_{(a,b),(a,c)}$

random netwerken met 3 knopen

a



b

c

G_{\emptyset}

b



a

c

$G_{(a,c)}$

b



a

b

a

c

$G_{(a,b)}$

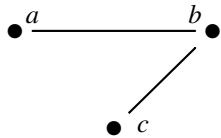
b



c

$G_{(b,c)}$

a

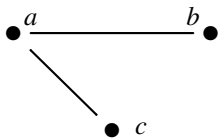


b

c

$G_{(a,b),(b,c)}$

a



b

c

$G_{(a,b),(a,c)}$

a

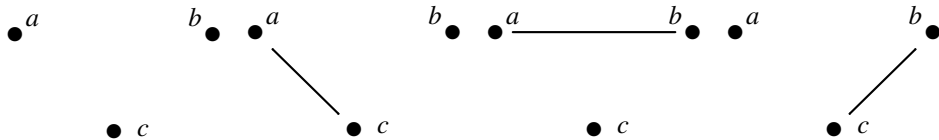


b

c

$G_{(a,c),(b,c)}$

random netwerken met 3 knopen

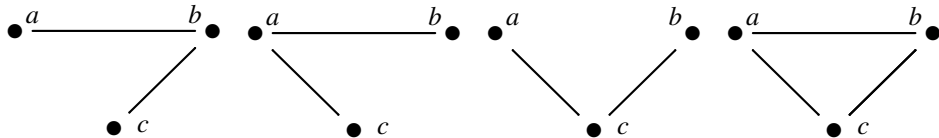


G_{\emptyset}

$G_{(a,c)}$

$G_{(a,b)}$

$G_{(b,c)}$



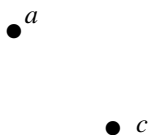
$G_{(a,b),(b,c)}$

$G_{(a,b),(a,c)}$

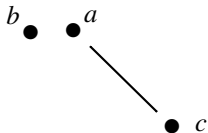
$G_{(a,c),(b,c)}$

$G_{(a,b),(a,c),(b,c)}$

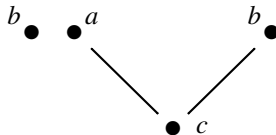
aantal verbindingen met n knopen



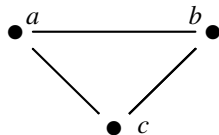
G_\emptyset



$G_{(a,c)}$

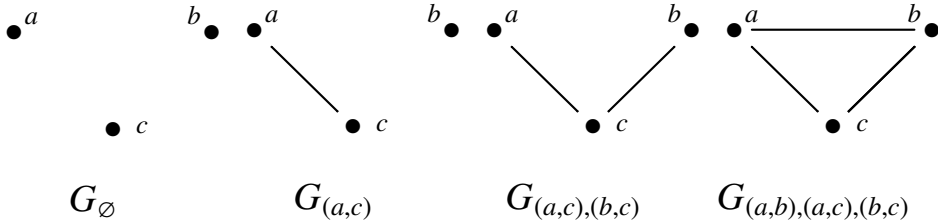


$G_{(a,c),(b,c)}$



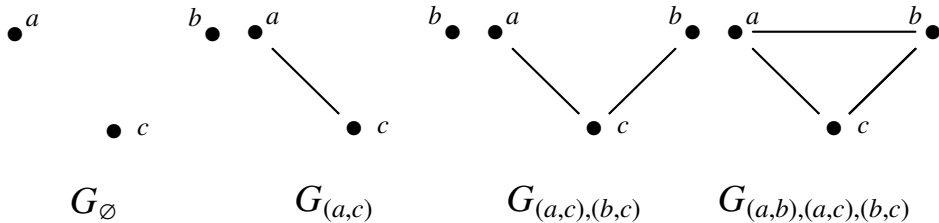
$G_{(a,b),(a,c),(b,c)}$

aantal verbindingen met n knopen



ongeordende verzameling van 2 knopen uit n

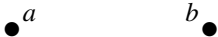
aantal verbindingen met n knopen



ongeordende verzameling van 2 knopen uit n

$$\binom{n}{2} = \frac{n(n-1)(n-2)\cdots 1}{(2 \cdot 1)(n-2)(n-3)\cdots 1} = \frac{n(n-1)}{2}$$

