

DWI, DTI MRT kuvamise alused

Sven Telliskivi

3.11.11

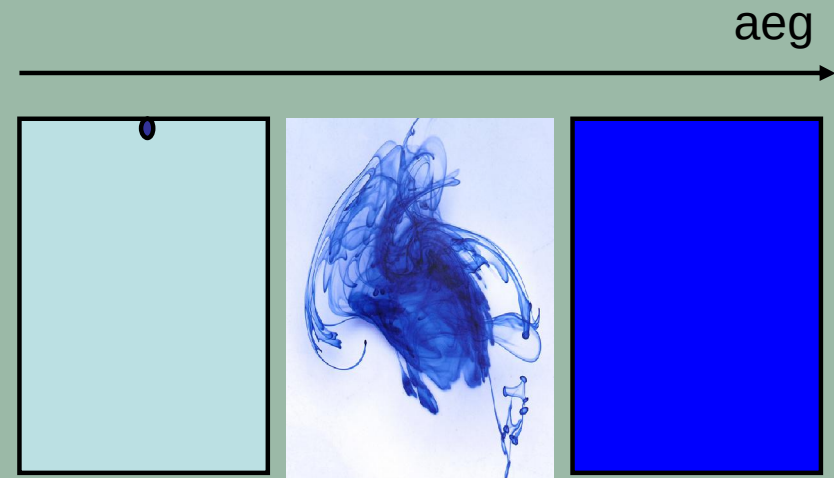
Difusiooni mõiste

- Difusioon on osakeste, molekulide loomulik segunemine keskkonnas
- Osakeste, molekulide transport protsess
- Tinditilk vees
 - Algselt on tinditilk koondunud ühte punkti
 - Aja möödudes tint levib vees
 - Segunemisprotsess toimub ilma lahuse segamiseta
- Füüsikaline seadus mis kirjeldab sellist protsessi: Fick'i seadus
 - Difundeeruvate osakeste voog on võrdeline kontsentratsioonigradiendiga
 - Võrdetegur D on difusioonkoefitsient (cm^2/s)

J – difundeeruvate osakeste voog läbi kujuteldava pinna.

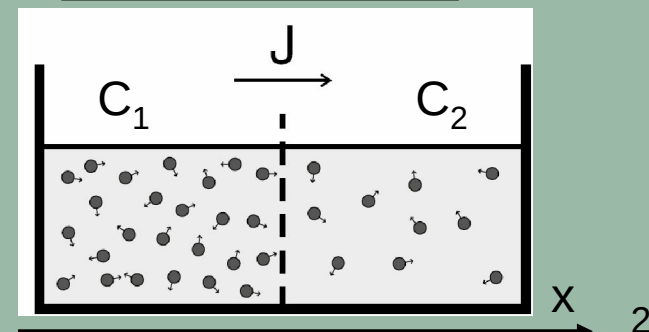
D – difusioonkoefitsient, keskkonnast sõltuv parameeter (cm^2/s)

$\partial C/\partial x$ – kontsentratsioonigradient



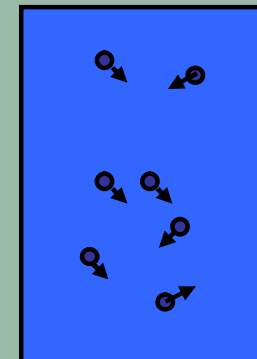
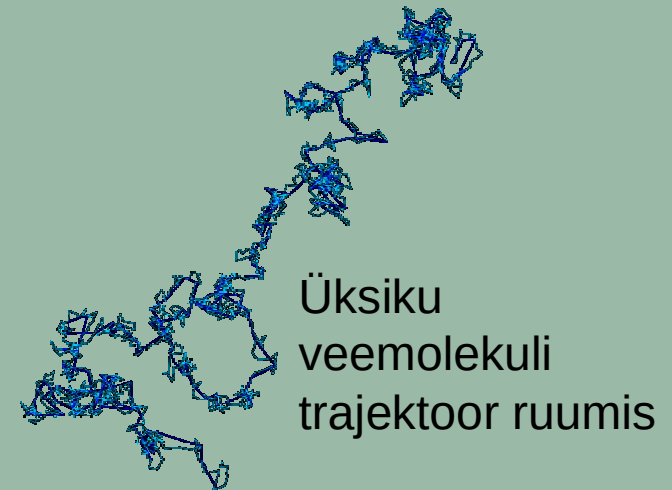
<http://www.flickr.com/photos/80641721@N00/147461294/in/photos+stream/>

$$J = -D \frac{\partial C}{\partial x}$$



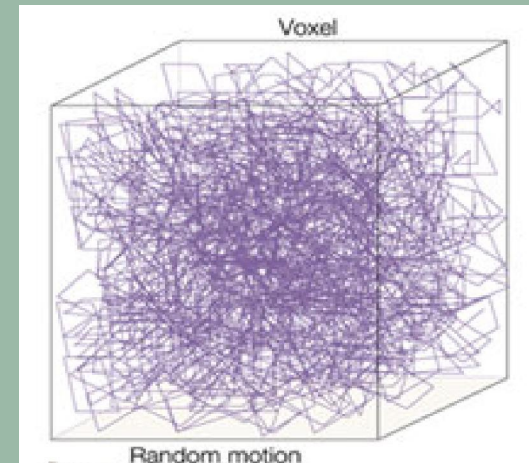
Difusioon molekulaarsel tasandil

- Difusiivne segunemine toimub tänu molekulide/osakeste omavahelisele põrkumisele keskkonnas (Browni liikumine)
- Osakeste liikumine jätkub ka siis, kui kontsentratsioonid on ühtinud (osakesed on soojuslikus keskkonnas)!
- Keskmiselt on summaarne osakeste voog 0, kuid molekulaarsed liikumised säilivad



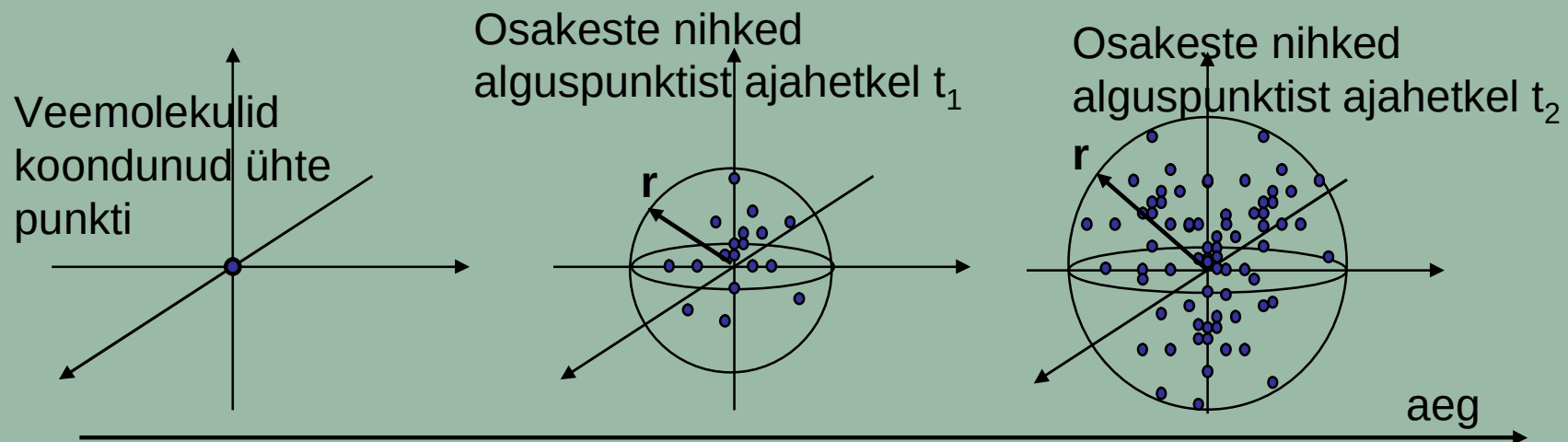
Difusiooni protsessi mudel

- Aluseks Browni mudel
 - Iga veemolekuli trajektoor ruumis on täiesti juhusliku iseloomuga
 - DWI kujutise vokslite mõõtmed ca $2.5 \times 2.5 \times 2.5 \text{ mm}^3$
 - ca 10^{20} veemolekuli vokslis
 - Võimalik uurida veemolekulide keskmistatud difusiivseid omadusi keskkonnas



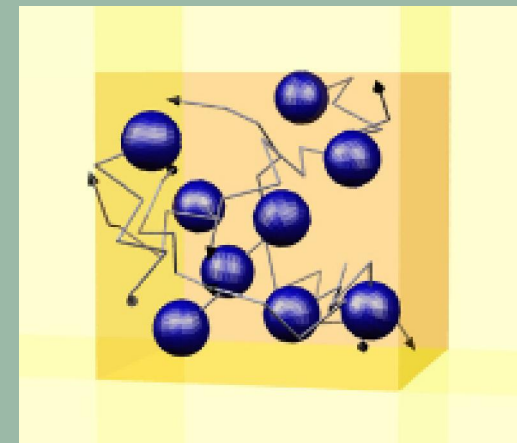
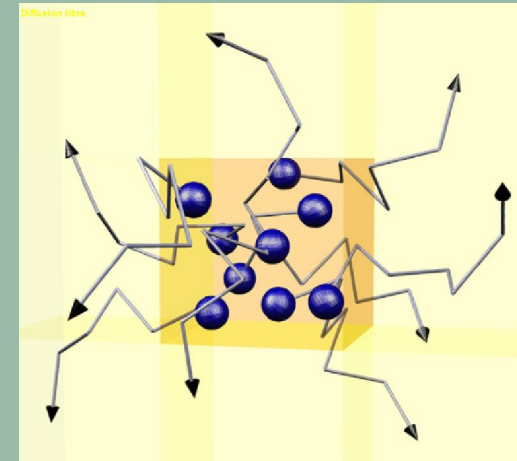
Difusiooni mudel

