

Дифузијски МР имиџинг

Подсећање: шта је дифузија?

- Кретање јона, молекула низ концентрациони градијент.
- Описује се Фиковим законима

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

J – флукс јона, молекула

D -дифузиони коефицијент
(mm^2s^{-1} ili cm^2s^{-1})

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$$

Самодифузија

- Иако је средњи померај молекула у целој запремини једнак нули, може се дефинисати не-нула вероватноћа налажења молекула на одређеном растојању од почетног.
- Средњи слободни пут (померај) који молекули пређу између два судара дат је релацијом (Ајнштајн)

$$r = \sqrt{2Dt}$$

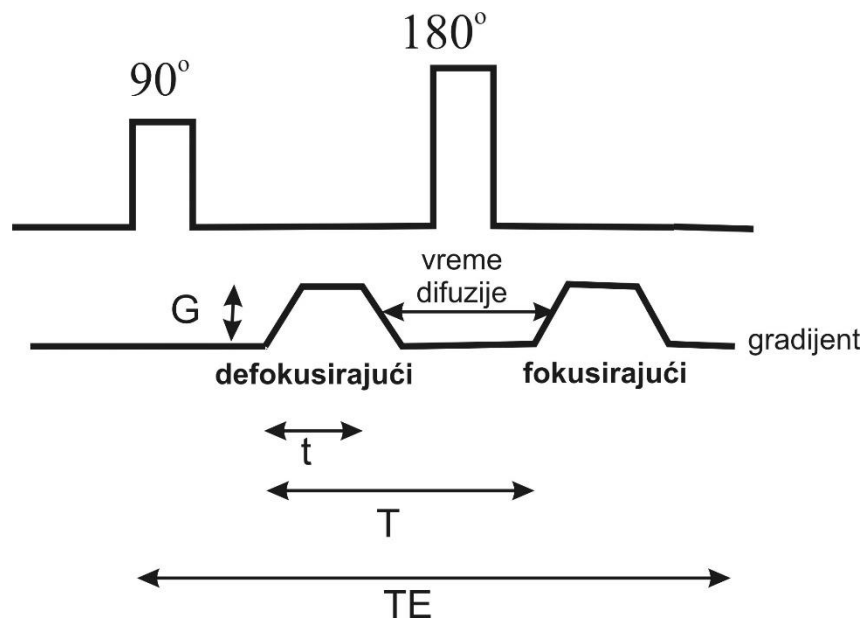
- Специјално дизајнирана Стејскал-Танерова секвенција омогућава да се сигнал на МР слици учини зависним од степена дифузије.

Дифузиони коефицијент D

- Дефинише величину (површину) дифузионе сфере у јединици времена
- Јединице за D су mm^2s^{-1} или cm^2s^{-1}
- Дифузиони коефицијент расте са повећањем температуре, а смањује се са повећањем коефицијента вискозности средине
- У биолошким системима дифузиони коефицијент зависи и од правца који се посматра
- D за чисту воду је $2,2 \cdot 10^{-3} \text{ mm}^2\text{s}^{-1}$
- D воде у ткивима се креће од 0,4- $2,2 \cdot 10^{-3} \text{ mm}^2\text{s}^{-1}$

Мерење дифузије помоћу НМР (дифузијски НМР)