aantal netwerken met n knopen



G_{\emptyset}

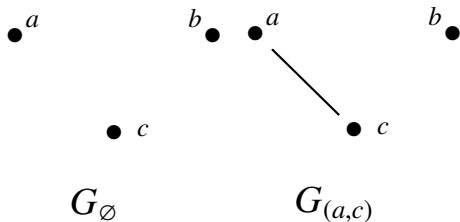
aantal netwerken met n knopen



G_{\emptyset}

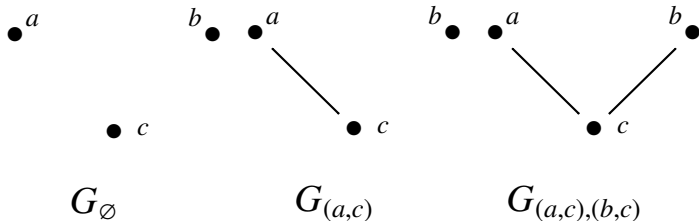
- 0 uit 3: $\binom{3}{0} = \frac{3 \cdot 2 \cdot 1}{0! (3 \cdot 2 \cdot 1)} = 1$

aantal netwerken met n knopen



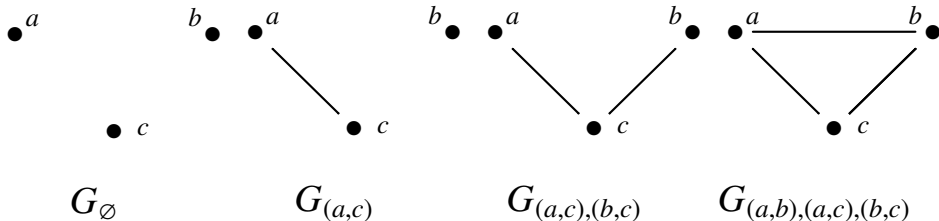
- 0 uit 3: $\binom{3}{0} = \frac{3 \cdot 2 \cdot 1}{0! (3 \cdot 2 \cdot 1)} = 1$
- 1 uit 3: $\binom{3}{1} = \frac{3 \cdot 2 \cdot 1}{1! (2 \cdot 1)} = 3$

aantal netwerken met n knopen



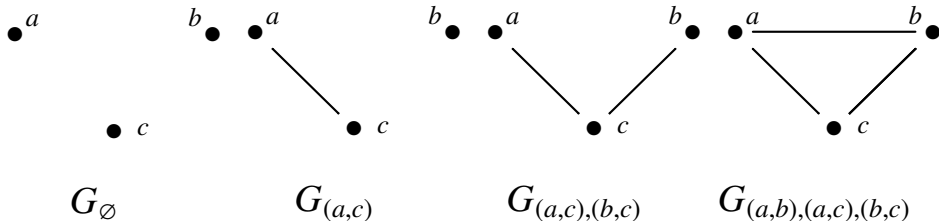
- 0 uit 3: $\binom{3}{0} = \frac{3 \cdot 2 \cdot 1}{0!(3 \cdot 2 \cdot 1)} = 1$
- 1 uit 3: $\binom{3}{1} = \frac{3 \cdot 2 \cdot 1}{1!(2 \cdot 1)} = 3$
- 2 uit 3: $\binom{3}{2} = \frac{3 \cdot 2 \cdot 1}{(2 \cdot 1) \cdot 1} = 3$