- Difusiooni uurimisel saab hinnata osakeste liikumise ruutkeskmist nihet
- $\langle r^2 \rangle = 6Dt$ (Einsteini valem)
- Vesi
 - $D = 3 \cdot 10^{-3} \text{ mm}^2\text{s}^{-1}$, 37°C
 - Seega, kui näiteks difusioonimõõtmis aeg $t = 30\text{ms}$, siis keskmiselt on veemolekulid selle aja jooksul liikunud $25\mu\text{m}$ igas suunas



Difusioon MRT

- Oluline järeldus Einsteini valemist
 - Veemolekulide ruutkeskmise nihe on otseselt võrdeline difusiooni vaatlusajaga t
 - Difusioon MRT'ga me ei mõõda difusioonkoefitsienti D otseselt
 - Vaadeldakse veemolekulide nihkeid teatud aja jooksul
 - **Kui difundeeruvate veemolekulide liikumine on takistatud (rakumembraanid, makromolekulid nt.) siis nende ruutkeskmise nihe ajaühikus on väiksem võrreldes veemolekulidega mis saavad ruumis vabalt difundeeruda**
 - Seega mõjutab bioloogilise keskkonna mikrostruktuur otseselt veemolekulide difusiooni ruumis

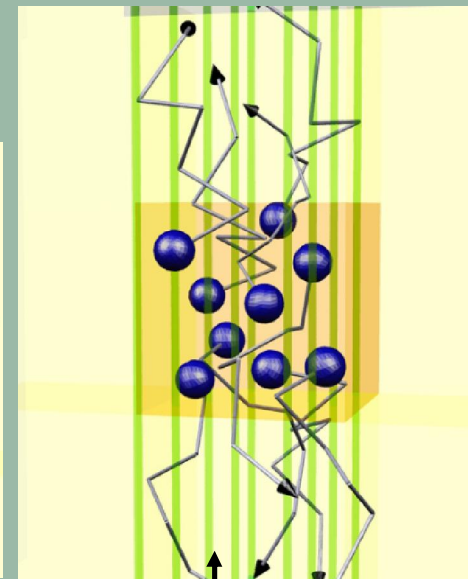
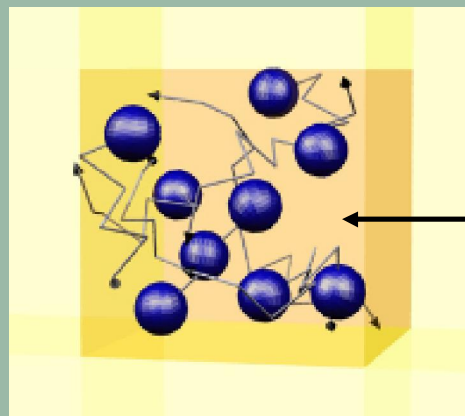
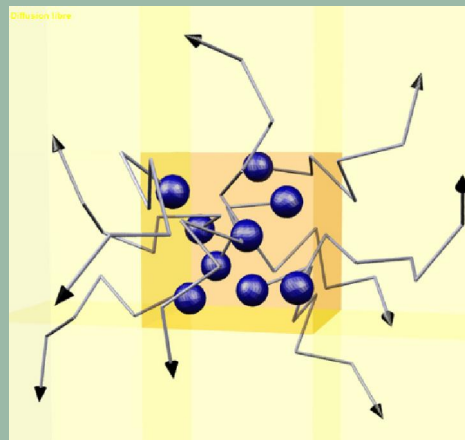


<http://www.e-mri.org/diffusion-tensor-imaging/diffusion-principles.html>

Difusioon MRT - veemolekulide mikroskoopilise liikumise kuvamine

- Isotroopne difusioon
 - Difusioon on ühesugune igas ruumisuunas (GM, CSF)
- Anisotroopne difusioon
 - Difusioon on mingis ruumisuunas tõkestatud
 - Lihas
 - Valgeaine trakt

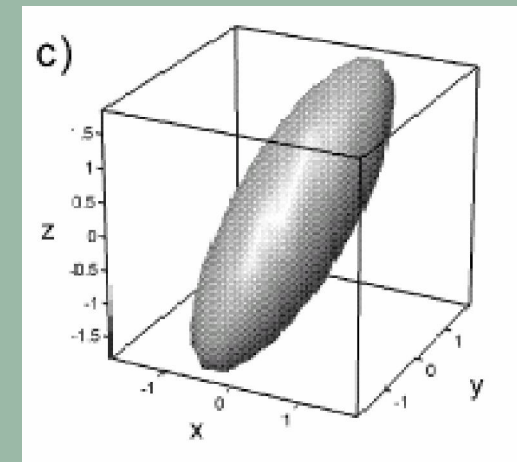
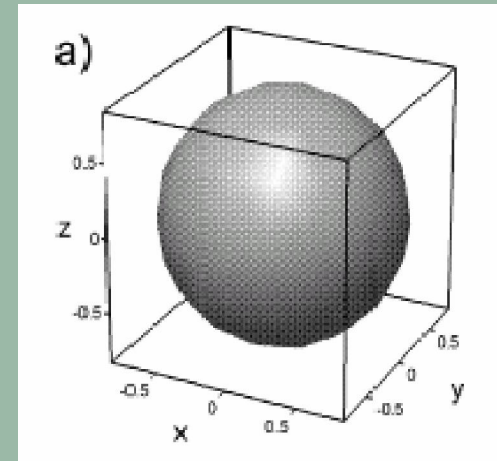
Isotroopne difusioon



Anisotroopne difusioon

Difusioonellipsoid

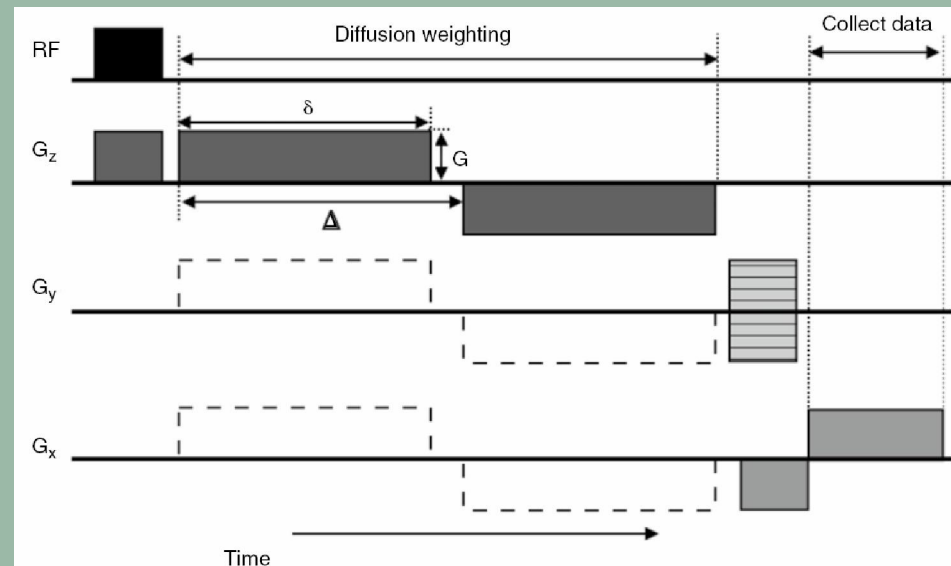
- Difusioon on 3D protsess
- Difusiooni saab geomeetriliselt modelleerida ellipsoidiga
- Isotroopne difusioon
 - Ellipsoid = Sfäär
 - Sfääri suurus iseloomustab difusiooni suurust
- Anisotroopne difusioon
 - Difusioonellipsoid
 - Ruumiline orientatsioon ja suurus



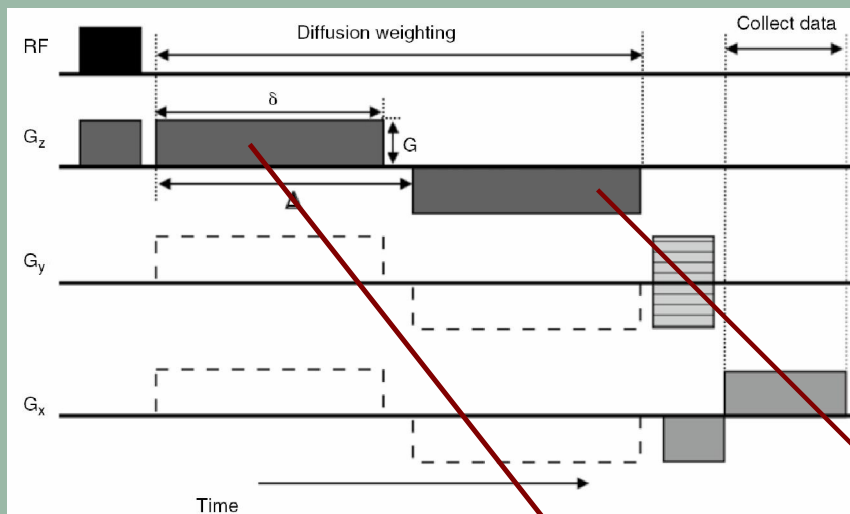
Le Bihan D Nat Rev Neurosci. 2003

Difusiooni mõõtmine MRT abil

- MRT pulssprogramm on tehtud “tundlikuks” difusiooni suhtes
- Pulssprogrammi on lisatud üks paar “difusioon-tundlikke” gradiente
- Difusioon-tundlikke gradiente iseloomustavad parameetrid
 - δ , ühe gradientvälja kestus
 - G , gradientvälja amplituud
 - Δ , kahe gradientvälja vaheline ajavahe