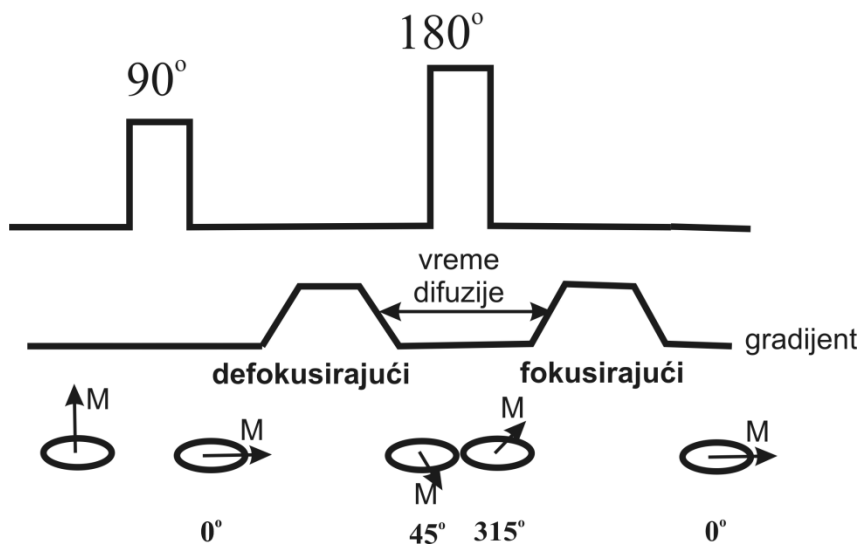
Stejskal & Tanner 1963 – SE секвенција за праћење дифузије



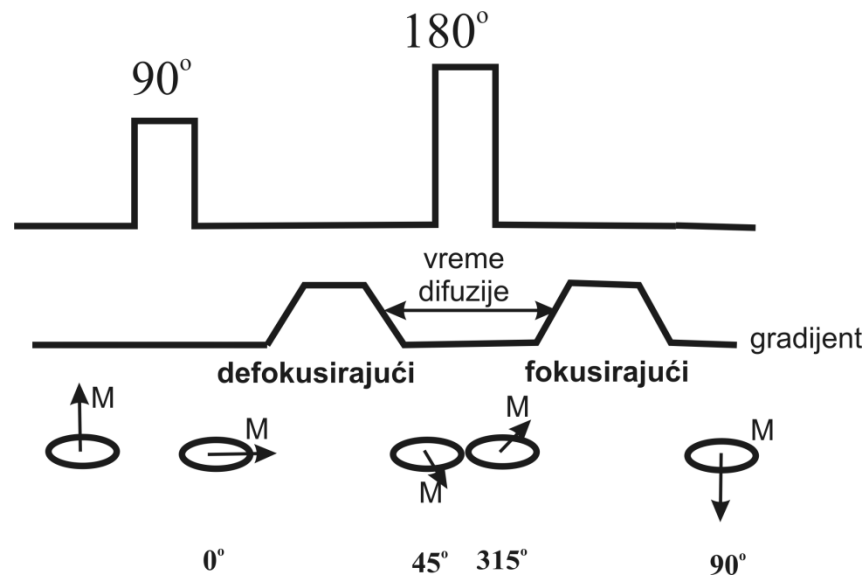
- Спинови који се у периоду између дејства два градијентна пулса крећу у времену TE, за разлику од стационарних, не бивају фокусирани. Ово доводи до смањења сигнала