aantal netwerken met n knopen



- 0 uit 3: $\binom{3}{0} = \frac{3 \cdot 2 \cdot 1}{0!(3 \cdot 2 \cdot 1)} = 1$
- 1 uit 3: $\binom{3}{1} = \frac{3 \cdot 2 \cdot 1}{1!(2 \cdot 1)} = 3$
- 2 uit 3: $\binom{3}{2} = \frac{3 \cdot 2 \cdot 1}{(2 \cdot 1) \cdot 1} = 3$
- 3 uit 3: $\binom{3}{3} = \frac{3 \cdot 2 \cdot 1}{(3 \cdot 2 \cdot 1) \cdot 0!} = 1$

aantal netwerken met n knopen



- 0 uit 3: $\binom{3}{0} = \frac{3 \cdot 2 \cdot 1}{0!(3 \cdot 2 \cdot 1)} = 1$
- 1 uit 3: $\binom{3}{1} = \frac{3 \cdot 2 \cdot 1}{1!(2 \cdot 1)} = 3$
- 2 uit 3: $\binom{3}{2} = \frac{3 \cdot 2 \cdot 1}{(2 \cdot 1) \cdot 1} = 3$
- 3 uit 3: $\binom{3}{3} = \frac{3 \cdot 2 \cdot 1}{(3 \cdot 2 \cdot 1) \cdot 0!} = 1$

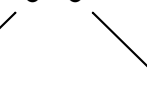
aantal netwerken met n knopen



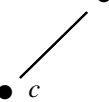
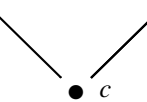
G_{\emptyset}



$G_{(a,c)}$



$G_{(a,c),(b,c)}$

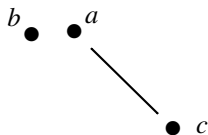


$G_{(a,b),(a,c),(b,c)}$

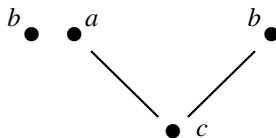
aantal netwerken met n knopen



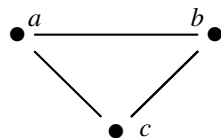
G_{\emptyset}



$G_{(a,c)}$



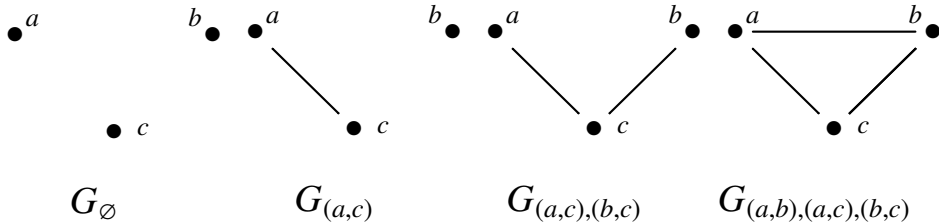
$G_{(a,c),(b,c)}$



$G_{(a,b),(a,c),(b,c)}$

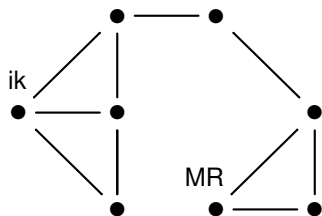
$$\sum_{x=0}^{n(n-1)/2} \binom{n(n-1)/2}{x}$$

aantal netwerken met n knopen



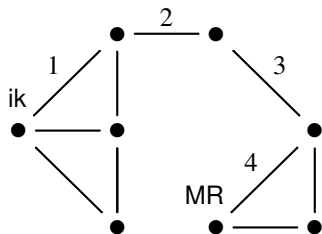
$$2^{n(n-1)/2} = \sum_{x=0}^{n(n-1)/2} \binom{n(n-1)/2}{x}$$

padlengte



idee: Hoeveel stappen in het sociale netwerk zijn er nodig mijn verkoudheid bij Zijne Excellentie Mark Rutte te krijgen?

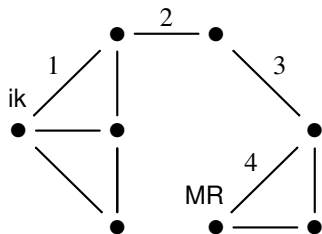
padlengte



idee: Hoeveel stappen in het sociale netwerk zijn er nodig mijn verkoudheid bij Zijne Excellentie Mark Rutte te krijgen?