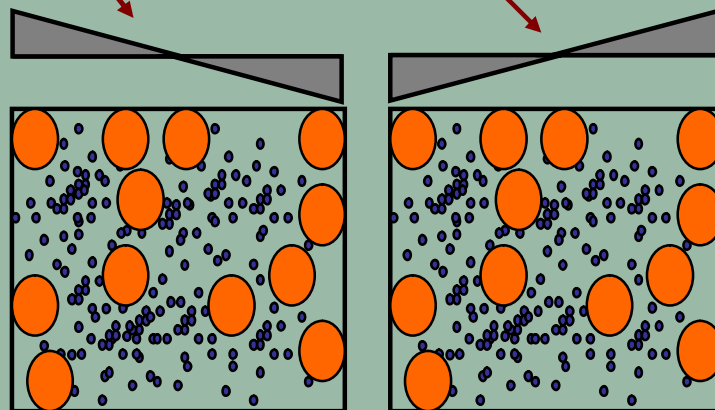


Johansen-Berg, Behrens “Diffusion MRI”, p18

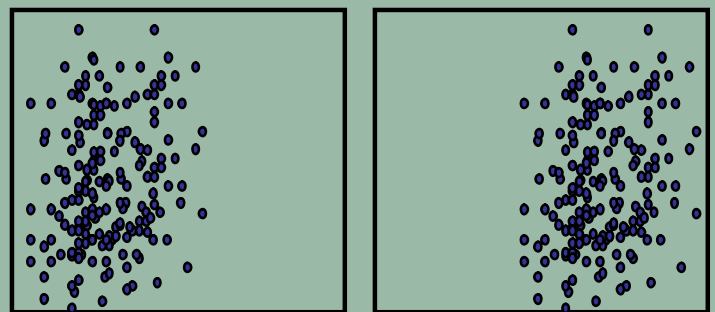


Johansen-Berg, Behrens "Diffusion MRI", p18

Voksel
(molekulide
liikumine
takistatud)



Voksel
(suhteliselt vaba
molekulide
difusioon)



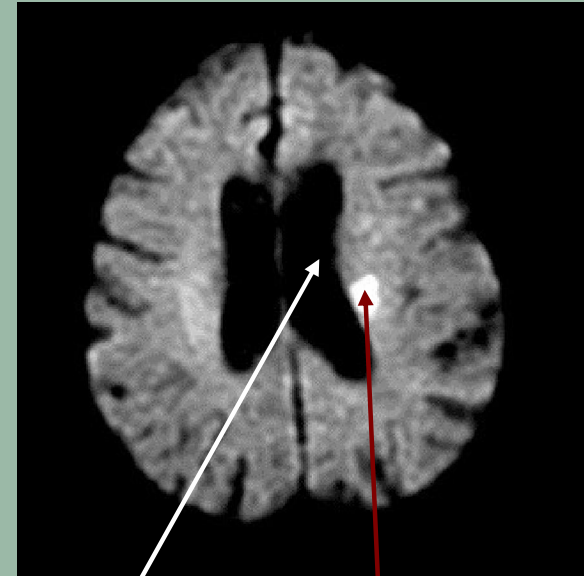
Mõõdetud MRT signaal
(voksli intensiivsus)



aeg

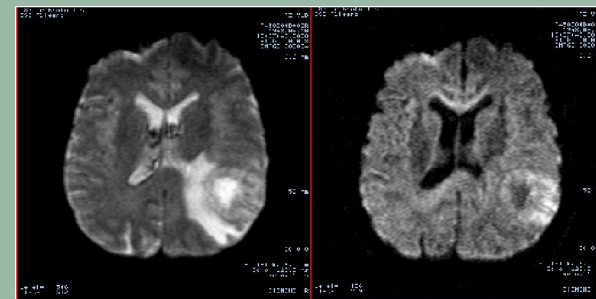
Difusioon MRT

- Difusiooni mõõtmise põhineb “signaali kao” mõõtmisel
- DW kujutisel
 - Kiire difusioon à hüposignaali
 - Aeglane difusioon à hüpersignaali
- T_2 läbikuma efekt



http://ej.rsna.org/ej3/0095-98.fin/page5/rsna98_5.htm

Kiire difusioon Aeglane difusioon



b=300

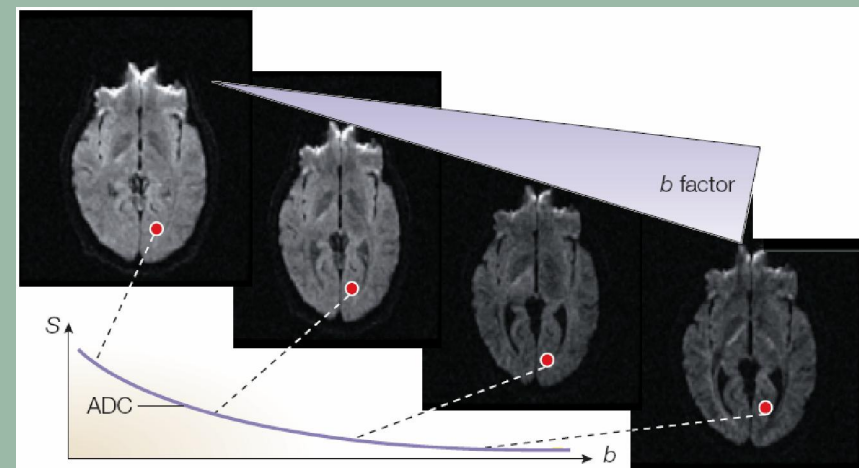
b=1200

Difusioon MRT

- Signaali tugevus difusioonkaalutud kuvamisel on määratud võrrandiga
- D nimetatakse ADC'ks (*apparent diffusion coefficient*)
- b ehk *b-value* iseloomustab difusioongradientide tugevust ja seda kui tugeva difusioonkaaluga kujutisi soovitakse
- S_0 on signaal ilma DW gradientideta

$$S = S_0(P_D, T1, T2)e^{-bD}$$

$$b = \gamma^2 G^2 \delta^2 \left(\Delta - \frac{\delta}{3} \right)$$

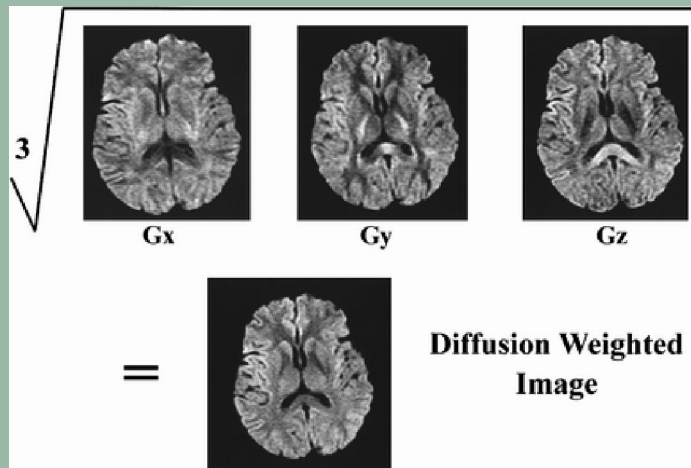
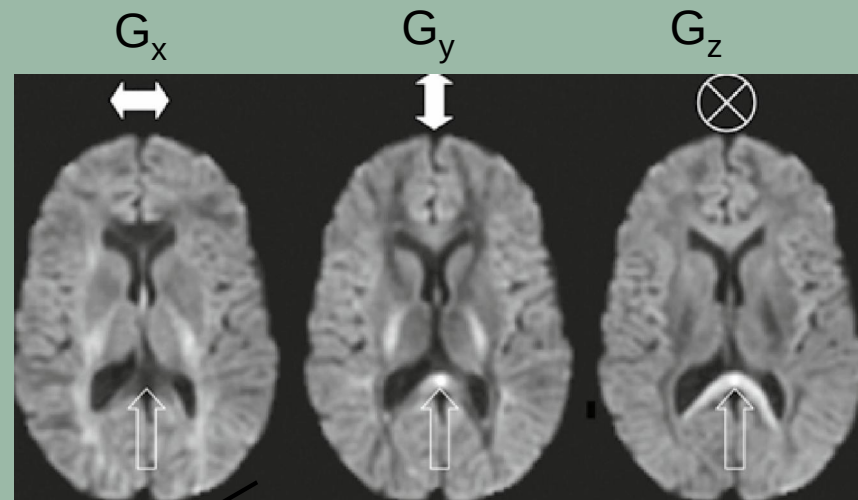


Bihan D. Looking into the functional architecture of the brain with diffusion MRI. *Nature*, 4; (2003).

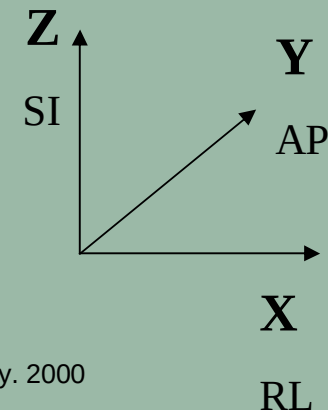
DWI tehnika

- Kokku 4 andmehõivet
 - $b = 0$ andmehõive S_0 ehk T_2 kujutis
 - $b > 0$ andmehõived x, y ja z suundades
 - Isotroopne DWI kujutis

$$S = S_0(P_D, T1, T2)e^{-bD}$$



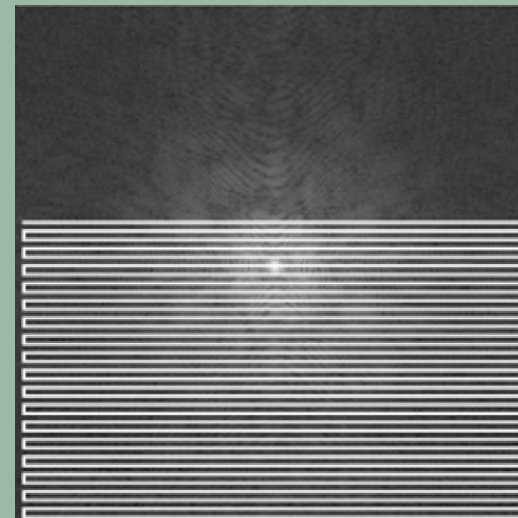
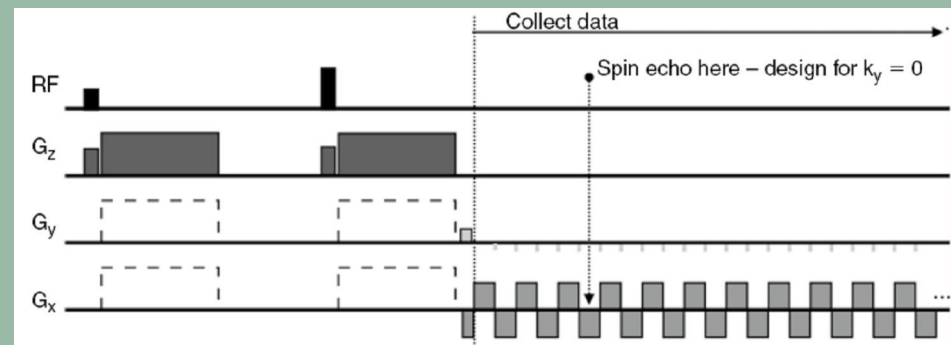
Johansen-Berg, Behrens "Diffusion MRI", p41



