

Difusioon-tensorkuvamise
füüsikalised ja matemaatilised
alused
magnetresonantstomograafias

Sven Telliskivi

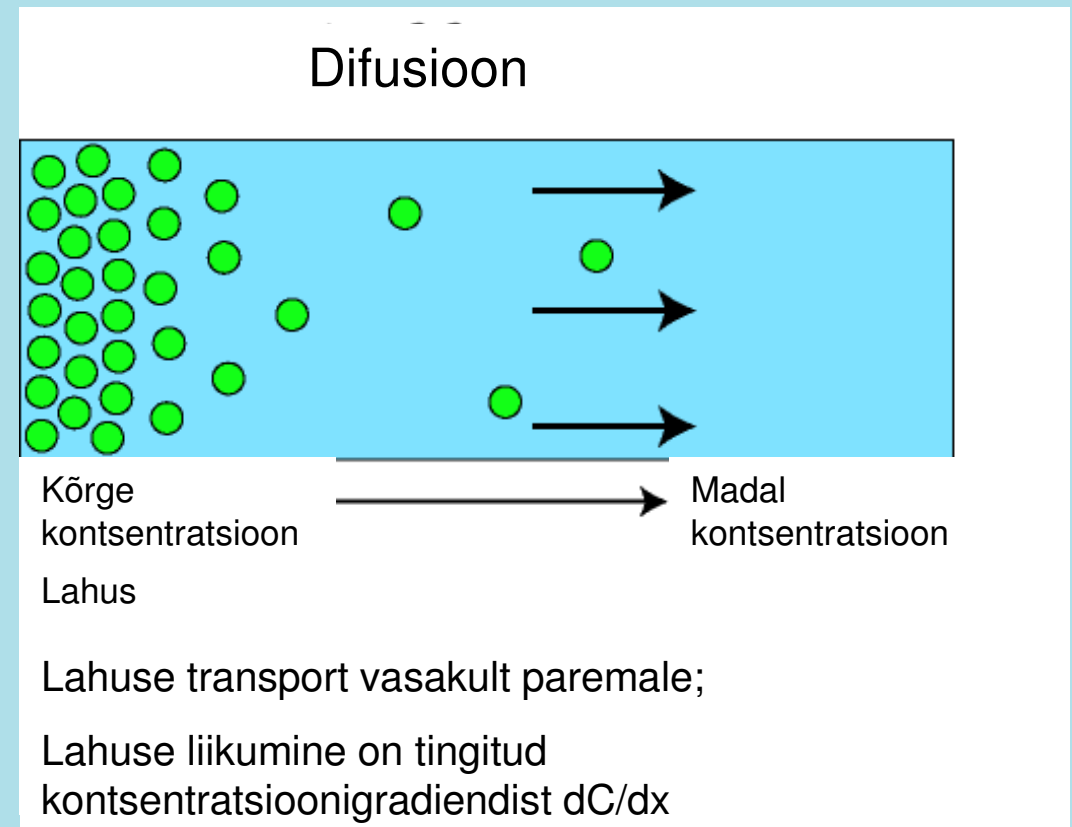
Andrus Paats

Roki Viidik

02.05.2007

Difusioon

- Difusioon on looduslik protsess
- Difusioon on millegi spontaanne, näiteks osakeste, soojuse levik keskkonnas
- Difusioon toimub kõrgema kontsentratsiooniga piirkonnast madalama kontsentratsiooni piirkonna suunas

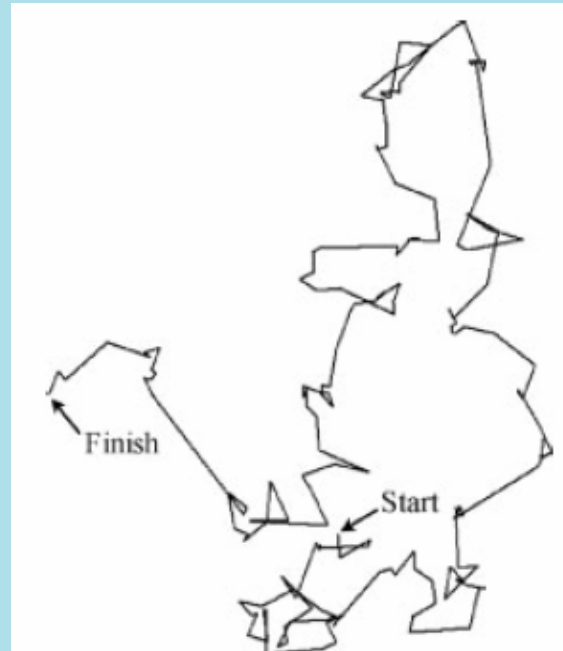


<http://epswww.unm.edu/coursinf/eps462/graphics/diffusion.gif>

Difusioon homogeeenses keskkonnas

- Difusioon on osakeste juhuslik liikumine tänu soojusenergiale (Browni liikumine)
- Osakeste liikumist saab kirjeldada “random walk” mudeliga
- Juhuslikkusele vaatamata saab tõenäosuslikult määrata osakeste nihet algasukohast teatud aja t möödudes
- Osakese ruutkeskmine nihe on võrdeline difusioonajaga (Einstein'i võrrand)

$$\langle r^2 \rangle = 6Dt$$



Joonis. Simulatsioon näitamaks molekuli juhuslikku liikumist (random walk). Molekul liigub juhusliku vahemaa, põrkab teise molekuliga kokku ja jätkab liikumist juhuslikus suunas.

Tabel. Veemolekulide ruutkeskmine nihe erinevate difusioonaegade jaoks, eeldades isotroopset (RMS – root mean square) difusioonkoefitsienti ($3.2 \times 10^{-3} \text{ mm}^2/\text{s}$ ja anisotroopset $0.75 \times 10^{-3} \text{ mm}^2/\text{s}$ (ajus)).

Difusioon aeg	RMS (tõkestamata)	RMS (ajus)
1 ms	4.4 μm	2.1 μm
10 ms	14 μm	6.7 μm
100 ms	44 μm	21 μm
1 s	139 μm	67 μm

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

Difusioon

- Kui molekulid saavad vabalt liikuda igas ruumisuunas, on tegemist isotroopse difusiooniga
- Ajus põhjustavad ümbritsevad struktuurid veemolekulide piiratud liikumise, s.t. molekulide liikumine on tõkestatud
- Difusiooni suurus muutub ruumisuunaga – difusiooni anisotroopsuse fenomen
- Difusioonikoefitsient D on võrdetegur, mis iseloomustab difusiooni ulatust
- Difusioon-tensorkuvamisel rakendatakse asjaolu, et D sõltub ruumisuunast

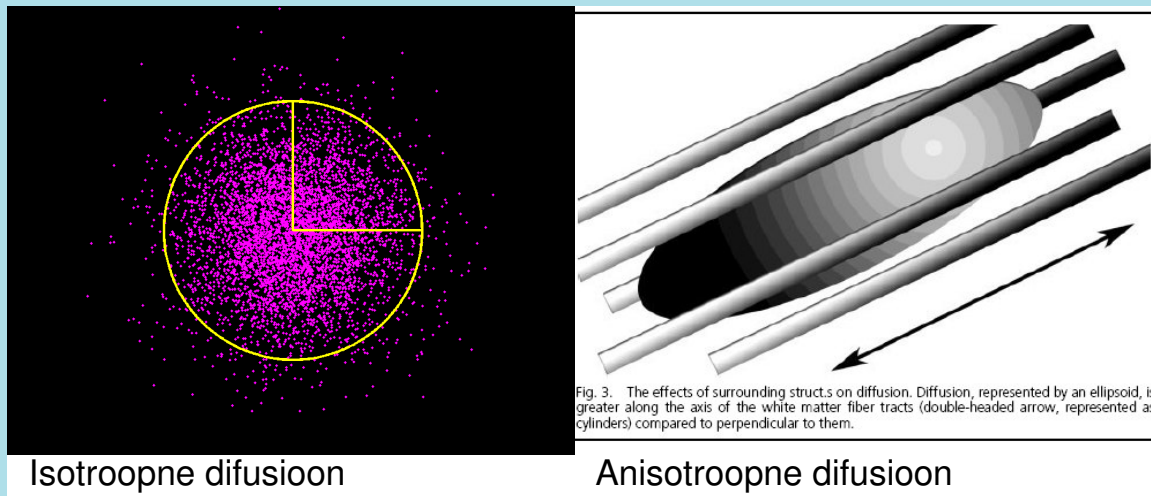
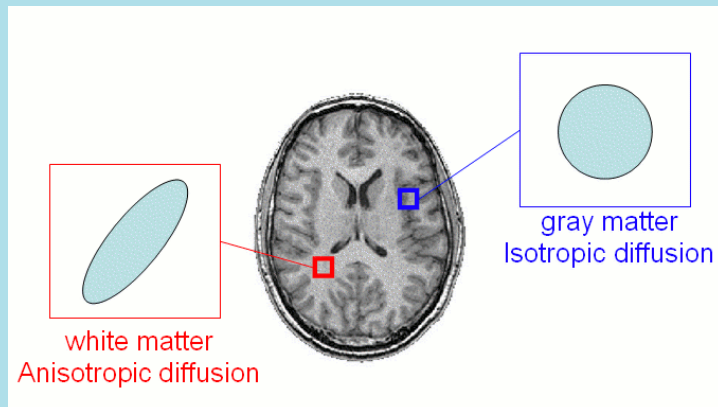


Fig. 3. The effects of surrounding structures on diffusion. Diffusion, represented by an ellipsoid, is greater along the axis of the white matter fiber tracts (double-headed arrow, represented as cylinders) compared to perpendicular to them.

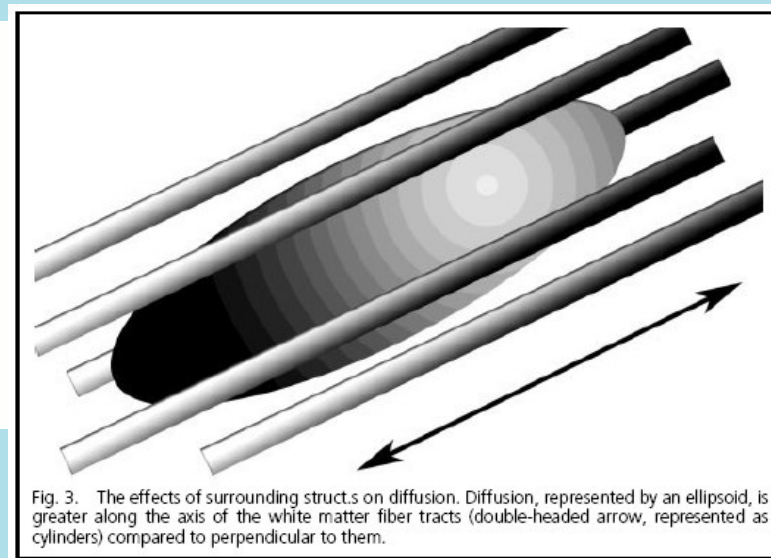
Richard Watts, Conor Liston, Sumit Niogi, and Aziz M. Ulug "FIBER TRACKING USING MAGNETIC RESONANCE DIFFUSION TENSOR IMAGING AND ITS APPLICATIONS TO HUMAN BRAIN DEVELOPMENT" MENTAL RETARDATION AND DEVELOPMENTAL DISABILITIES RESEARCH REVIEWS 9: 168–177 (2003)

Difusioon- ja difusioon-tensorkuvamine

- **Difusioon**kuvamine on tehnika mis võimaldab saada infot valge aine traktide terviklikkuse ja **tasapinnalise** orientatsiooni kohta ajus
- Meetod määramaks valgeainetraktide kahjustusi erinevate haiguste puhul
- **Difusioon-tensorkuvamine** on difusioonkuvamise rakendus, kus saadakse difusioon-kaalutud kujutised ning neile kõigile **on rakendatud difusioongradiente erinevates ruumisuundades**
- Antud tehnika abil saab detekteerida difusiooni anisotroopsust valgeaines ning teostada traktograafiat.