$$S(TE) \propto e^{-\frac{TE}{T_2}} e^{-bD}$$

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



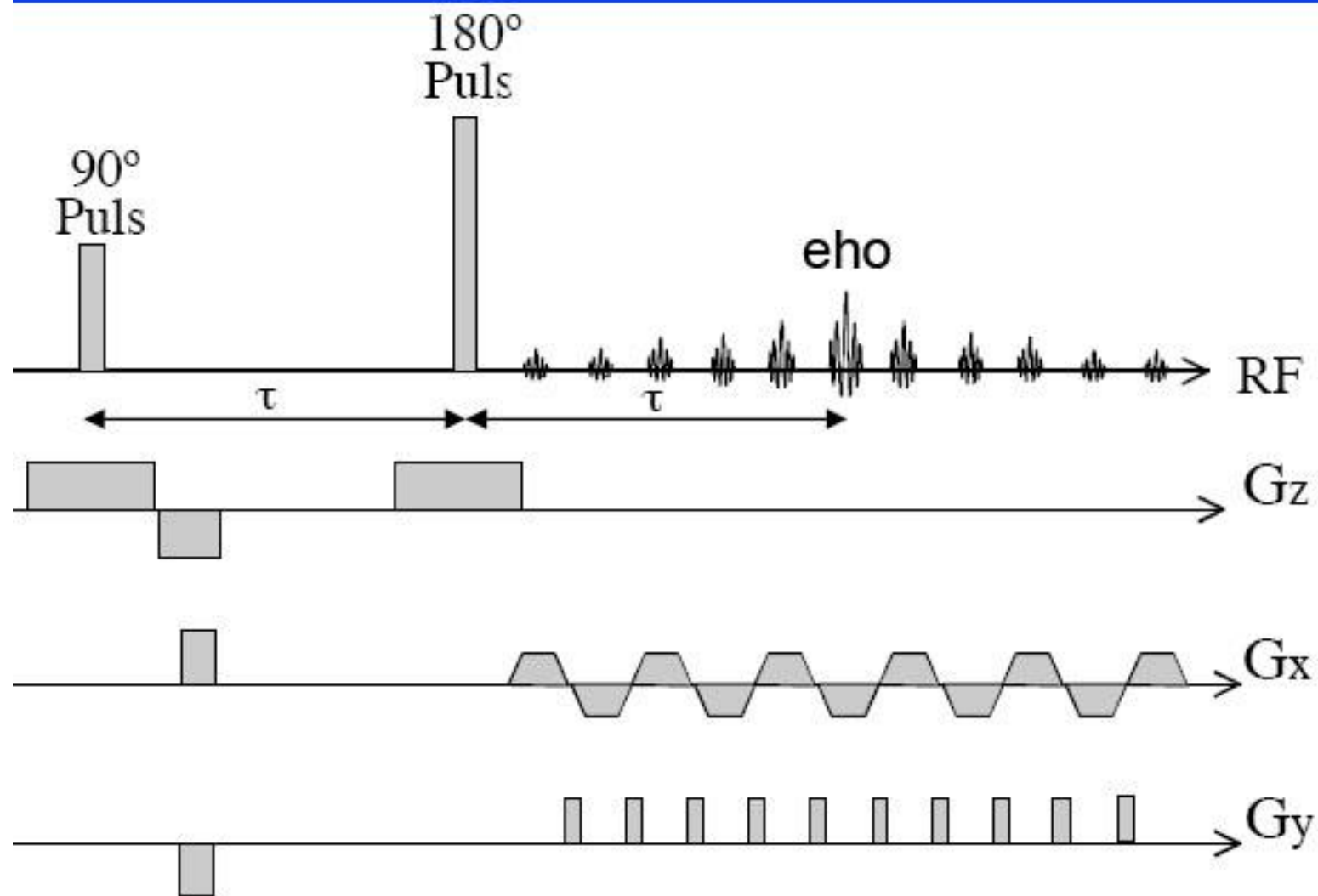
Понашање стационарних протона



**Понашање протона који се крећу
у току дифузионог мерења**

Стандарна секвенција за мерење дифузије помоћу МРИ

DWI EPI секвенција

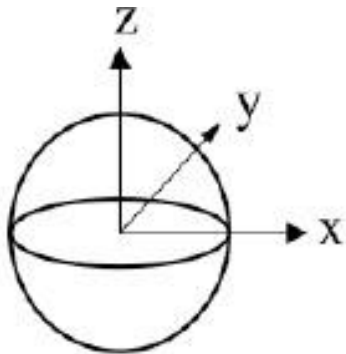


Дифузија воде у ткивима

Изотропна неометена
дифузија



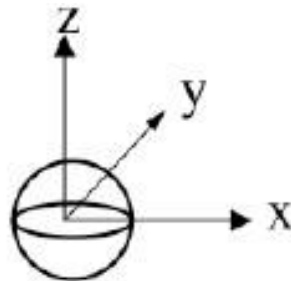