- o het kortste pad tussen *ik* en *MR* is 4.

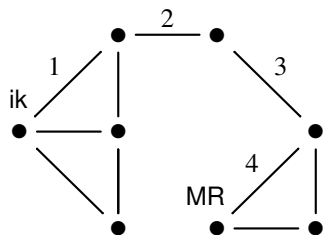
padlengte



idee: Hoeveel stappen in het sociale netwerk zijn er nodig mijn verkoudheid bij Zijne Excellentie Mark Rutte te krijgen?

- het kortste pad tussen *ik* en *MR* is 4.
- het gemiddelde van alle combinaties in het netwerk is de *gemiddelde padlengte*.

padlengte

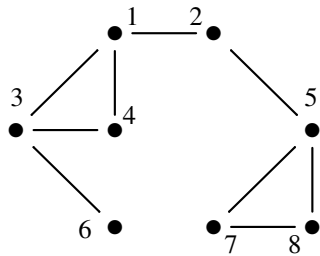


idee: Hoeveel stappen in het sociale netwerk zijn er nodig mijn verkoudheid bij Zijne Excellentie Mark Rutte te krijgen?

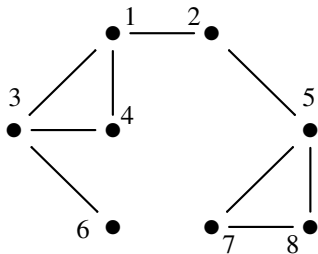
- o het kortste pad tussen *ik* en *MR* is 4.
- o het gemiddelde van alle combinaties in het netwerk is de *gemiddelde padlengte*.

$$\ell = \frac{1}{n(n-1)/2} \sum_{a \neq b \in V} d(a, b)$$

clustering

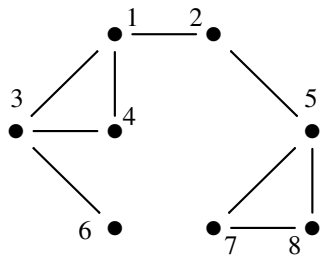


clustering



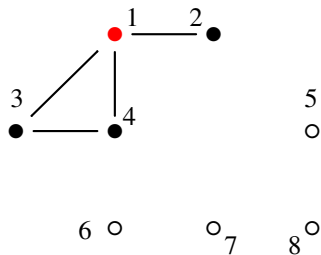
idee: Zijn twee vrienden van
jou onderling ook vrienden?

clustering



idee: Zijn twee vrienden van
jou onderling ook vrienden?
zoja, dan is er sprake van
lokale clustering.

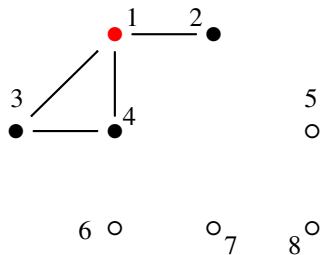
clustering



idee: Zijn twee vrienden van jou onderling ook vrienden? zoja, dan is er sprake van lokale clustering.

- o de vrienden 3 en 4 van 1 zijn ook vrienden.

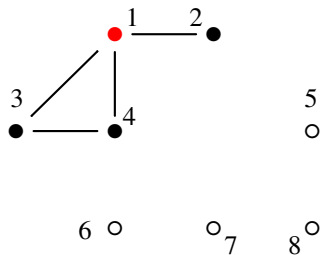
clustering



idee: Zijn twee vrienden van jou onderling ook vrienden? zoja, dan is er sprake van lokale clustering.

- de vrienden 3 en 4 van 1 zijn ook vrienden.
- de vrienden 2 en 4 van 1 zijn geen vrienden.