<http://exocet.imed.jussieu.fr/~sjbabdi/images/diffusionSchema.gif>

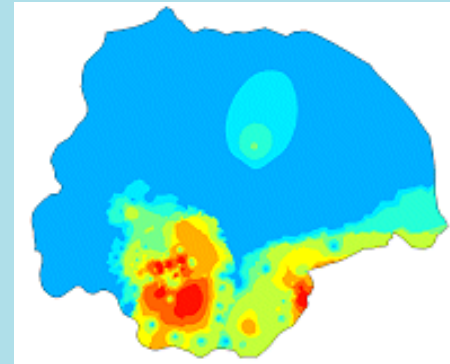


Richard Watts, Conor Liston, Sumit Niogi, and Aziz M. Ulug "FIBER TRACKING USING MAGNETIC RESONANCE DIFFUSION TENSOR IMAGING AND ITS APPLICATIONS TO HUMAN BRAIN DEVELOPMENT" MENTAL RETARDATION AND DEVELOPMENTAL DISABILITIES RESEARCH REVIEWS 9: 168-177 (2003)

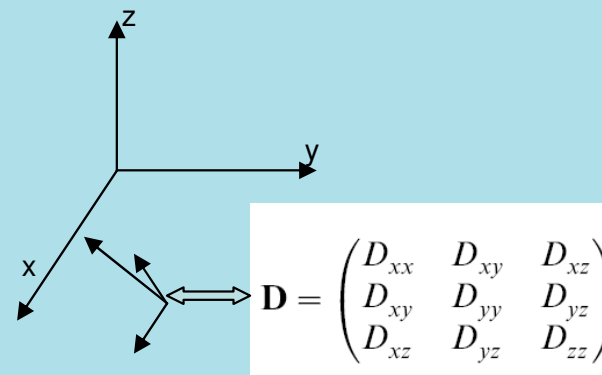
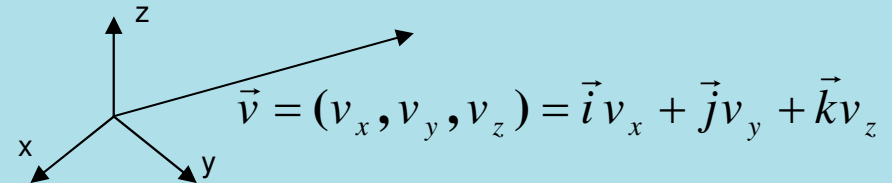
Tensori mõiste

- Füüsikas kirjeldab tensor füüsikalise süsteemi omadusi
- Tensori elemendid koordinaatfunktsioonid
- Tensor võib koosneda ühes arvust (**0-järku tensor** ehk **skalaar**).
Näide: osakese mass. **Tensorväli**: vedeliku tihedus asukoha funktsioonina
- **1-järku tensor** ehk **vektor**. Vektoril on 3 koordinaati (Eukleidiline ruum).
Näide: vektorväli, mis kirjeldab elektrivälja ruumis
- **2-järku tensor, maatriks**. $3 \times 3 = 9$ elemendist koosnev maatriks, mis kirjeldab antud kontekstis difusiooniprotsessi ruumis
- Maatriksil on kolm sõltumatut omavektorit. Difusiooni võib iseloomustada kolme sõltumatu vektoriga ruumis (maatriksi omavektorid määravad ära difusioonellipsoidi)

Skalaarväli



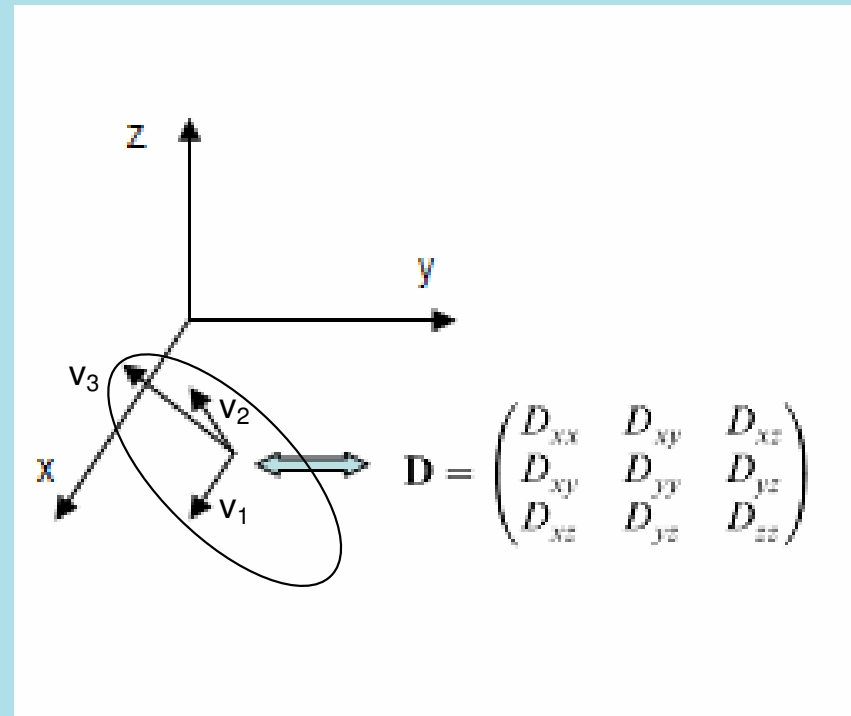
<http://mqir.ucsf.edu/images/proj/ftri2.jpg>



Tensori mõiste

- 2 järku difusioon-tensor:
- Omaväärtusülesanne: $D\vec{v} = \lambda\vec{v}$
- Omaväärtused: $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$
- Omaväärtustele vastavad omavektorid: $\vec{v}_1, \vec{v}_2, \vec{v}_3$
- Omavektorid moodustavad ortogonaalse baasi (ristkoordinaadistik)
- Omavektorite abil saab konstrueerida maatriksile vastava ellipsoidi

$$\mathbf{D} = \begin{pmatrix} D_{xx} & D_{xy} & D_{xz} \\ D_{xy} & D_{yy} & D_{yz} \\ D_{xz} & D_{yz} & D_{zz} \end{pmatrix}$$



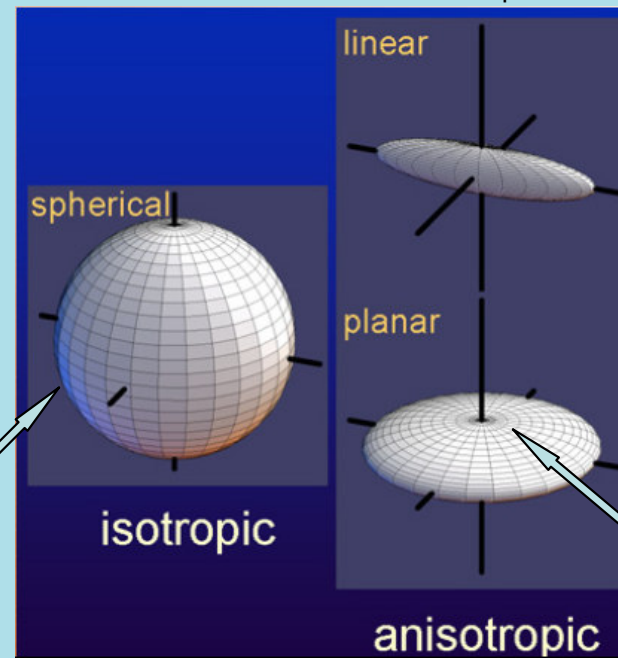
Difusioon-tensori mõiste

- Anisotroopse keskkonna difusiivseid omadusi saab kirjeldada 3x3 sümmeetrilise tensoriga
- Difusioon-tensori omaväärtused määravad ära difusioonikoefitsiendid kolmes koordinaatsuunas, mis kirjeldavad difusiooni ulatust antud suundadel
- Suurim difusioon-tensori omaväärtus määrab ära maksimaalse difusiooni suuna uuritavas piirkonnas (voksel)

$$\mathbf{D} = \begin{pmatrix} D_{xx} & D_{xy} & D_{xz} \\ D_{xy} & D_{yy} & D_{yz} \\ D_{xz} & D_{yz} & D_{zz} \end{pmatrix}$$



<http://www.stat.ucla.edu/~dinov>

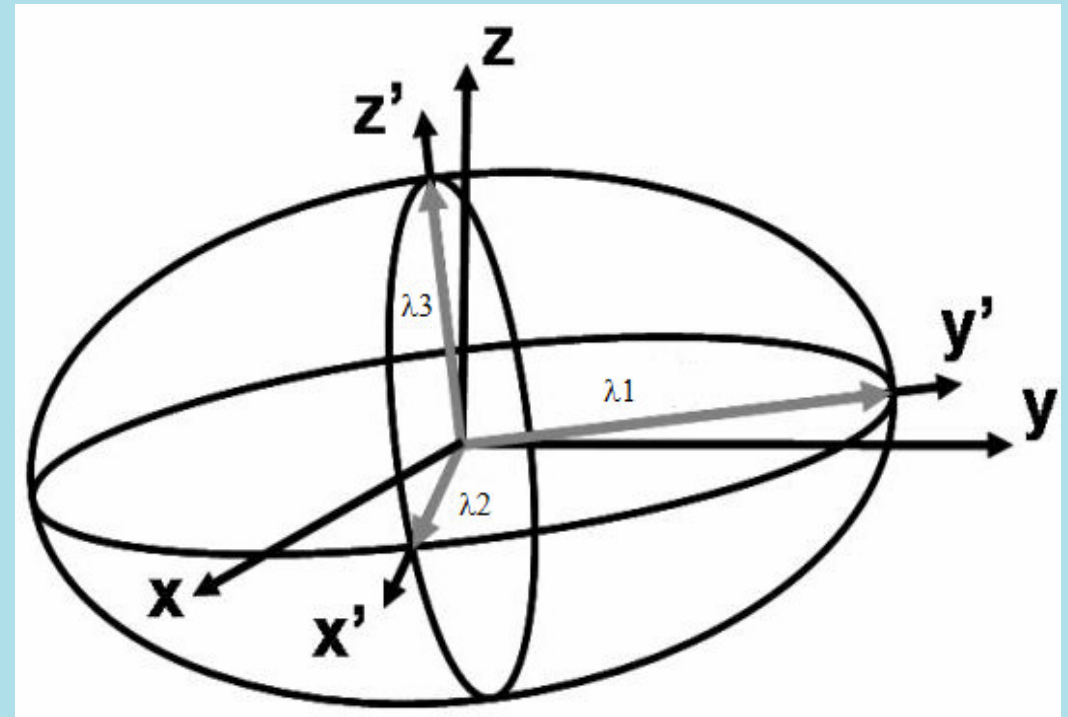


$$\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3$$

$$\lambda_1, \lambda_2 \gg \lambda_3$$

Difusioon-tensori iseloomustamine

- Difusioon-tensorit iseloomustatakse difusioonellipsoidi kuju ja orientatsiooni järgi:
 - Kuju (difusiooni ulatus) = omaväärtus λ
 - Orientatsioon (difusiooni suund) = omavektor v