слободна вода



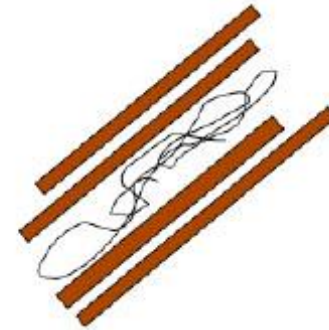
Изотропна ометена дифузија



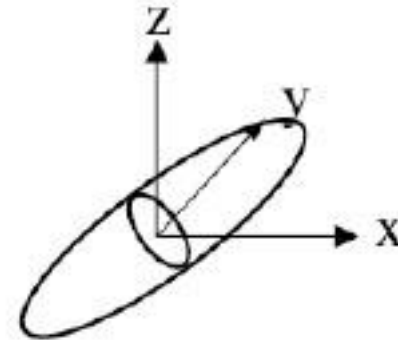
Насумично
постављене
баријере



Анизотропна ограничена
дифузија

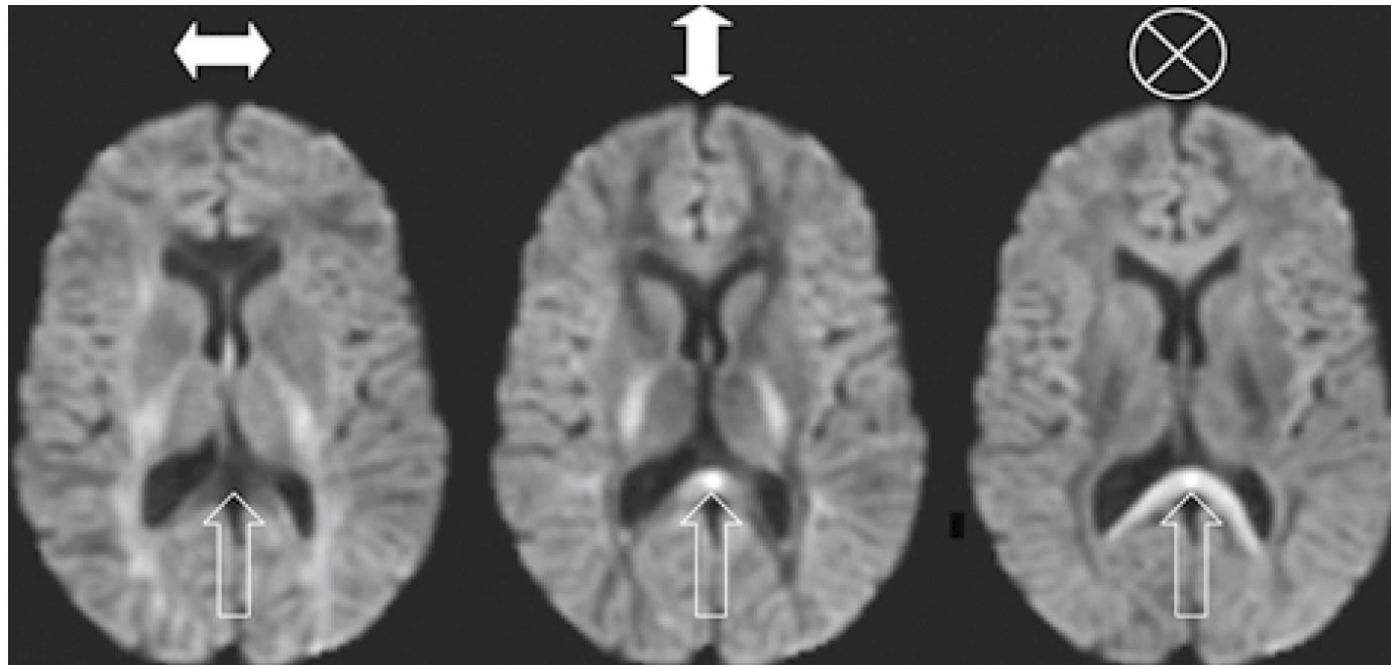


аксонско влакно

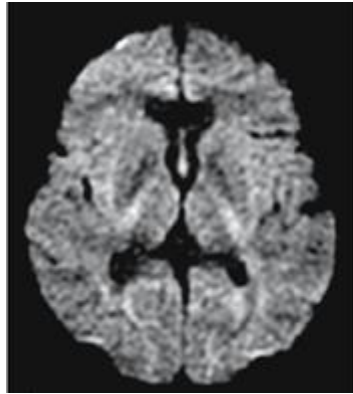


Анизотропија дифузије у ткиву

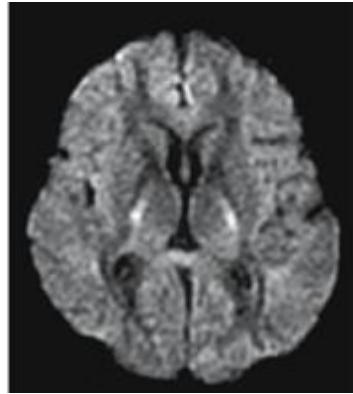
- У класичном DWI анизотропија је непожељна