Schaefer PW Radiology. 2000

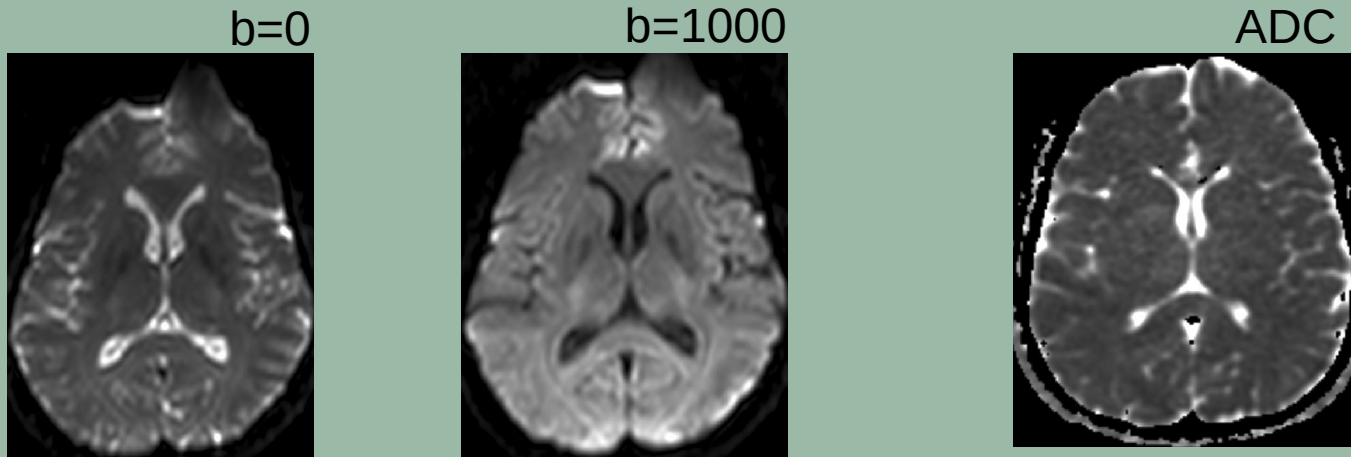
DWI pulssprogramm

- EPI ehk Echo Planar Imaging (Mansfield, Ordidge)
- Ülikiire pulssprogramm
- Kujutise andmehõive aeg ~ 20 – 100ms
- Rakendused
 - DWI ja DTI
 - Perfusioon MRT
 - Funktsionaalne MRT



ADC kaart

- *Apparent Diffusion Coefficient* ehk ADC
- ADC kaart on kujutis, kus iga pikseli väärtus on arvutatud vähemalt kahest erinevast *b-value* ($b=0$, $b>0$) kujutisest



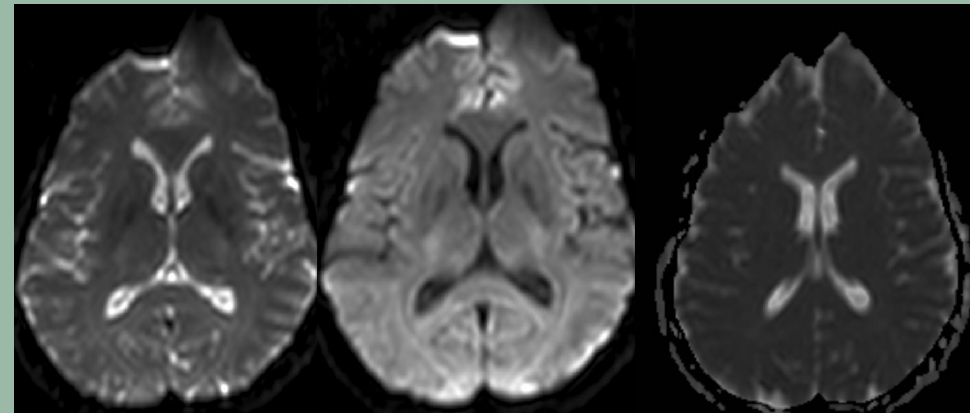
$$S = S_0 e^{-bD}$$



$$ADC = D = \frac{1}{b} \ln \frac{S_0}{S}$$

ADC kaart

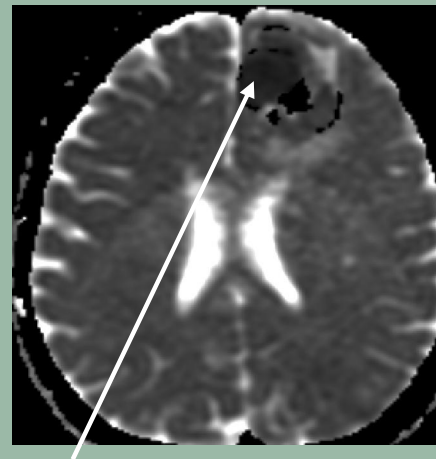
- ADC kaardil puudub T2 mõju (T2 läbikuma) ja sisaldub ainult info difusiooni kohta
- ADC kaardil on kujutatud:
 - tõkestatud difusioon tumedana
 - vaba difusioon heledana
- ADC
 - Väljendatakse mm^2/s või cm^2/s
 - Normaaletes ajus $\text{ADC} = 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$
 - Difusioonidistants on 5-15 $\mu\text{m}/40 \text{ ms}$ jooksul



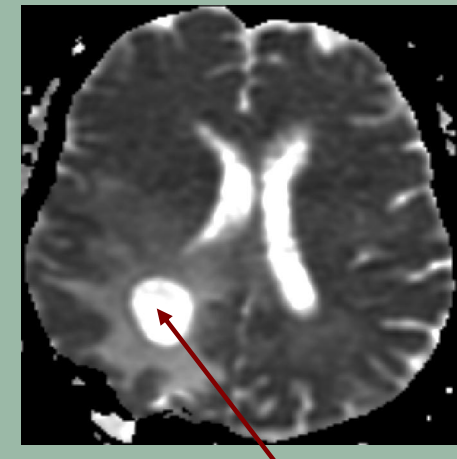
b=0

b=1000

ADC



Aeglane
difusioon



Kiire difusioon

eADC kaart

- Eksponentsiaalne ADC ehk eADC kaart, on defineeritud :

$$eADC = e^{-ADC \cdot b}$$

- Kahest DWI kujutisest (nt. $b=0$ ja $b>0$), koosneva uuringu korral on eADC pikselite intensiivsuste omavaheline suhe

$$eADC = \frac{S}{S_0}$$

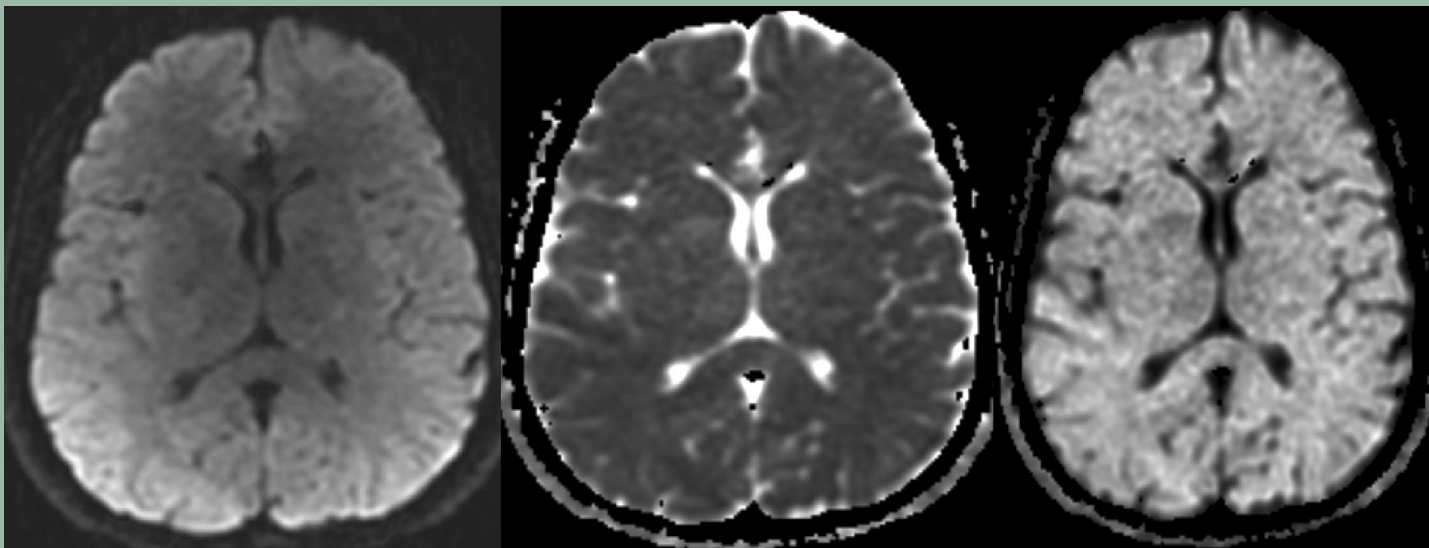
eADC kaart

- Eksponentsiaalne ADC ehk *enhanced*ADC on ADC suhteline pöördväärtus
- eADC kaardil on aeglane difusioon heledana, kiire difusioon tumedana