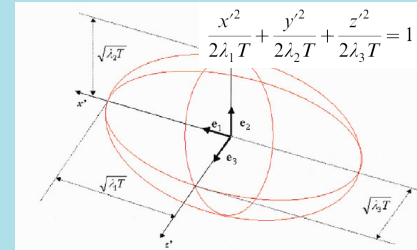


<http://www.ruppweb.org/xray/comp/ellipsoid.GIF>

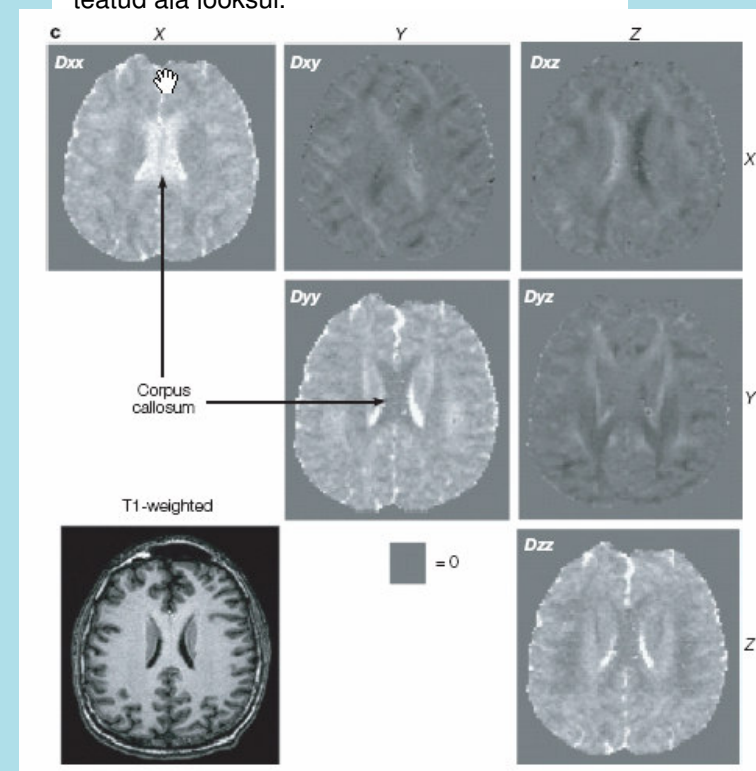
Difusioon-tensori iseloomustamine

- Difusioon-tensorit kirjeldab maatriks **D**:
- Peadiagonaalil olevad elemendid kirjeldavad difusiooni ristsuundadel (taustkoordinaadistik)
- Ülejäänud elemendid kirjeldavad difusiooni suundadel mis jäävad 45° nurga alla taustkoordinaadistiku telgede suhtes (xy,xz,yz)

$$\mathbf{D} = \begin{pmatrix} D_{xx} & D_{xy} & D_{xz} \\ D_{xy} & D_{yy} & D_{yz} \\ D_{xz} & D_{yz} & D_{zz} \end{pmatrix}$$

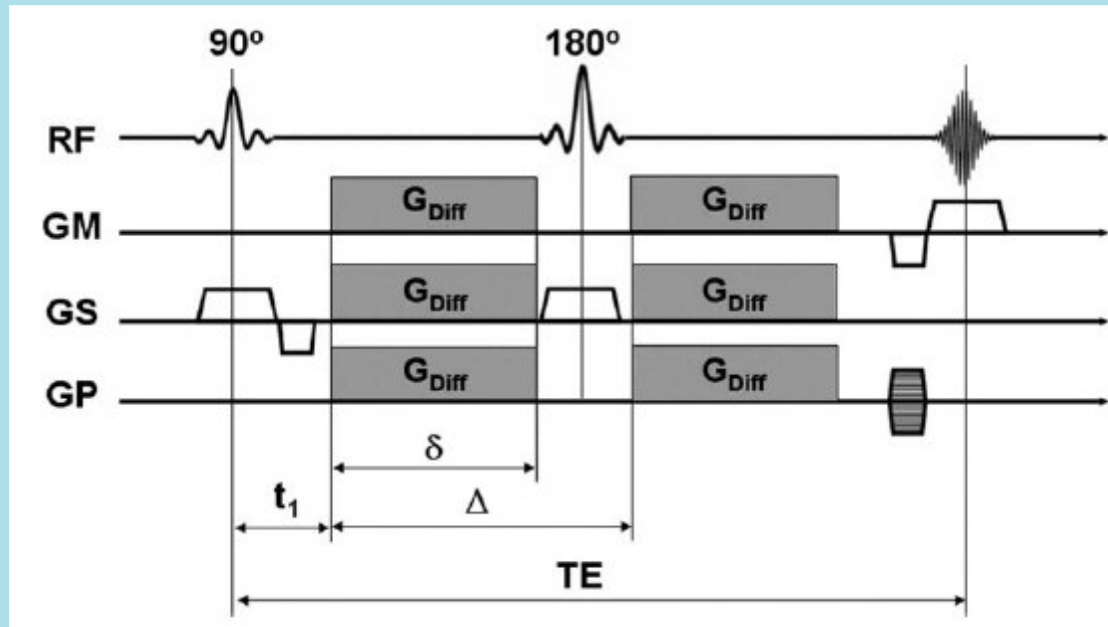


Joonis. Ellipsoidaalne aproksimatsioon anisotroopsusest. Ellipsoidi pind tähistab difusiooni teepikkust ellipsoidi keskpunktist teatud aja iooksul.



Difusioon-tensorkuvamise alused

- Difusioon-kaalutud kujutise salvestamiseks kasutatakse difusioon-tundlikke gradiente, mis baseeruvad Stejskal-Tanner spin-echo diagrammil:



Difusioon-tensorkuvamise alused

- Difusioonkuvamise Stejskal-Tanner diagrammi osa:
- G on gradiendi tugevus, δ gradiendi kestvus ja Δ ajaintervall kahe gradientpulsi vahel
- 90° impulss pöörab prootonid ristasandile.
- Esimene gradient indutseerib ristasandis prootonite vahel faasinihke ϕ_1 , mis sõltub nende positsioonist. Kui gradient on näiteks mööda z -telge:

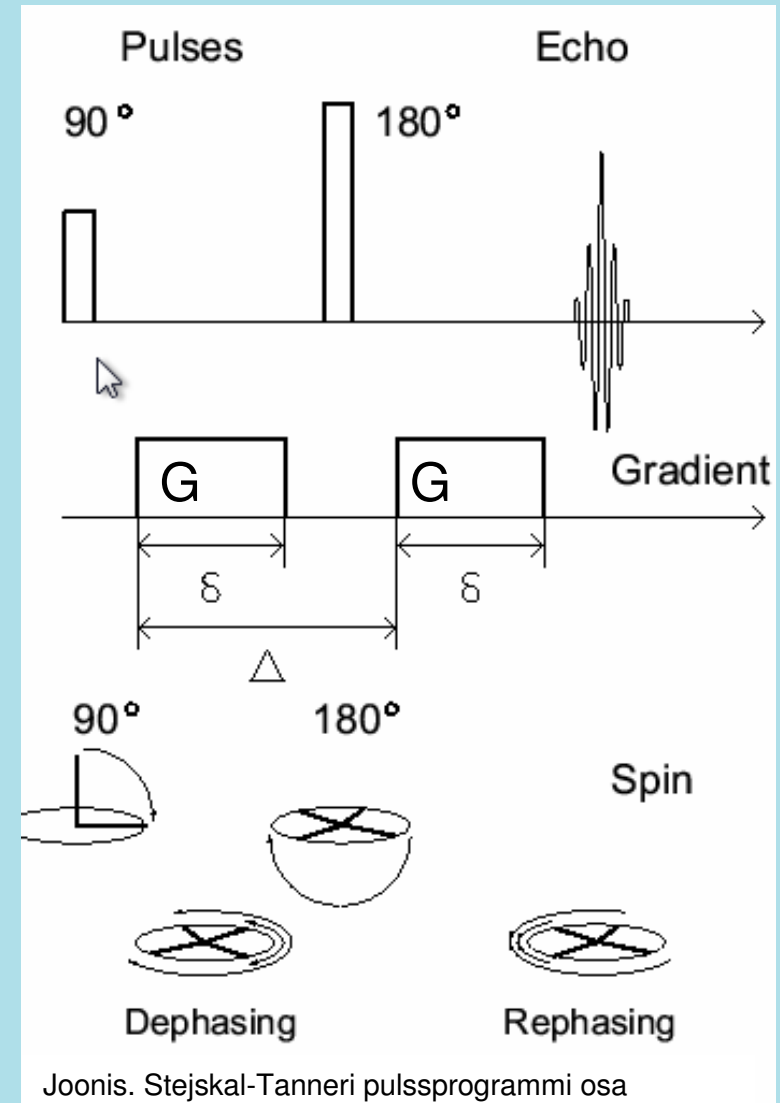
$$\phi_1 = \gamma \int_0^\delta G z_1 dt = \gamma G \delta z_1$$

- Pärast 180 pulssi muutub $\phi_1 \rightarrow -\phi_1$
- Samaselt, tekitab teine gradientpulss prootonitele faasinihke ϕ_2 :

$$\phi_2 = \gamma \int_\Delta^{\Delta+\delta} G z_2 dt = \gamma G \delta z_2$$

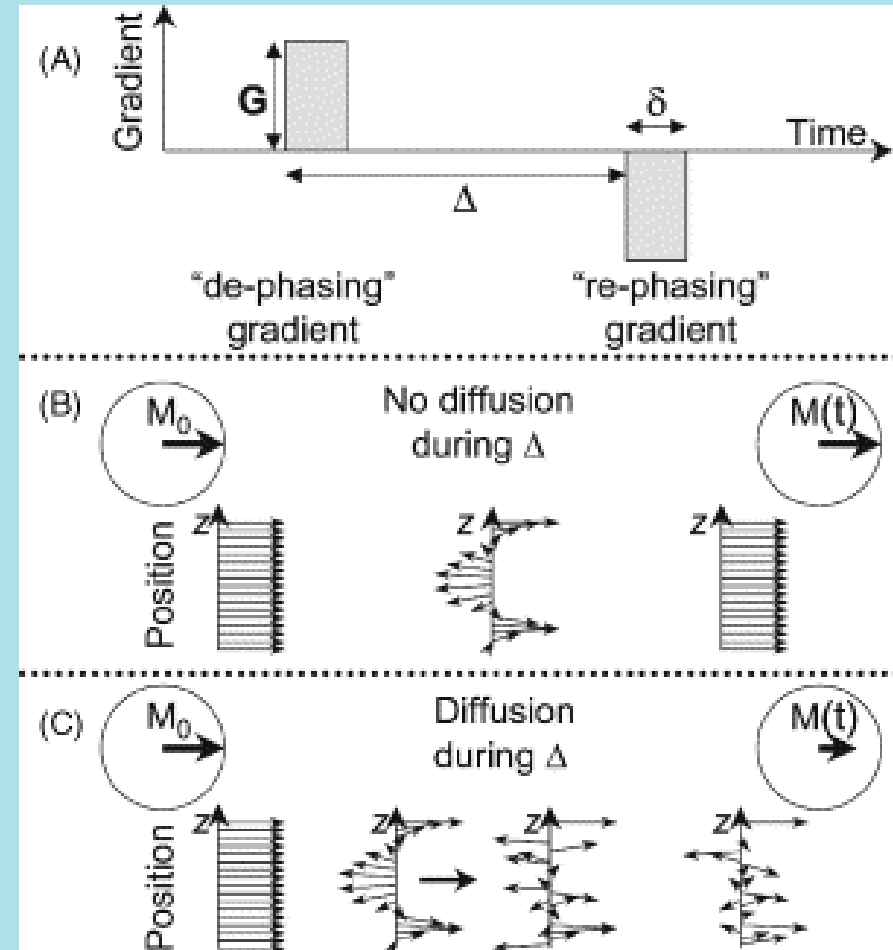
- kus z_2 on prootoni positsioon teise pulsi ajal. Resultant faasinihke $\delta(\phi)$ on seega:

$$\delta(\phi) = \phi_2 + (-\phi_1) = \gamma G \delta (z_1 - z_2)$$



Difusioon-tensorkuvamise alused

- Kui prooton on staatiline, st. $z_1=z_2$ siis gradientpaar ei tekita resultantfaasinihet
- Liikuvate (difundeeruvate) prootonite jaoks tekib aga resultant faasinihe, mis sõltub Δ -st ja mis mõjutab transversaalset magnetisatsiooni (signaali)
- Kui prootonid difundeeruvad juhuslikult siis nende pretsessioonsagedused on erinevad peale teist gradientpulssi ning prootonite joondumine ei ole enam täiuslik (signaali kadu)
- Mida rohkem on difusiooni seda rohkem kaotatakse signaali intensiivsust
- Signaali kadu tähistatakse b-ga (b-value)