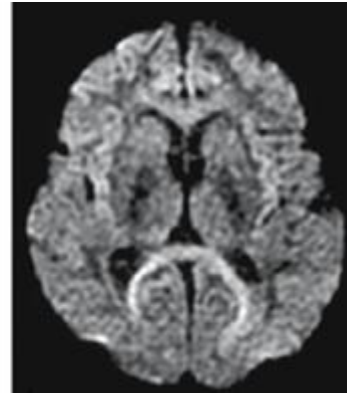
Анизотропија дифузије у живим ткивима



D_x



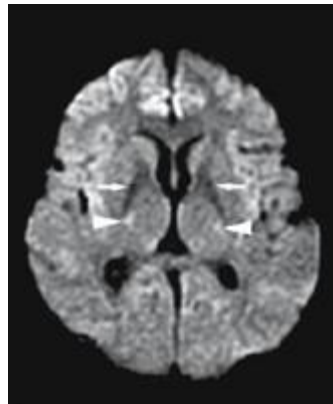
D_y



D_z

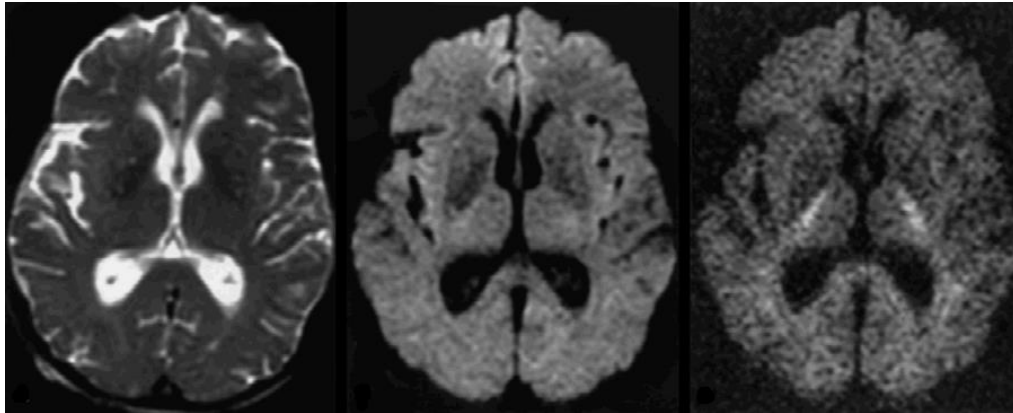
$$D = \sqrt[3]{D_x D_y D_z}$$

$$S(b) = N_D e^{-\frac{TE}{T_2}} e^{-bD}$$



DWI slika

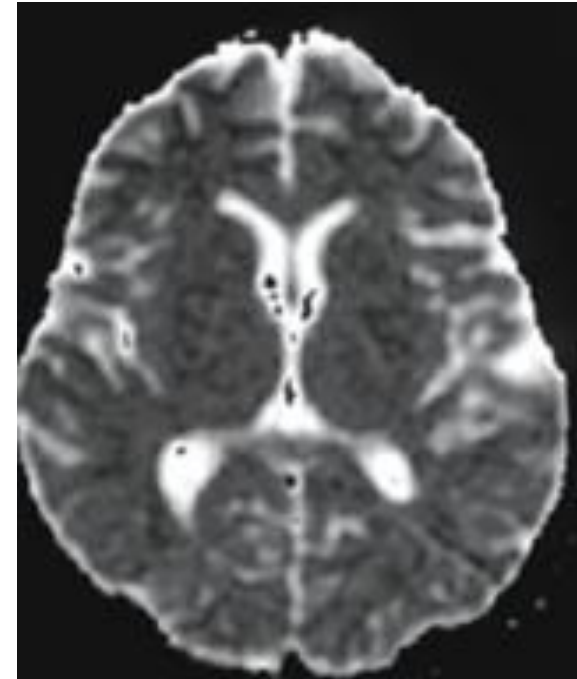