DWI kujutis

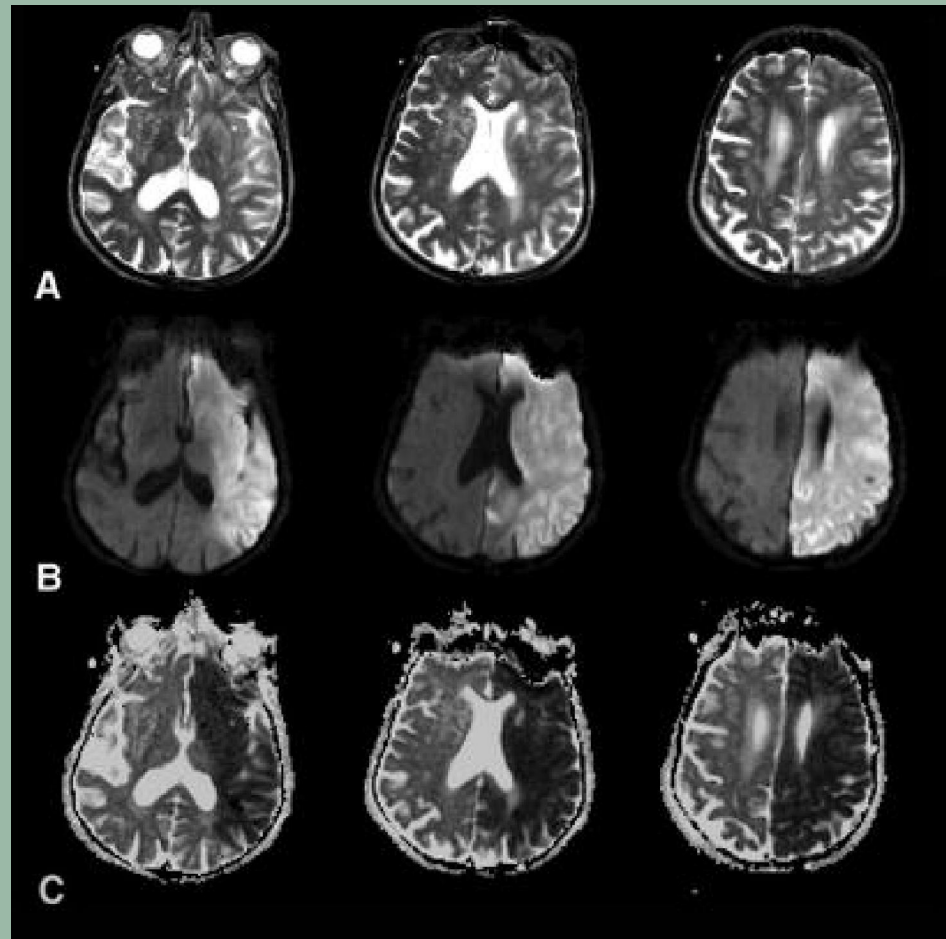
ADC kaart

eADC kaart



DWI rakendused

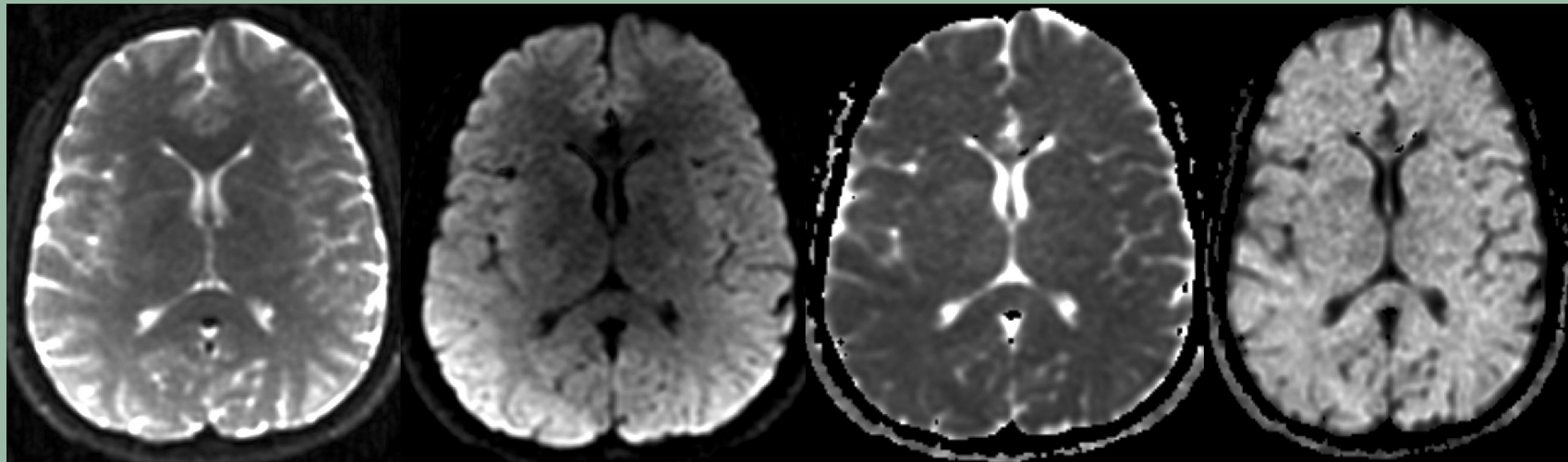
- Infarkt
 - Turse
 - Vähenenud difusioon
 - Normaalsest väiksem ADC
- **A** T2 FSE
- **B** DWI
- **C** ADC kaart



Huisman TA Eur Radiol. 2003

Kokkuvõte DWI

- Difusiooni mõõtmise põhineb signaali kao mõõtmisel
- Veemolekulide difusiivne liikumine avaldab mõju salvestatavale MRT signaalile
- Signaali kadu on seotud difusiooni ulatusega
- DWI tehnika puhul saadavad ADC kaardid iseloomustavad isotroopset difusiooni



DWI $b=0$

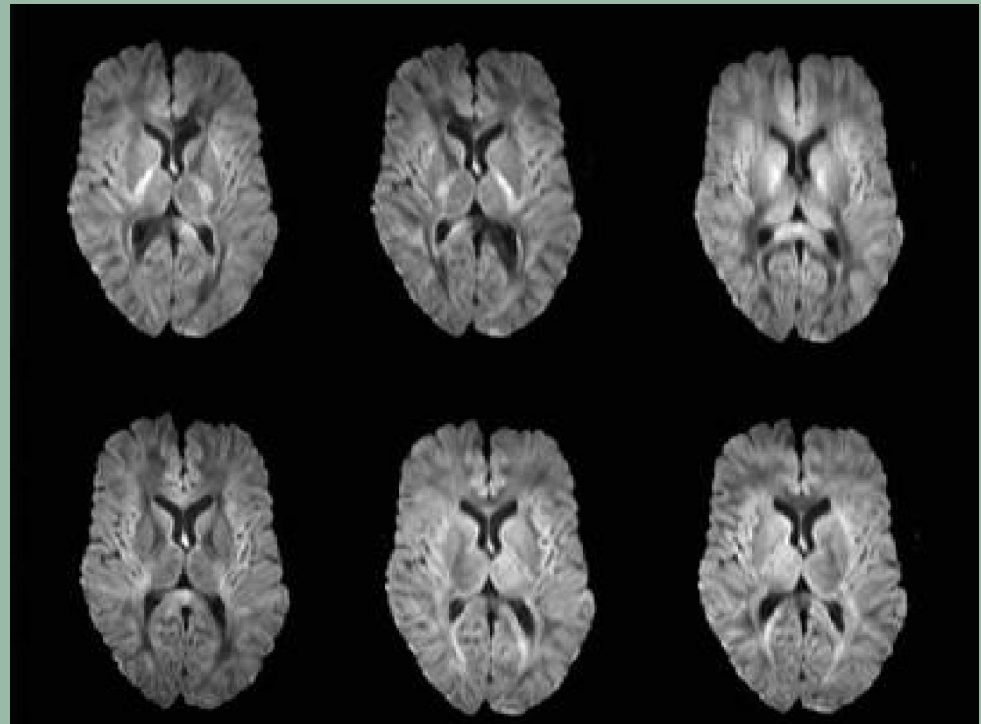
DWI $b=1000$

ADC

eADC²⁰

DWI vs DTI

- DWI puhul 3 suunas DW mõõtmised
 - Isotroopne DWI ja ADC
- DTI puhul vähemalt 6 suunas DW mõõtmised
 - Võimalik hinnata difusiooni ruumilist orientatsiooni
 - Difusioonellipsoid



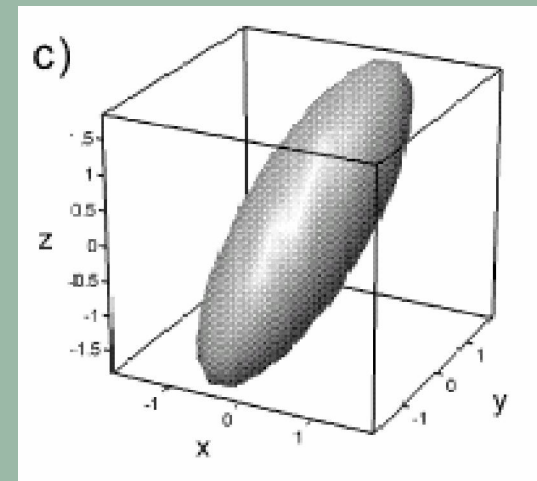
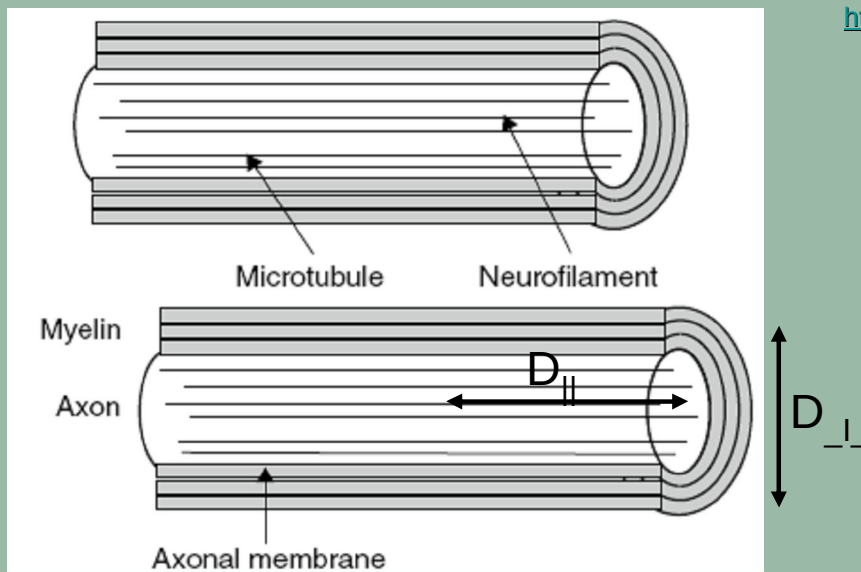
Huisman TA Eur Radiol. 2003