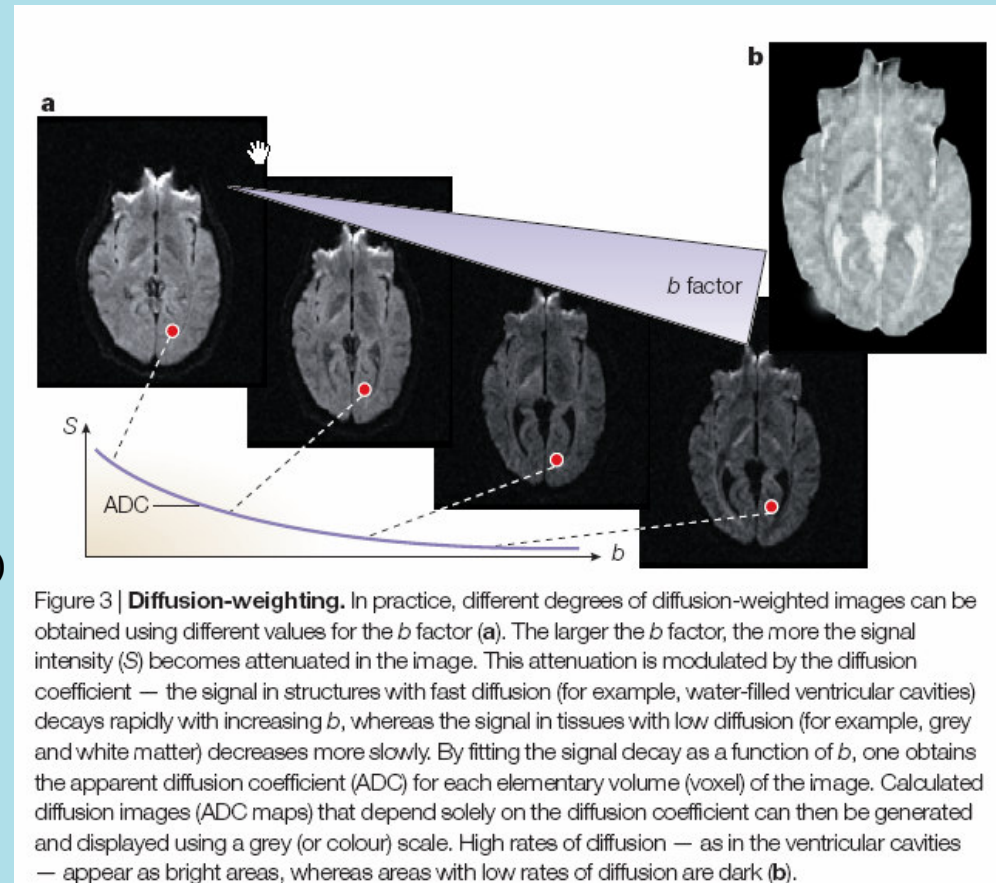


Difusioon-tensorkuvamise alused

- Difusioonkaalutud kujutisi iseloomustab signaalintensiivsusega S
- S_0 on signaal mis saadud ilma difusioonigradiente kasutamata
- Nende kahe signaali vahel kehtib seos:

$$S = S_0 e^{-bD_{app}}, \text{ kus } b = \gamma^2 G^2 \delta^2 \left(\Delta - \frac{\delta}{3} \right)$$

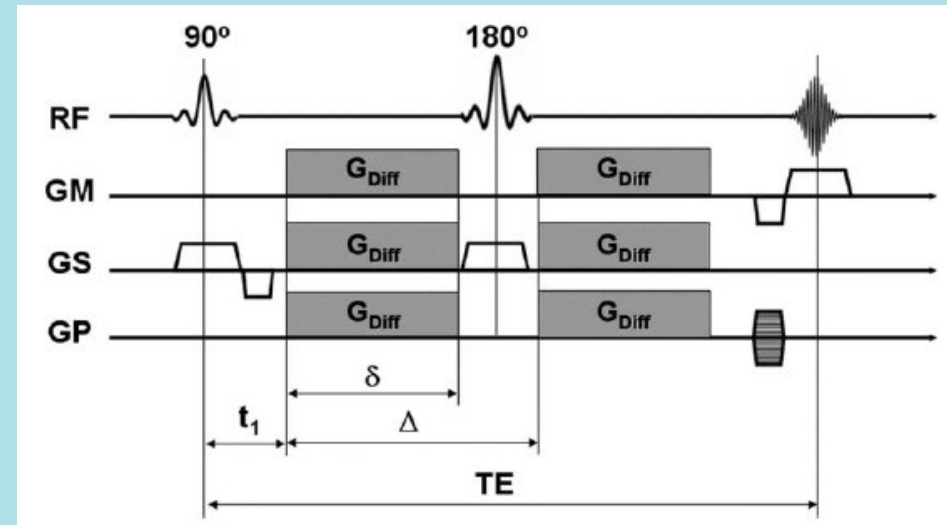
- Parameeter b , sõltub riistvarast
- D_{app} – skalaarne suurus, mis iseloomustab difusiooni vokselis.



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

Difusioon-tensorkuvamise alused

- D_{app} – skalaarne suurus, ilmne difusioonikoefitsient, *apparent diffusion coefficient* (ADC), mis iseloomustab molekulaarset difusiooni
- Kui võtta arvesse seda, et **ADC sõltub ruumisuunast**, siis seda aproksimeeritakse tensoriga:



Roland Bammer "Basic principles of diffusion-weighted imaging", European Journal of Radiology 45 (2003) 169/184

$$S = S_0 e^{-\gamma^2 G^2 \delta^2 \left(\Delta - \frac{\delta}{3}\right) D_{app}}$$

$$G^2 D_{app} = \vec{g}^T D \vec{g}$$

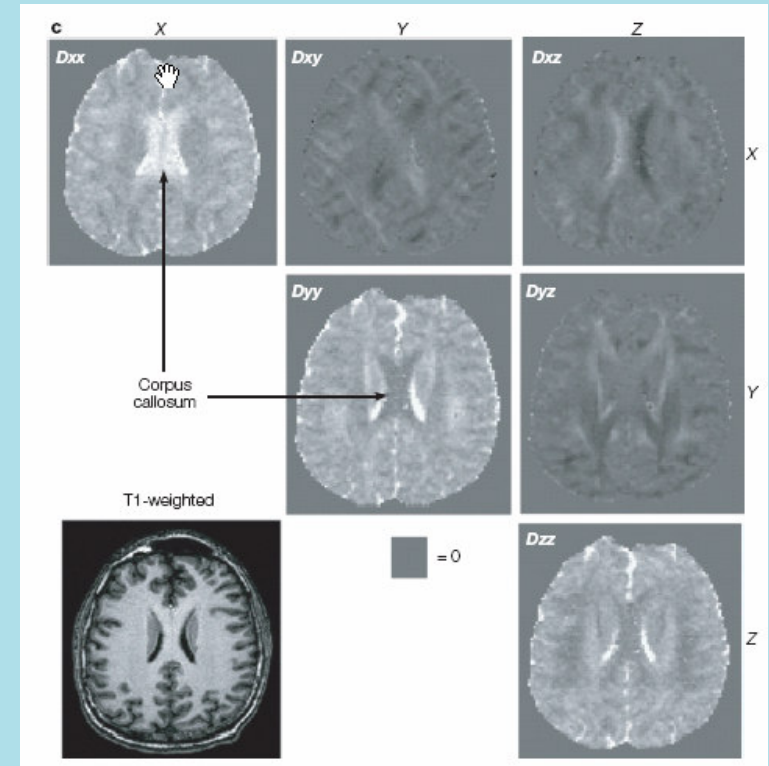
Difusioon-tensorkuvamise alused

- $\mathbf{g}_i = (x_i, y_i, z_i)^T$ on gradientvektor, mille suurus $|\mathbf{g}|=G$ ning \mathbf{D} on 3x3 sümmeetriline maatriks ning

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

- Arvestades uusi tingimusi, saame võrrandi :

$$S = S_0 e^{-b \vec{g}^T \mathbf{D} \vec{g}} \quad (2)$$



$$\mathbf{D} = \begin{pmatrix} D_{xx} & D_{xy} & D_{xz} \\ D_{xy} & D_{yy} & D_{yz} \\ D_{xz} & D_{yz} & D_{zz} \end{pmatrix}$$

Difusioon-tensori elementide määramine: LVS lahendamine

- Tehes algebralisi lihtsustusi võrrandile (2), saame:

$$\begin{pmatrix} x_1^2 & y_1^2 & z_1^2 & x_1 y_1 & y_1 z_1 & z_1 x_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_i^2 & y_i^2 & z_i^2 & x_i y_i & y_i z_i & z_i x_i \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n^2 & y_n^2 & z_n^2 & x_n y_n & y_n z_n & z_n x_n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} D_{xx} \\ D_{yy} \\ D_{zz} \\ D_{xy} \\ D_{yz} \\ D_{zx} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{1}{b} \ln \frac{S_1}{S_0} \\ \vdots \\ -\frac{1}{b} \ln \frac{S_i}{S_0} \\ \vdots \\ -\frac{1}{b} \ln \frac{S_n}{S_0} \end{pmatrix} \quad (3),$$

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

kus $\mathbf{g}_i = (x_i, y_i, z_i)^T$ ja S_i on vastavalt gradiendi suund ja signaali intensiivsus ning $i=1, \dots, n$ on gradientsuundade arv

Arvutuslikult kasutatakse antud LVS'i lahendamiseks matriksite teoriast tuntud **singulaarlahutust** vähimruutude meetodiga

Difusiooni anisotroopsus tensori elementide järgi

- Difusioon-tensor on ellipsoidaalne aproksimatsioon difusiooni anisotroopsusest
- Ellipsoidi kasutatakse tensori visualiseerimiseks
- Tensori omaväärtuste kaudu arvutatakse erinevad difusiooni iseloomustavad parameetrid
 - *fractional anisotropy* (FA)
 - *volume ratio* (VR)
 - *relative anisotropy* (RA)
 - *exponential attenuation*
 - *mean diffusivity*
 - ...