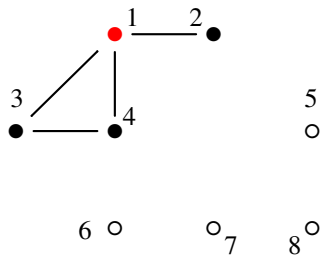
clustering



idee: Zijn twee vrienden van jou onderling ook vrienden? zoja, dan is er sprake van lokale clustering.

- de vrienden 3 en 4 van 1 zijn ook vrienden.
- de vrienden 2 en 4 van 1 zijn geen vrienden.
- de vrienden 2 en 3 van 1 zijn geen vrienden.

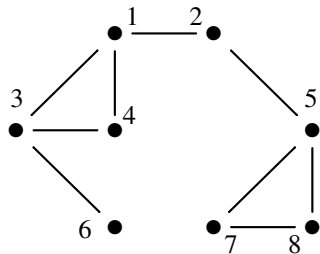
clustering



idee: Zijn twee vrienden van jou onderling ook vrienden? zo ja, dan is er sprake van lokale clustering.

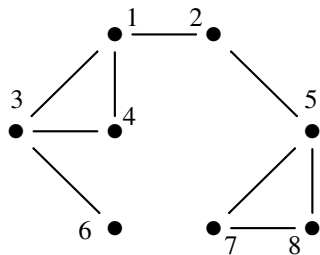
- de vrienden 3 en 4 van 1 zijn ook vrienden.
- de vrienden 2 en 4 van 1 zijn geen vrienden.
- de vrienden 2 en 3 van 1 zijn geen vrienden.
- dus: lokale clustering van 1 driehoek van de 3 mogelijke driehoeken (1/3).

clustering



idee: Zijn twee vrienden van
jou onderling ook vrienden?
zoja, dan is er sprake van
lokale clustering.

clustering

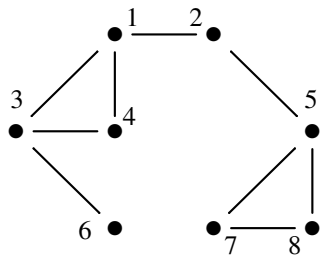


idee: Zijn twee vrienden van jou onderling ook vrienden? zoja, dan is er sprake van lokale clustering.

- o voor het hele netwerk kun je ook dit gebruiken

$$\tau = \frac{\#(\text{driehoeken})}{\#(\text{trio's met 2 verbindingen})}$$

clustering

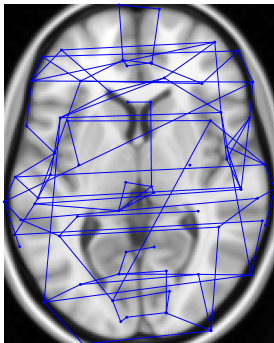


idee: Zijn twee vrienden van jou onderling ook vrienden? zoja, dan is er sprake van lokale clustering.

- o voor het hele netwerk kun je ook dit gebruiken

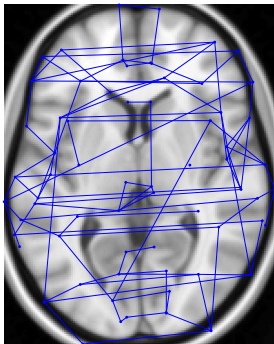
$$\tau = \frac{\#(\text{driehoeken})}{\#(\text{trio's met 2 verbindingen})}$$