DTI ja valgeaine

- Valgeaine struktuur anisotroopne
- Pikisuunaliselt orienteeritud traktid



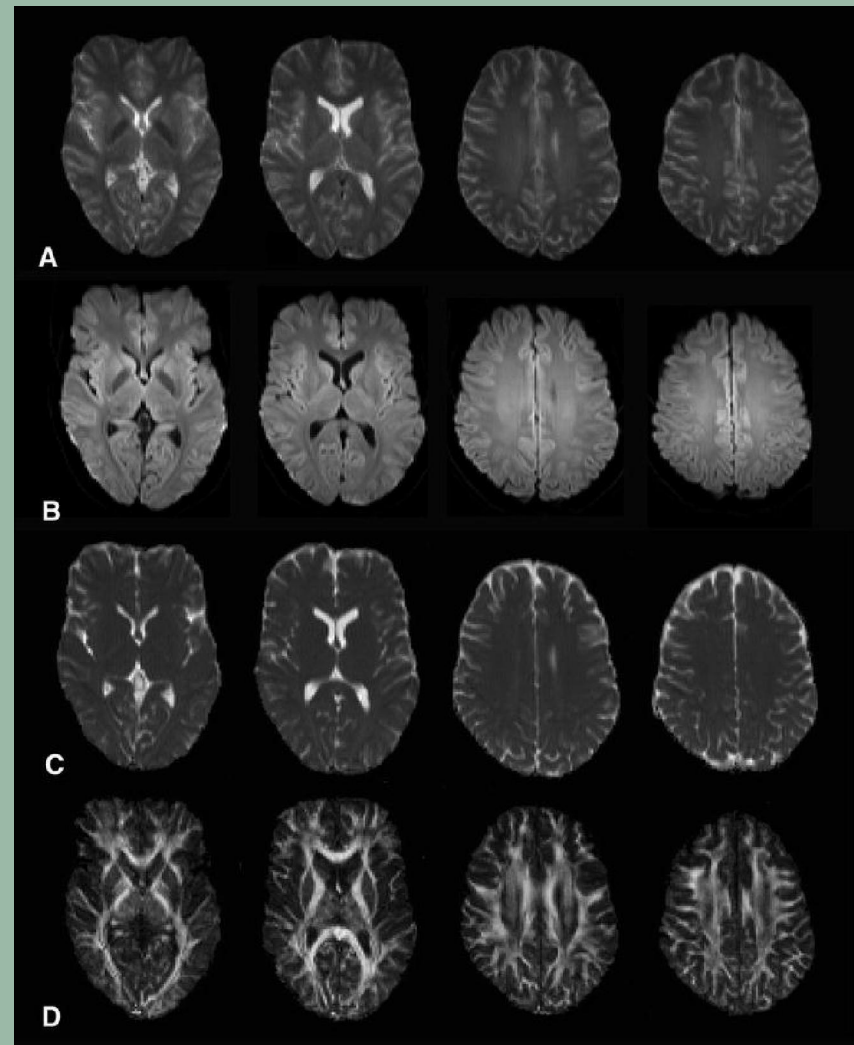
<http://www.vh.org/Providers/Textbooks/BrainAnatomy/TOC.html>



Le Bihan D Nat Rev Neurosci. 2003

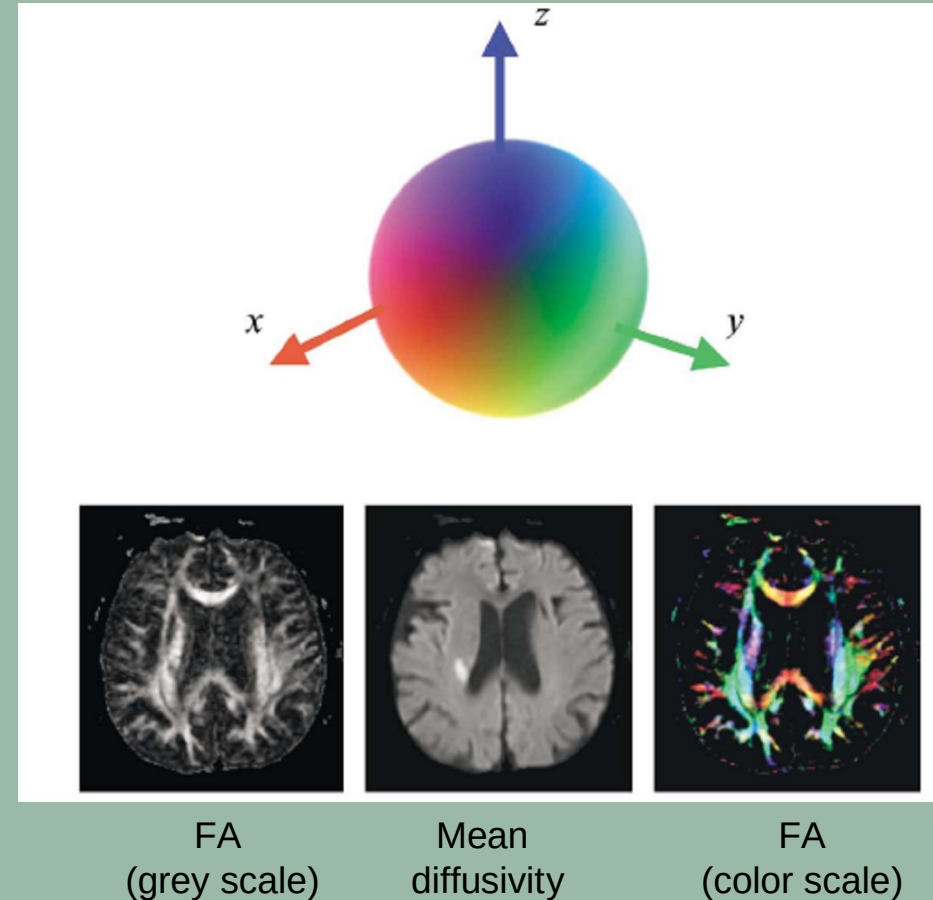
DTI

- Vähemalt 6 DW mõõtmist erinevates ruumisuundades, lisaks $b=0$ referentsmõõtmine
- **A** $b=0$ T2
- **B** isotroopne DWI
- **C** ADC kaart
- **D** FA kaart, difusiooni anisotroopsus



Difusioon-tensor andmete kuvamine: värvkodeerimine

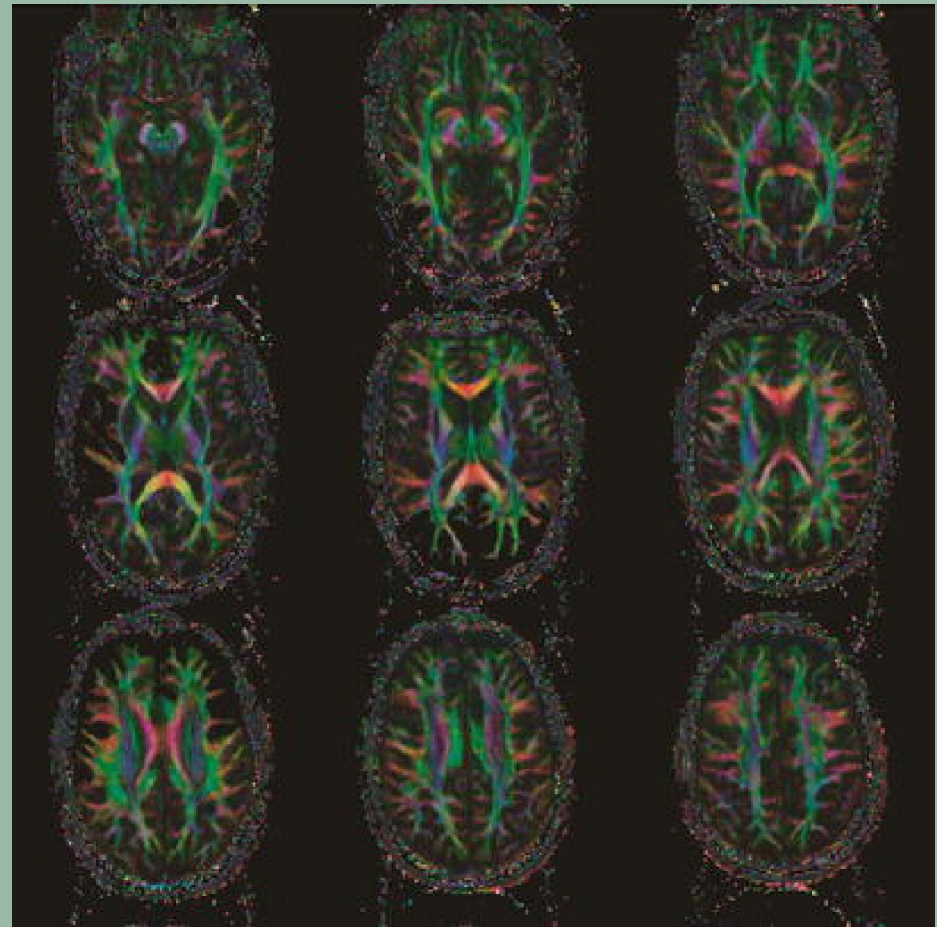
- Värvkodeerimine
- Difusioonellipsoidid
- Traktograafia