Erinevad difusiooni iseloomustavad parameetrid

- Arvutatud parameetrite eesmärk on iseloomustada difusiooni anisotroopsust keskkonnas

Tabel. Kokkuvõte 3D voksli DAI (difusioon anisotroopsuse indeks) valemitest, mis varieeruvad 0-st (isotroopne) kuni 1-ni (anisotroopne) arvutatuna omaväärtuste kaudu.

Index	Definition	Eigenvalue Formula
Fractional Anisotropy (<i>FA</i>)	$(3\mathbf{D}_{\text{an}}:\mathbf{D}_{\text{an}}/2\mathbf{D}:\mathbf{D})^{1/2} = (1 - I_2/I_4)^{1/2}$	$\sqrt{\frac{3[(\lambda_1 - D_{\text{av}})^2 + (\lambda_2 - D_{\text{av}})^2 + (\lambda_3 - D_{\text{av}})^2]}{2(\lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2)}}$
Scaled relative anisotropy (<i>sRA</i>)	$(\mathbf{D}_{\text{an}}:\mathbf{D}_{\text{an}}/6)^{1/2}/D_{\text{av}} = (1 - D_{\text{surf}}^2/I_1^2)^{1/2}/D_{\text{av}} = (1 - 3I_2/I_1^2)^{1/2}$	$\frac{\sqrt{(\lambda_1 - D_{\text{av}})^2 + (\lambda_2 - D_{\text{av}})^2 + (\lambda_3 - D_{\text{av}})^2}}{\sqrt{6} D_{\text{av}}}$
Volume fraction (<i>VF</i>), volume ratio (<i>VR</i>)	$1 - I_3/D_{\text{av}}^3 = 1 - (D_{\text{vol}}/D_{\text{av}})^3 = 1 - 27I_3/I_1^3$	$1 - \lambda_1\lambda_2\lambda_3/D_{\text{av}}^3$
UA_{surf}	$1 - D_{\text{surf}}/D_{\text{av}}$	$1 - [(\lambda_1\lambda_2 + \lambda_2\lambda_3 + \lambda_3\lambda_1)/3]^{1/2}/D_{\text{av}}$
UA_{vol}	$1 - D_{\text{vol}}/D_{\text{av}}$	$1 - (\lambda_1\lambda_2\lambda_3)^{1/3}/D_{\text{av}}$
$UA_{\text{vol,surf}}$	$1 - D_{\text{vol}}/D_{\text{surf}} = (UA_{\text{vol}} - UA_{\text{surf}})/(UA_{\text{surf}} - 1)$	$1 - (\lambda_1\lambda_2\lambda_3)^{1/3}/[(\lambda_1\lambda_2 + \lambda_2\lambda_3 + \lambda_3\lambda_1)/3]^{1/2}$
Lattice index, LI_N	$(FA + FA^2)/2$	

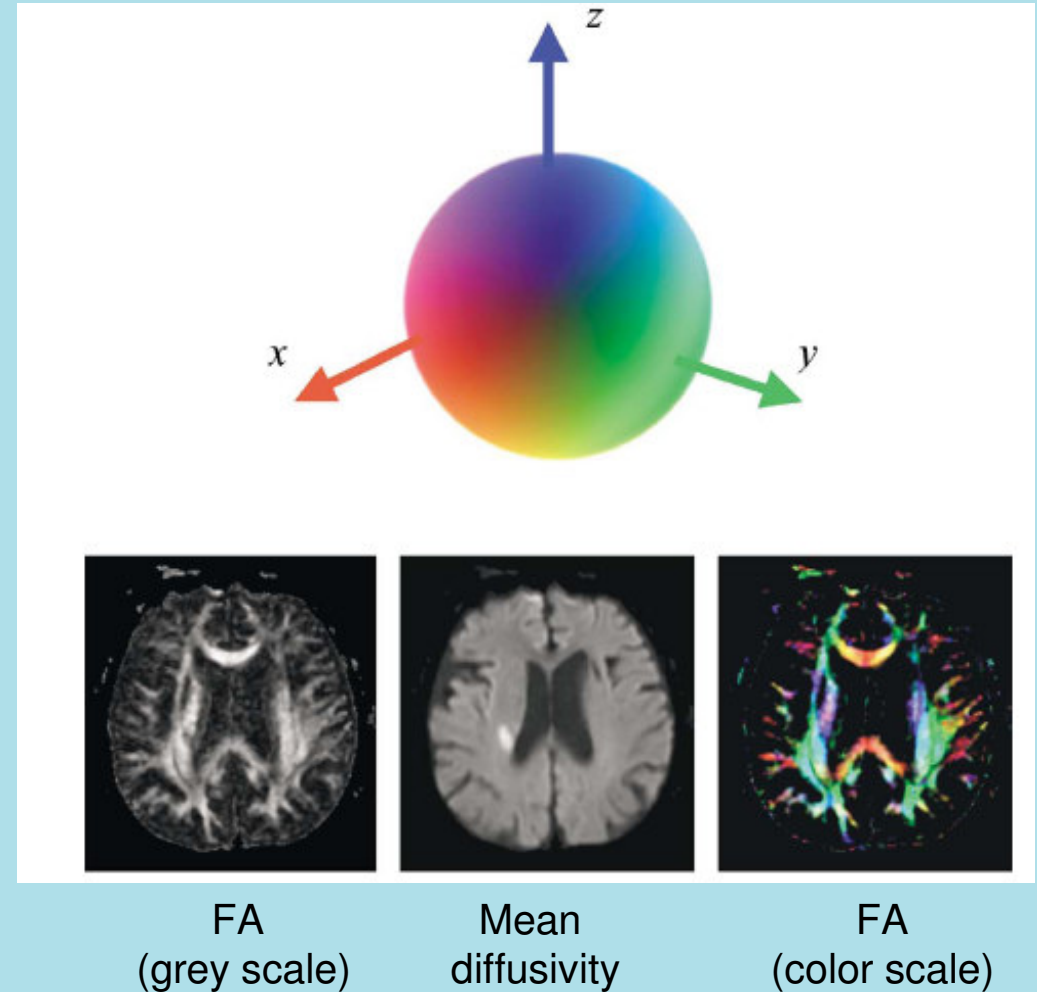
Note: \mathbf{D}_{an} is the anisotropic part of \mathbf{D} (Eq. [I-67]). The rotational invariants $I_1, I_2, I_3, D_{\text{av}}, D_{\text{surf}}$, and D_{vol} were defined in Part I.

Visualiseerimistehnikad difusioon-tensor andmete jaoks

- Jagatakse kahte kategooriasse:
 - Iga vokseli väärtus peegeldab lokaalset difusiooni anisotroopsust ruumisuunas (värvkodeerimine)
 - Kasutatakse geomeetrilisi objekte (ellipsoide) difusiooni anisotroopsuse kuvamiseks
- Traktograafia, mis põhineb difusioon-tensori analüüsil

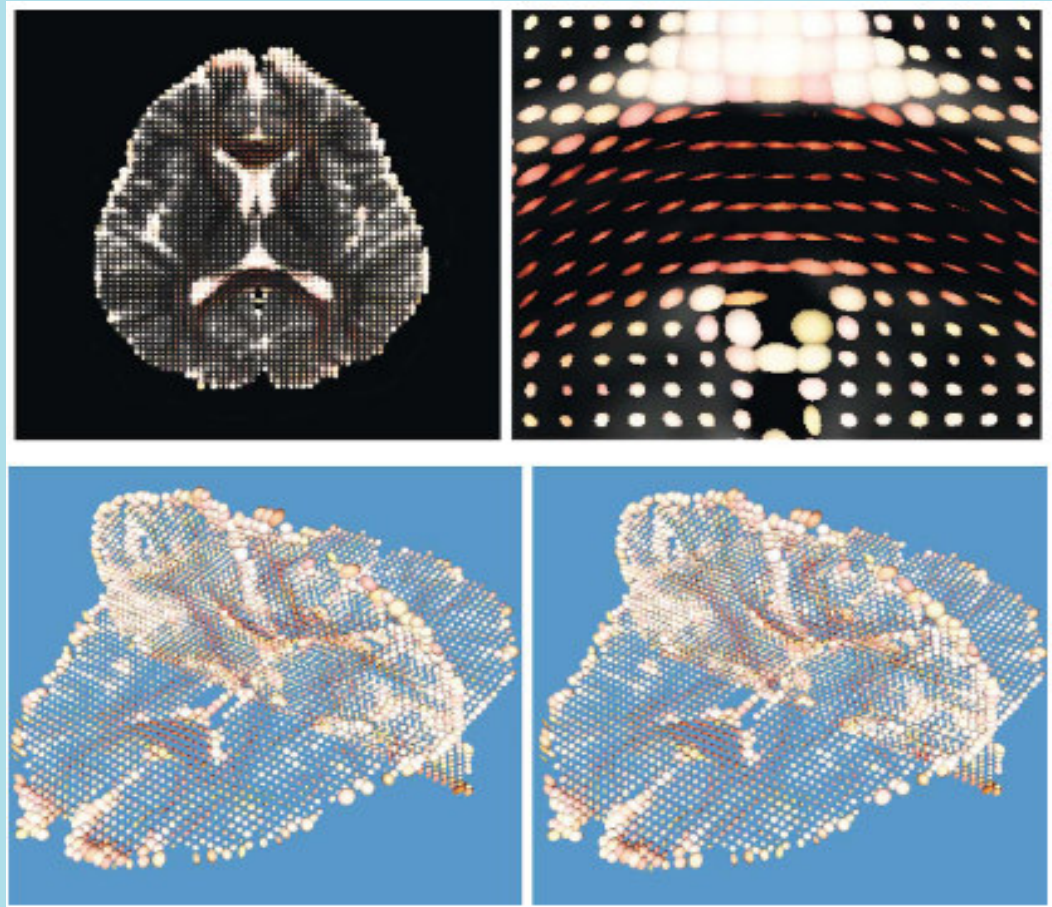
Difusioon-tensor andmete kuvamine: värvkodeerimine

- Vokseli väärtus määratakse tensori omavektorite ja omaväärtuste kaudu
- Vokseli väärtuseks loetakse kas FA-d (laialdaselt kasutatud), maksimaalse difusiooni koefitsiendi baasivektori suunda jne.