clustering en random netwerk

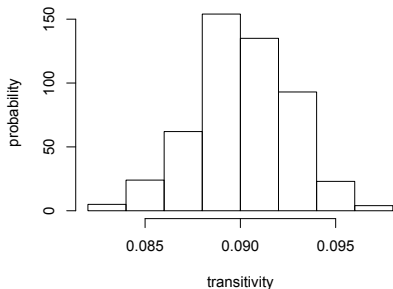


magging

clustering en random netwerk

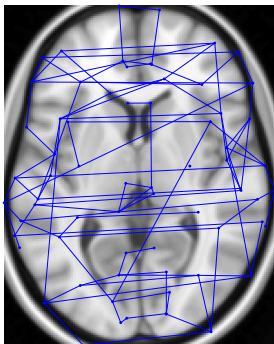


magging

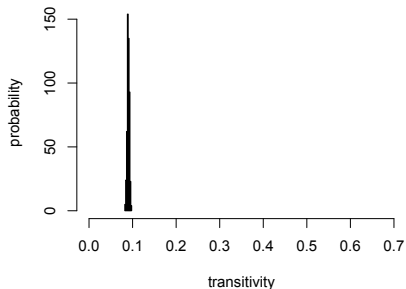


- maak 500 keer een random netwerk

clustering en random netwerk

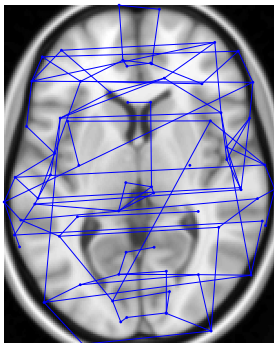


magging

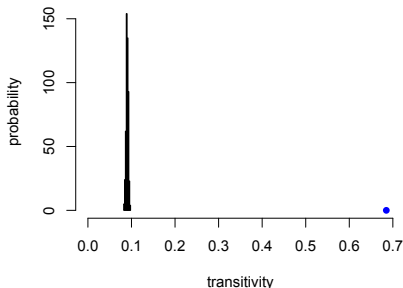


- maak 500 keer een random netwerk
- bereken de cluster coëfficiënt

clustering en random netwerk

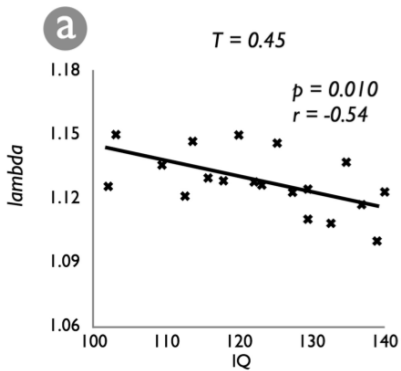


magging



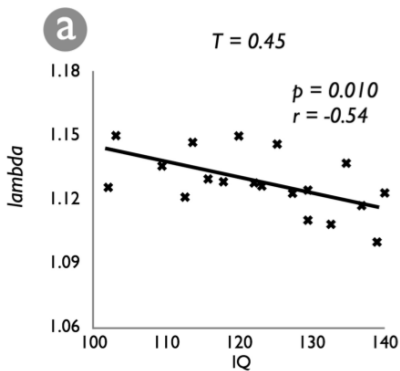
- maak 500 keer een random netwerk
- bereken de cluster coëfficiënt
- vergelijk de verdeling met de empirie

padlengte en IQ



van den Heuvel et al. *J. of Neuroscience* (2009)

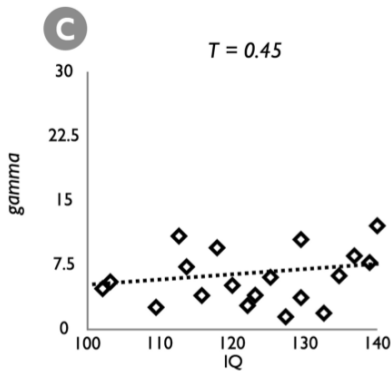
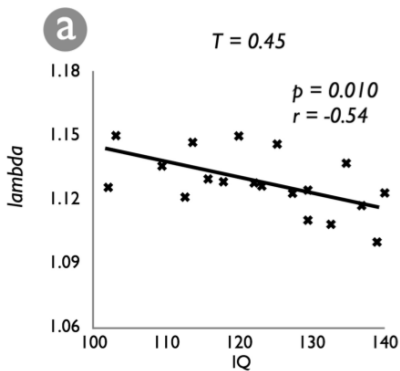
padlengte en IQ