Yoshitaka Masutani, Shigeki Aoki, Osamu Abe, Naoto Hayashi, Kuni Otomo "MR diffusion tensor imaging: recent advance and new techniques for diffusion tensor visualization" European Journal of Radiology 46 (2003) 53/66

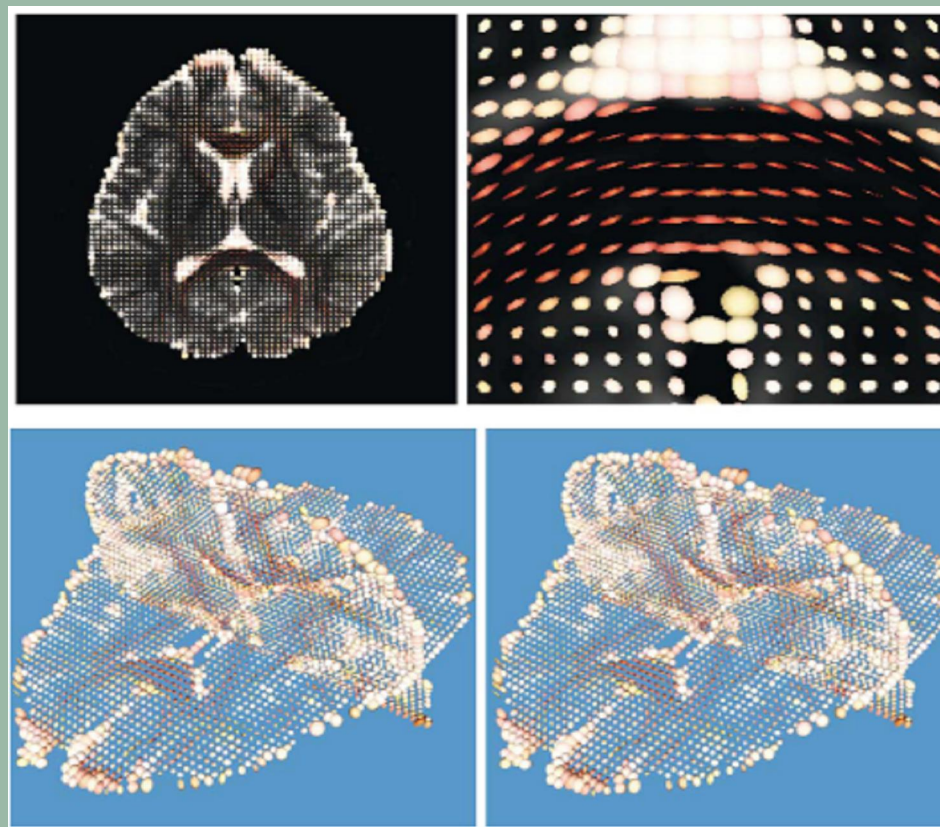
DTI värvkodeering

- Värv = trakti orientatsioon
- Punane = RL suund
- Roheline = AP suund
- Sinine = SI suund



Difusioon-tensor andmete kuvamine: ellipsoidid

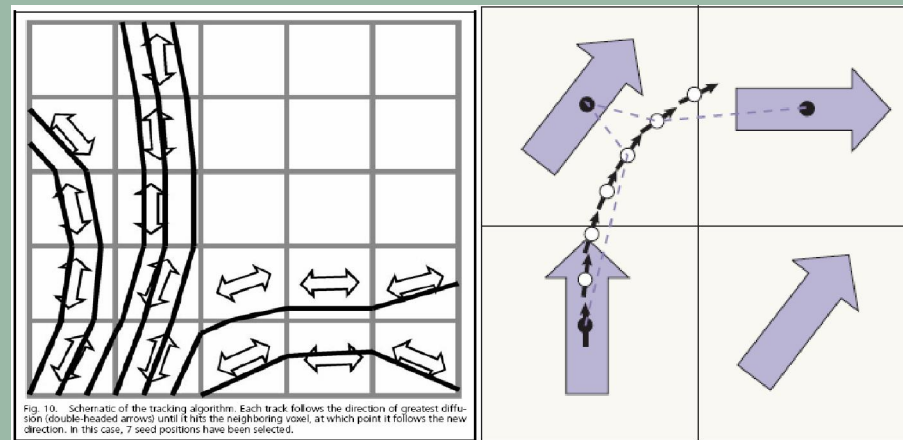
- Enamasti kasutatakse nooli, ellipsoide
- Eesmärk on kuvada difusiooni anisotroopsust ruumis



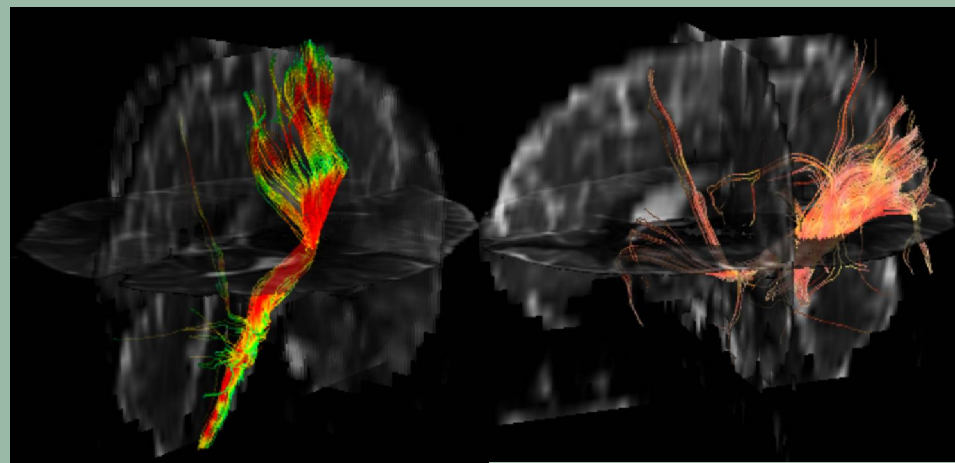
Yoshitaka Masutani, Shigeki Aoki, Osamu Abe, Naoto Hayashi, Kuni Otomo "MR diffusion tensor imaging: recent advance and new techniques for diffusion tensor visualization" European Journal of Radiology 46 (2003) 53/66

Traktograafia

- Põhineb kiudude järgimisel difusioon-tensori maksimaalse omaväärtusele vastava omavektori suunal
- Põhineb joone edasilevikumeetodil Järgimisjoon algab alguspunktist (seed point)



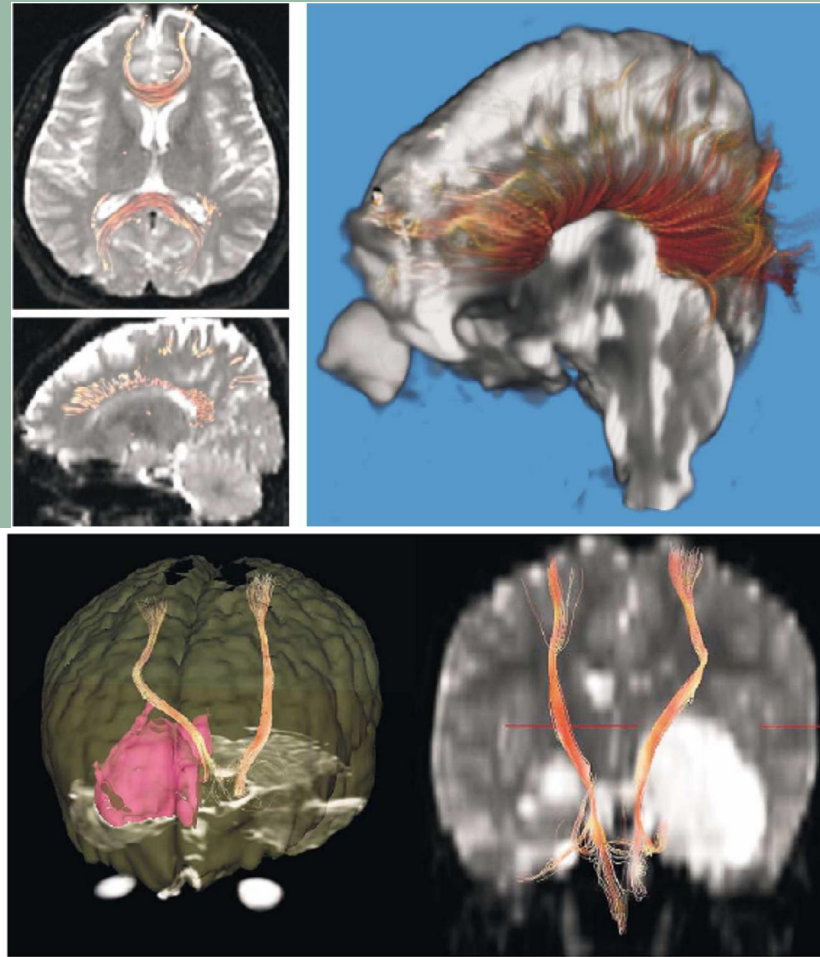
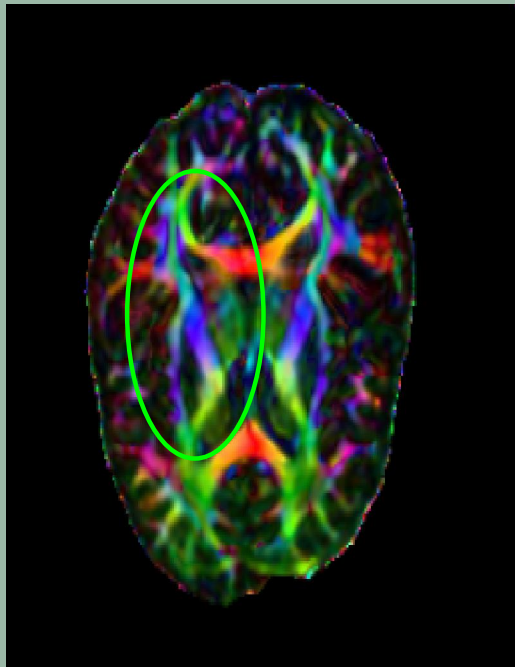
Denis Le Bihan "Looking into the functional architecture of the brain with diffusion MRI", Neuroscience, Volume 4, June 2003