Difusioon-tensor andmete kuvamine: ellipsoidid

- Enamasti kasutatakse nooli, ellipsoide või muid kombinatsioone
- Eesmärk on kuvada difusiooni anisotroopsuse ruumiline jaotus ja näidata difusioon-tensori suurimale omaväärtusele vastavaid suundi



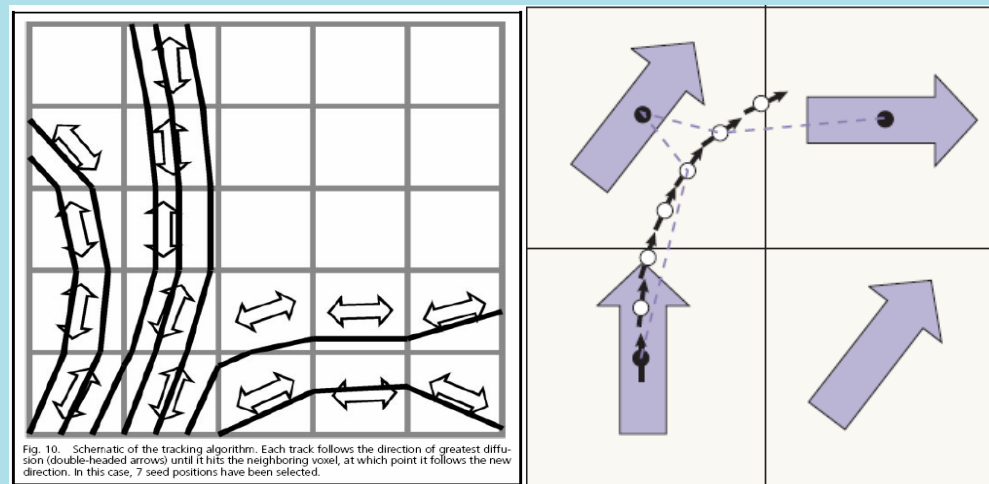
Yoshitaka Masutani, Shigeki Aoki, Osamu Abe, Naoto Hayashi, Kuni Otomo "MR diffusion tensor imaging: recent advance and new techniques for diffusion tensor visualization" European Journal of Radiology 46 (2003) 53/66

Traktograafia

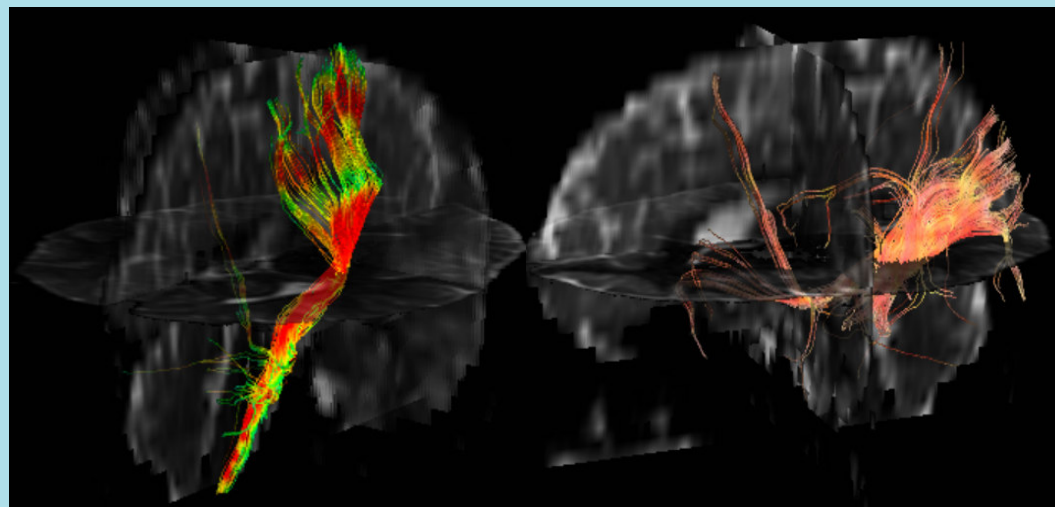
- Põhineb kiudude järgimisel difusioon-tensori maksimaalse omaväärtusele vastava omavektori suunal.
- Põhineb joone edasilevikumeetodil. Järgimisjoon algab alguspunktist (seed point).
- Algpunkt P_i ($i=1,2,\dots$). Trakti trajektoor määratakse iteratiivselt:

$$P_{i+1} = P_i + \delta d_i(D(P_i))$$

$$\vec{d}_i = \vec{e}_i(D(\vec{P}_i))$$



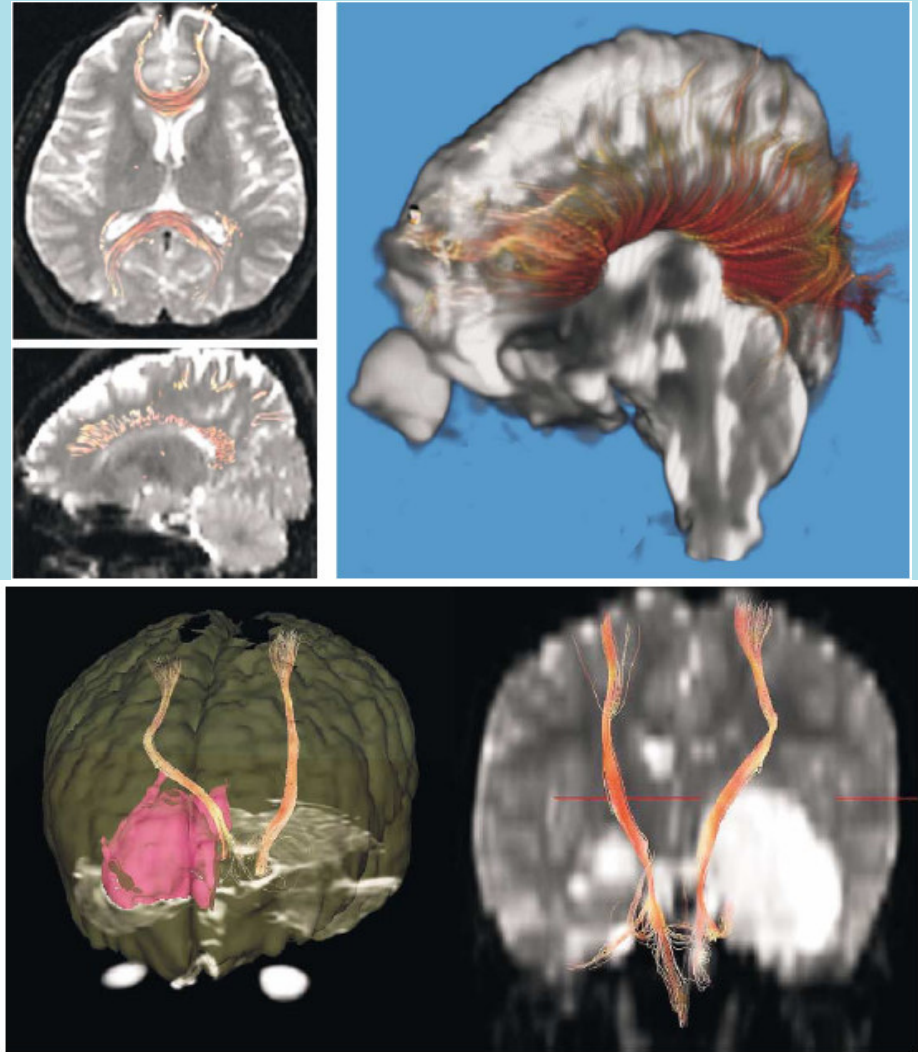
Denis Le Bihan "Looking into the functional architecture of the brain with diffusion MRI", Neuroscience, Volume 4, June 2003



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

Traktograafia

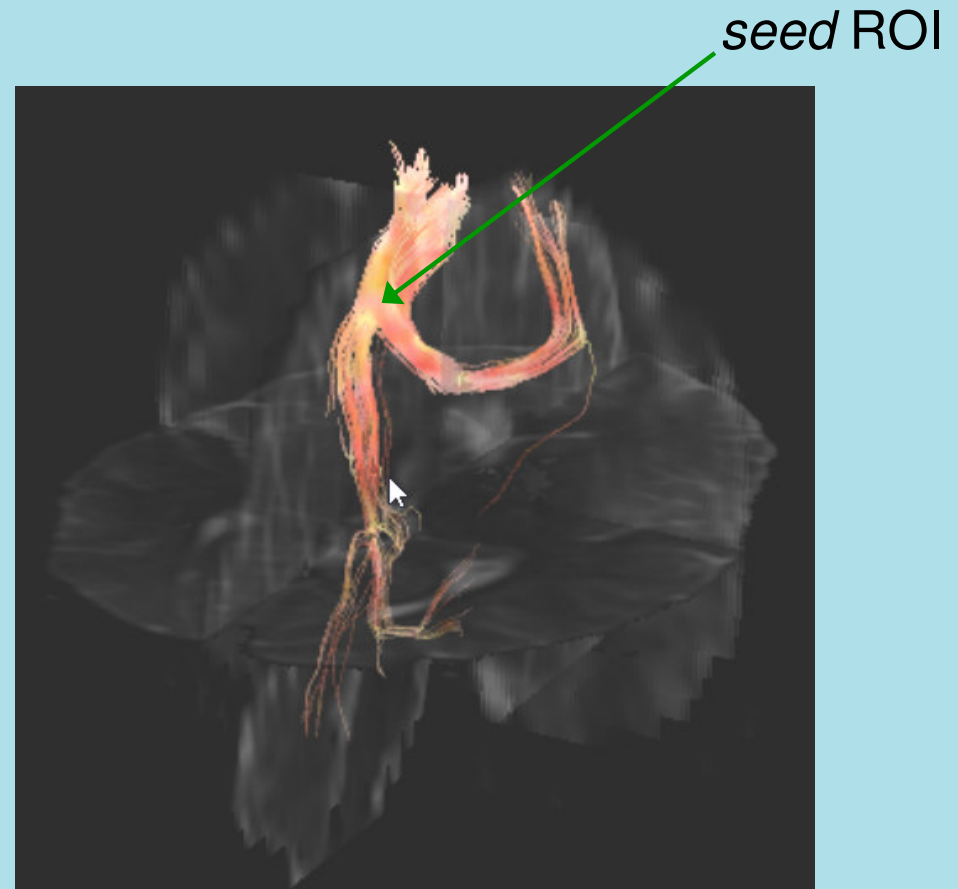
- Lihtsaim edasileviku meetod baseerub maksimaalse omaväärtusele vastava omavektori e_1 suunal