- efficiënte informatie verspreiding (padlengte λ) en IQ

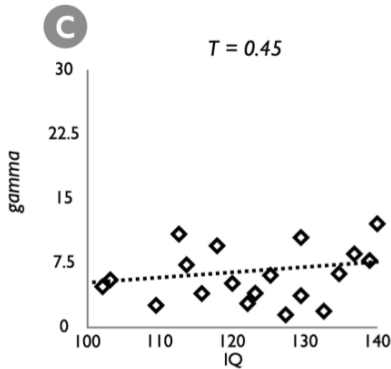
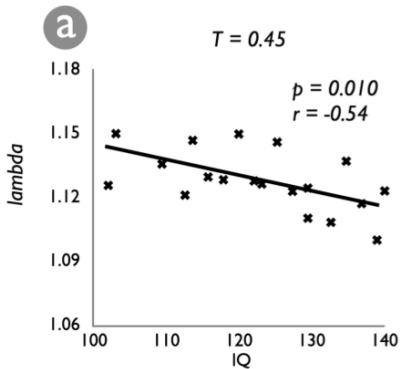
van den Heuvel et al. *J. of Neuroscience* (2009)

padlengte en IQ



- efficiënte informatie verspreiding (padlengte λ) en IQ

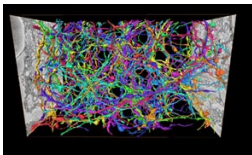
padlengte en IQ



- efficiënte informatie verspreiding (padlengte λ) en IQ
- geen hoge clustering (γ) en IQ

van den Heuvel et al. *J. of Neuroscience* (2009)

toekomstvisies



toekomstvisies



Sebastian Seung

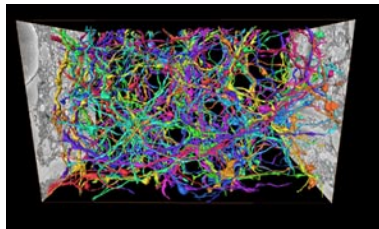
Alle verbindingen van
alle neuronen
vaststellen ($\pm 10^{18}$)

toekomstvisies



Sebastian Seung

Alle verbindingen van
alle neuronen
vaststellen ($\pm 10^{18}$)

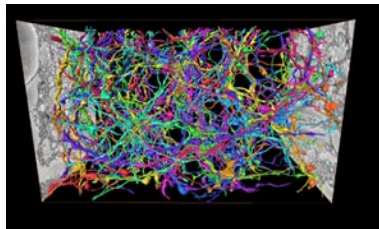


toekomstvisies



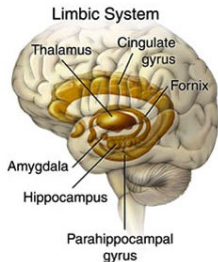
Sebastian Seung

Alle verbindingen van
alle neuronen
vaststellen ($\pm 10^{18}$)



'I am my connectome'

toekomstvisies



Limbisch systeem



rat

Stukje hippocampus (voor geheugen) vervangen doet wonderen! (bij ratten)

Berger, 2013

Literatuur

author(s)	year	journal/book	pages
Kosslyn & Anderson	1992	<i>Frontiers in cog. neuroscience</i>	
Van Essen et al.	2001	<i>Vision Research</i> 41	1359 – 1378
Van den Heuvel	2009	<i>J. of Neuroscience</i> 29	7619 – 7624
Gazzaniga et al.	2002	<i>Cognitive Neuroscience</i>	
Strogatz	2003	<i>Sync</i>	
Bechtel	2008	<i>Mental mechanisms</i>	
Sporns	2011	<i>An. of the NY Ac. of Sciences</i>	1 – 17
Kolaczyk	2009	Statistical analysis of network data	
Huettel et al.	2010	<i>fMRI</i>	
Newman	2010	<i>Networks</i>	
Passingham et al.	2002	<i>Nature Rev. Neuroscience</i> 3	606 – 616