Traktograafia, GE HDx 1,5 T, märts 2007 27
Põhja-Eesti Regionaalhaigla

Traktograafia

- Traktide kuvamine
 - ROI määramine
 - Algse ROI määramine ning lõpp ROI määramine



Yoshitaka Masutani, Shigeki Aoki, Osamu Abe, Naoto Hayashi, Kuni Otomo "MR diffusion tensor imaging: recent advance and new techniques for diffusion tensor visualization" European Journal of Radiology 46 (2003) 53/66

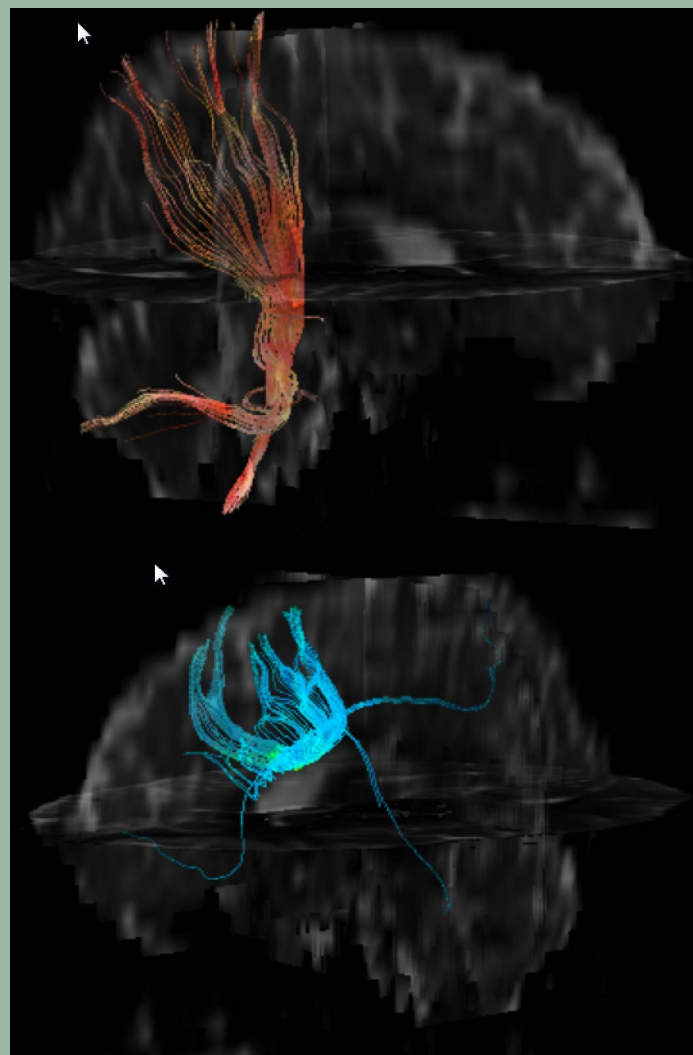
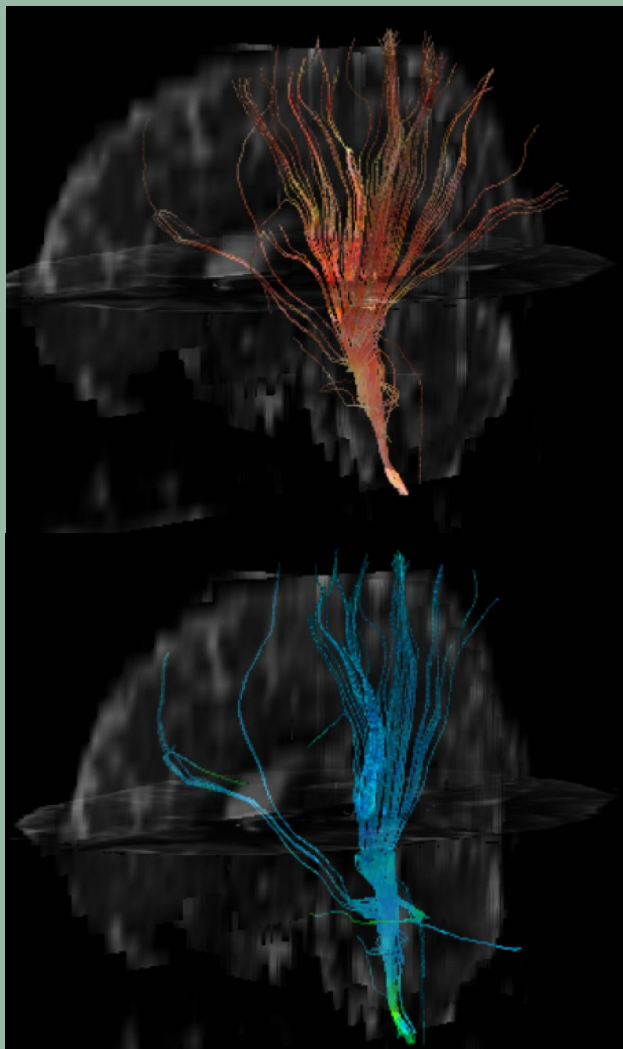
Traktograafia

- Praktikas määratakse mitu “seed” punkti uuritavas piirkonnas (ROI) ning:
 - Arvutatakse mõlemale poole kiudude trajektoorid
 - Fikseeritakse algne (seed) ROI ning sihtmärk (target) ROI ning arvutatakse kahe piirkonna vaheliste kiudude trajektoorid



Traktograafia, GE HDx 1,5 T, märts 2007
Põhja-Eesti Regionaalhaigla

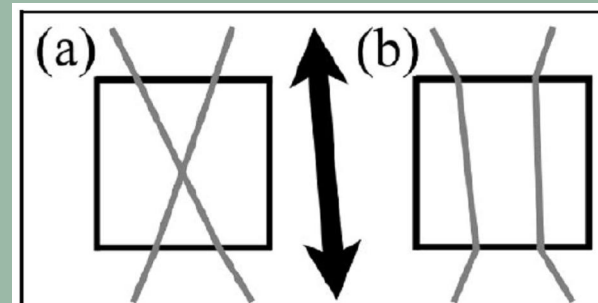
Traktograafia



GE Signa Hdx 1.5T Perh

DTI traktograafia limitatsioonid

- Peamiselt suuremate traktide jaoks
- Väiksemad kimbud võivad jääda kuvamata
- Probleemid ristuvate, puutuvate kimpudega



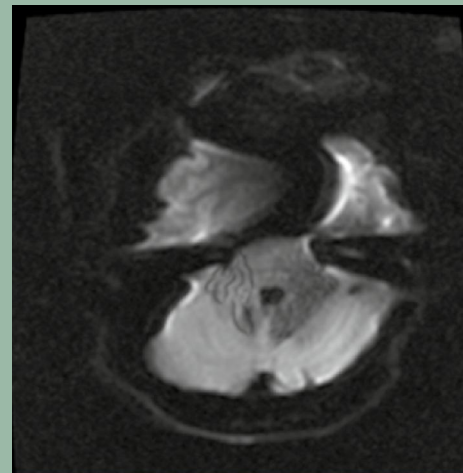
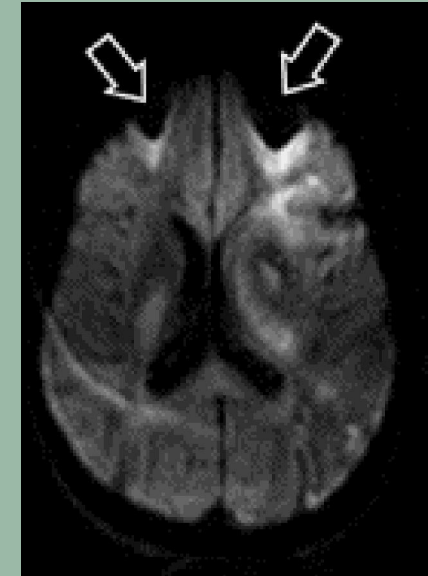
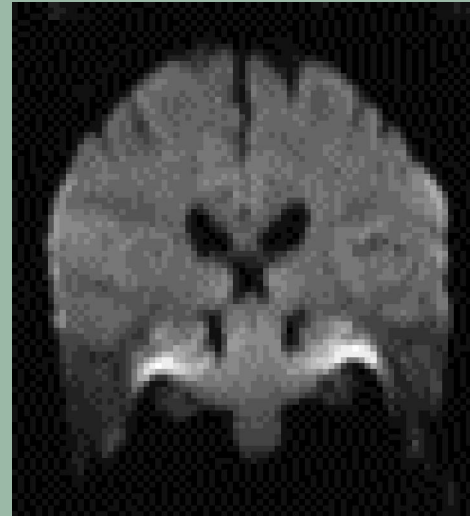
Denis Le Bihan "Looking into the functional architecture of the brain with diffusion MRI", Neuroscience, Volume 4, June 2003



Yoshitaka Masutani, Shigeki Aoki, Osamu Abe, Naoto Hayashi, Kuni Otomo "MR diffusion tensor imaging: recent advance and new techniques for diffusion tensor visualization" European Journal of Radiology 46 (2003) 53/66

DWI ja DTI üldised limitatsioonid

- Madal resolutsioon
- Väike SNR
- Vastuvõtlik artefaktide suhtes
- Magnetilise vastuvõtlikkuse artefakt
 - Signaali kadu
 - Kujutise moonutus



DTI kokkuvõte

- Difusioon-tensorkuvamise abil mõõdetakse vee molekulide anisotroopsust koes
- Kujutiste saamisel kasutatakse difusioon-tundlikke gradiente (vähemalt 6 suunda) ja mõõdetakse suunast sõltuva signaali kadu ning määratakse arvutuslikult difusioonellipsoid (difusioontensori elemendid)
- Võimaldab teostada valgeaine närvikiudude traktograafiat