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

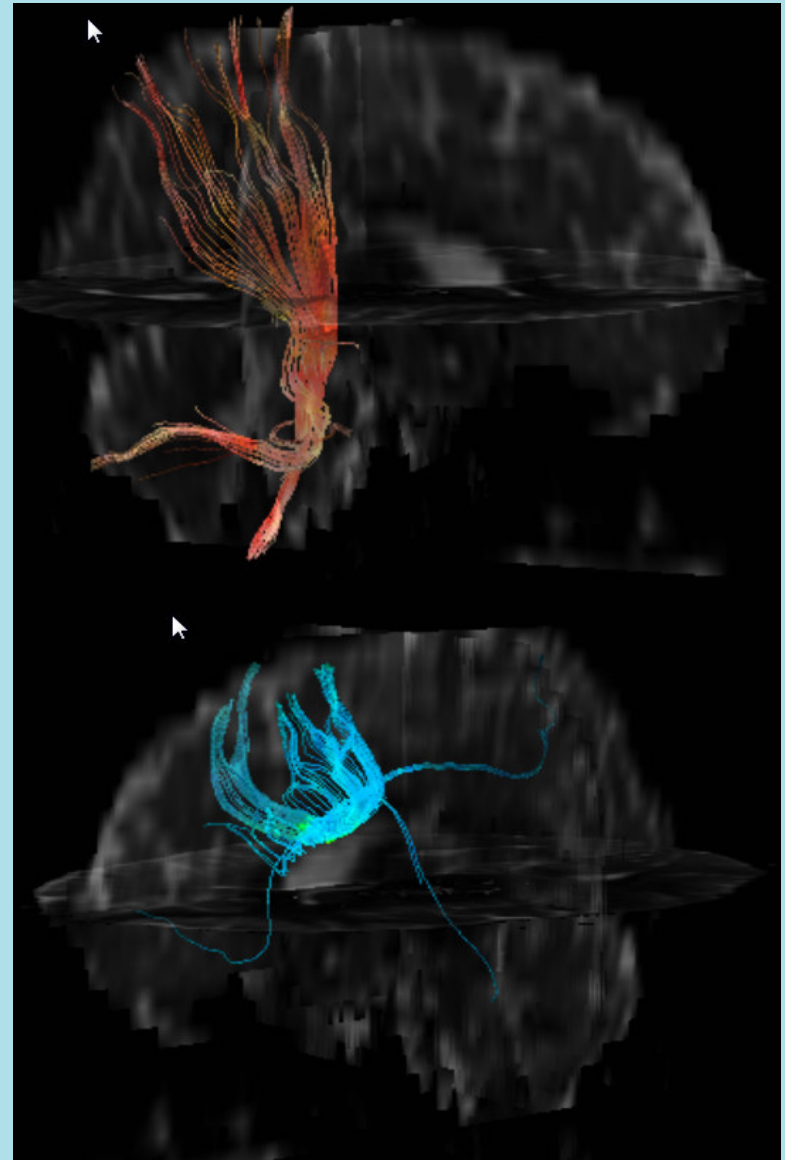
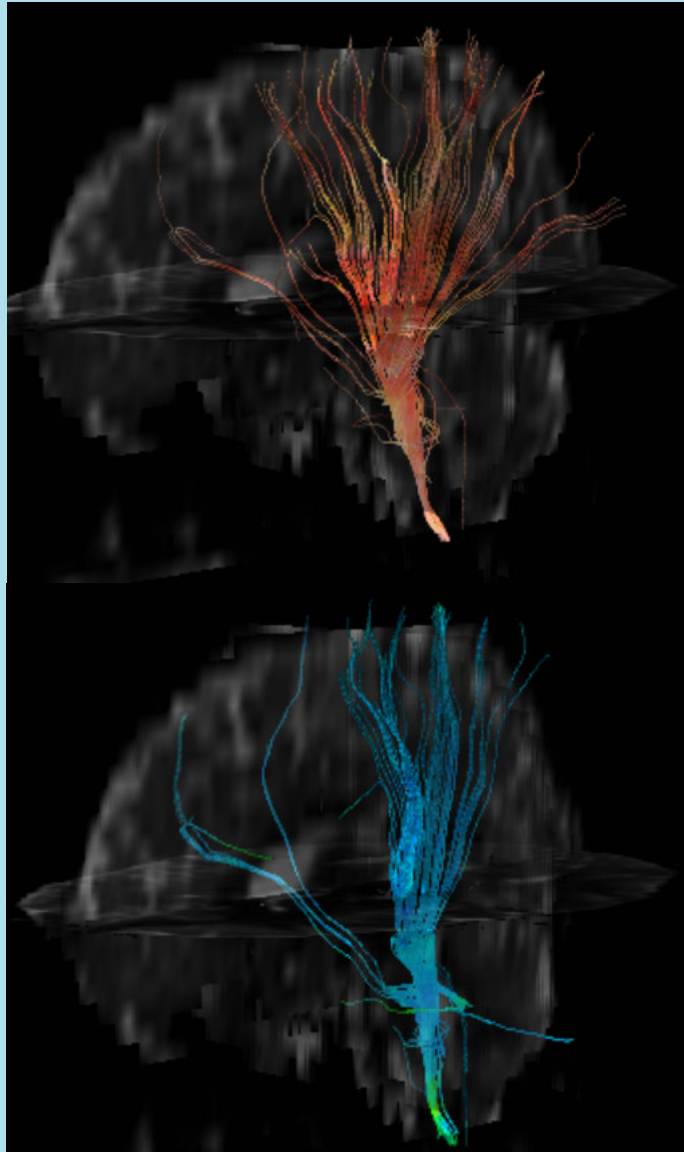
Traktograafia

- 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



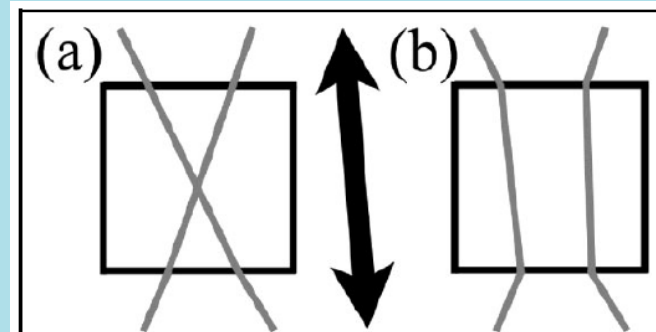
Traktograafia, GE HDx 1,5 T, märts 2007
Põhja-Eesti Regionaalhaigla

Traktograafia



Difusioon-tensor kuvamise piirangud

- Difusioon-tensor on matemaatiline mudel mis kirjeldab veemolekulide difusiooni ajus
- Teatud juhtudel on mudel puudulik:
 - Vokselis on rohkem kui üks kiukimp erinevas suunas
 - Raske eristada kimpude puudutamist (kissing) ja kimpude lõikumist (crossing)



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



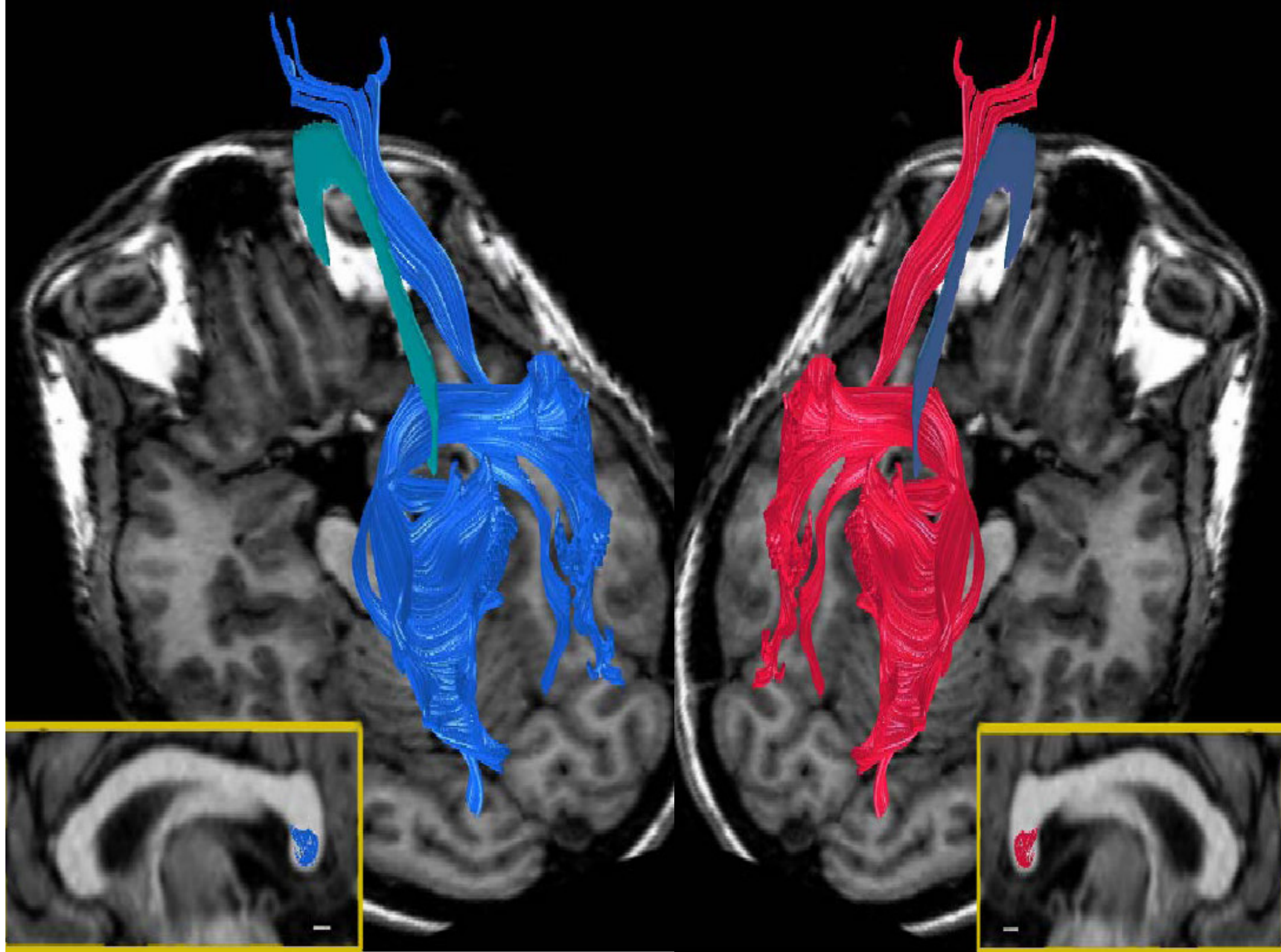
Yoshitaka Masutani, Shigeki Aoki, Osamu Abe, Naoto Hayashi, Kuni Otomo "MR diffusion tensor imaging: recent advance and new techniques for diffusion tensor visualization" European Journal of Radiology 46 (2003) 53/66

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 tensori elemendid
- Tensori elementidest tulenevalt arvutatakse erinevaid difusiooni iseloomustavad parameetrid
- Võimaldab teostada valgeaine närvikiudude traktograafiat

*DIFFUSION TENSOR
IMAGING - KASUTAMINE
KLIINILISES PRAKTIKAS*

*Aleksandr Šamarin
SAPERH*



KLIINILIS-EKSPERIMENTAALSED UURINGUD

- Psühhiaatria
- Neuroloogia / neurokirurgia
- Mujal

SKISOFREENIA

- uuritud *frontal-striatal-thalamic* süsteemi - prefrontaalkorteksi ja *capsula interna* eesmise osa vahelised juhteteed
- oluline pikkuse vahe tervetel inimestel ja skisofreenia haigetel
- potentsiaalne varajase diagnostika ja prognoosi hindamise meetod

LASTE AUTISM

- spetsiifilised valgeaine struktuuri muutused väikeaju piirkonnas -> motoorika häired -> käitumishäired ning kohanemisraskused
- kliiniline uuring lõpeb 2008 septembris

LASTE IQ-UURINGUD

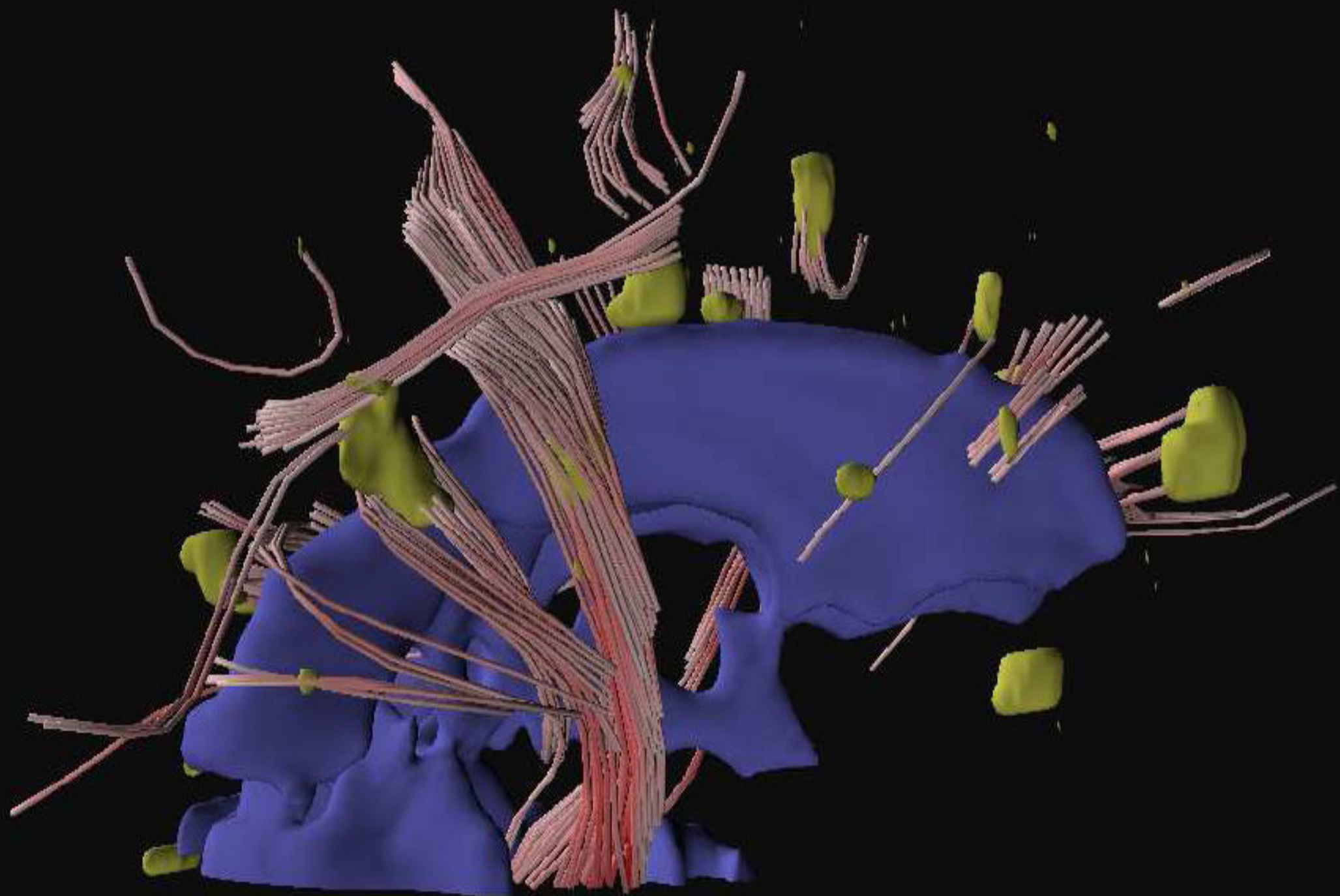
- medulloblastoomiga lapsed, kes on saanud kiiritusravi
- mikroskoopilised muutused valgeaines korreleeruvad halvema intellektuaalse arenguga

TRIGEMINUS NEURALGIA

- väliskompressioon -> närvikiudude deformatsioon ja dislokatsioon
- stereotaktiline kirurgia – *trigeminal subnucleus caudalis*
- *sclerosis multiplex*'i välistamine

SCLEROSIS MULTIPLEX JA AJU ISHEEMIA

- väga tundlik kollete avastamisel ja hindamisel -> erinevate ravimite hindamise / võrdlemise potentsiaalne meetod

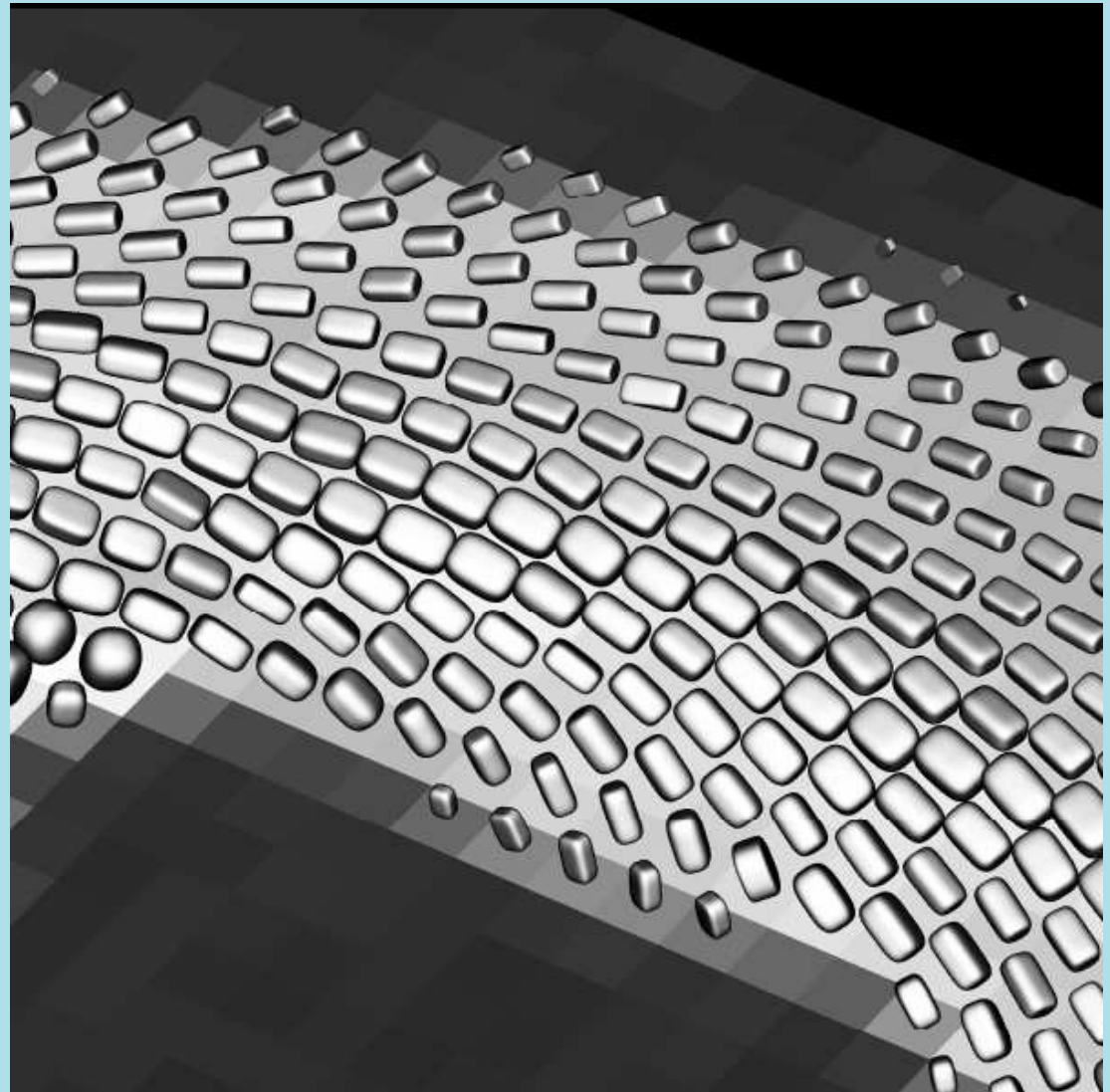


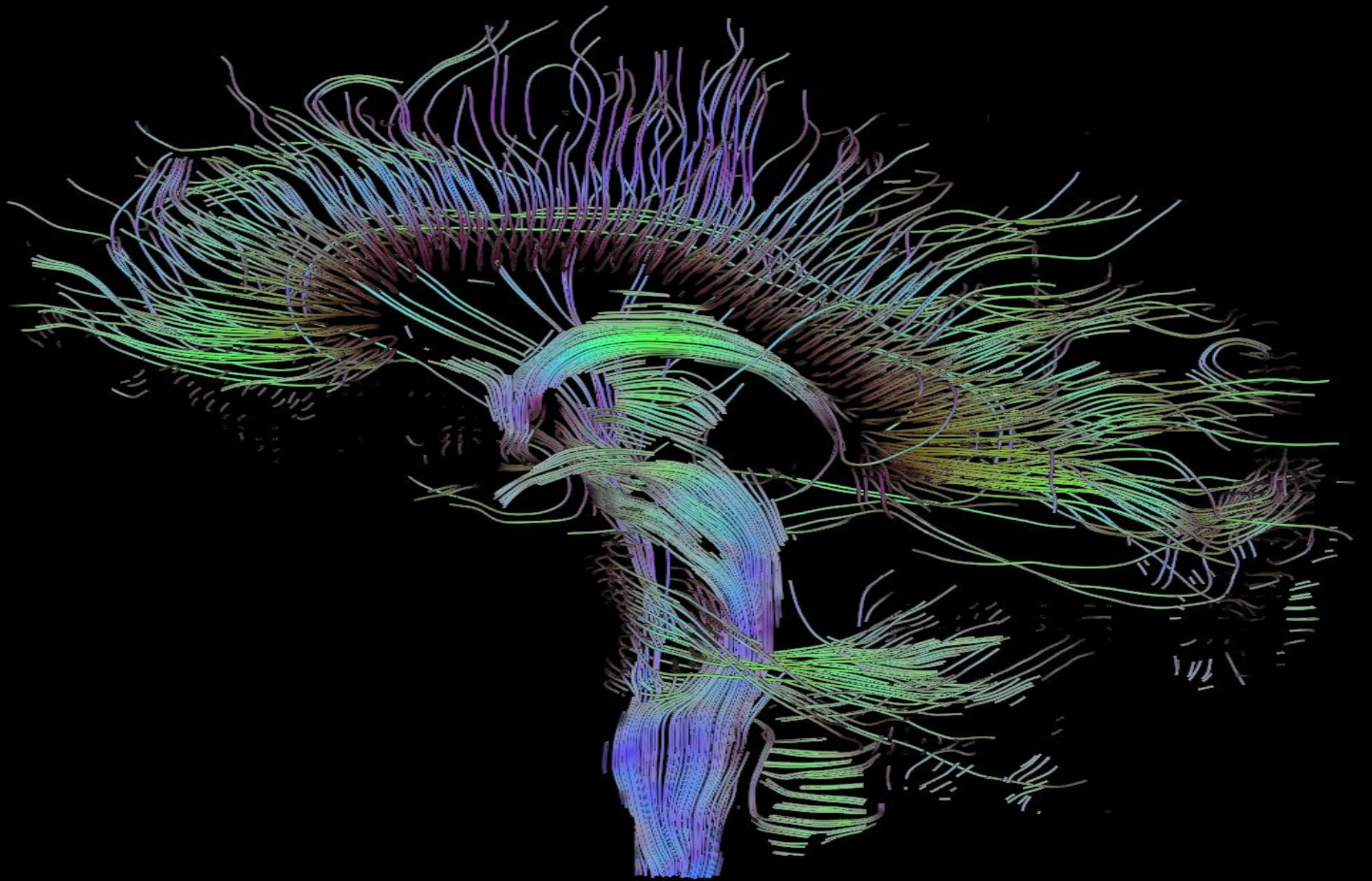
DEMENTSUSE UURINGUD

- HIV'i poolt põhjustatud
 - HIV- entsefalopaatia
- Vanusega seotud
 - korrelatsioon kognitiivsete võimetega

SÜDAME UURINGUD

- kontraktiilsuse hindame
- müotsüütide kiudede visualiseerumine





KASUTATUD KIRJANDUS

1. S.M.Kealey et al. “Determination of multiple sclerosis plaque size with diffusion-tensor MR imaging”; Radiology, 2005; 236
2. Le Bihan et al. “Diffusion tensor imaging”, Journal of MRI 13, 2001
3. A.F.M.DaSilva et al “A primer on DTI of anatomical substructures”; Neurosurgery Focus, vol15, July 2003
4. D.J.Mabbott et al. “DTI of white matter after cranial radiation in children for medulloblastoma; Correlation with IQ”; Pediatric Neuro-Oncology 2006 8(3)
5. DTI in Autism – clinical trail, University of Florida
6. M.S.Buchsbaum et al. “DTI of frontal lobe white matter tracts in schizophrenia”; Annals og General Psychiatry, vol.5, 2006
7. Vilanova et al. “Visualization and Application of DTI”
8. L-Minati “MR-spectroscopy, fMRI, and DTI in the aging brain”; Journal of Geriatric Psychiatry and Neurology, vol.20, 2007
9. B.Wandel “DTI and Tractography of Human Brain Pathways”,
10. www.medinews.com