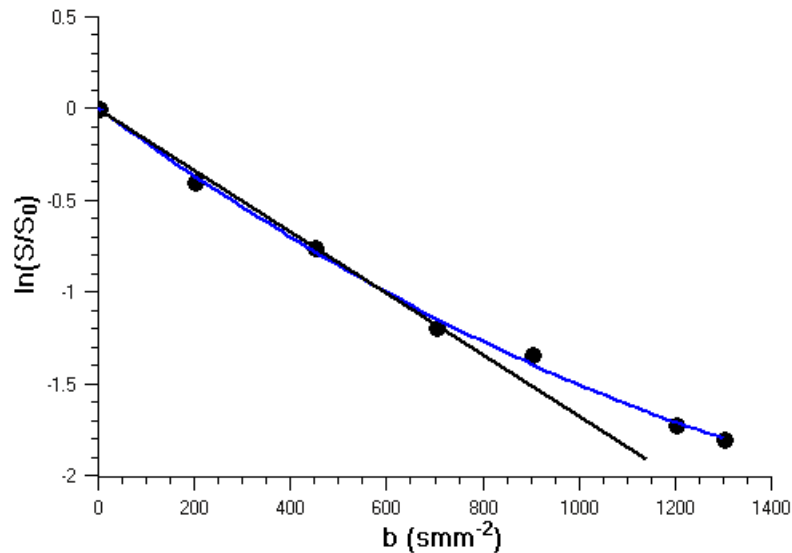
Привидни дифузиони коефицијент ADC



$b=0$

$b=1000$

$b=3000$



$$S(b_0) = N_D e^{-\frac{TE}{T_2}} e^{-b_0 ADC}$$

$$S(b_1) = N_D e^{-\frac{TE}{T_2}} e^{-b_1 ADC}$$

$$\frac{S(b_1)}{S(b_0)} = -b_1 ADC + b_0 ADC$$

$$b_0 = 0 \Rightarrow$$

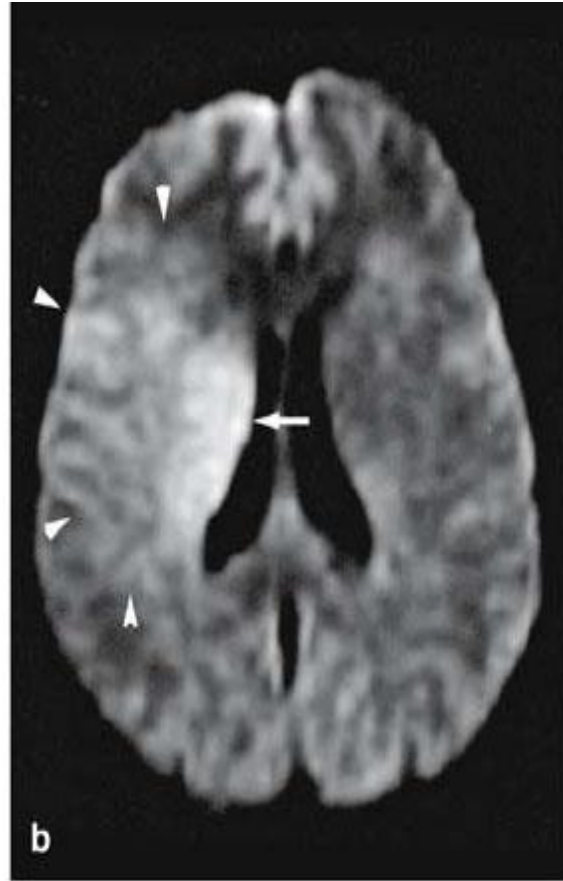
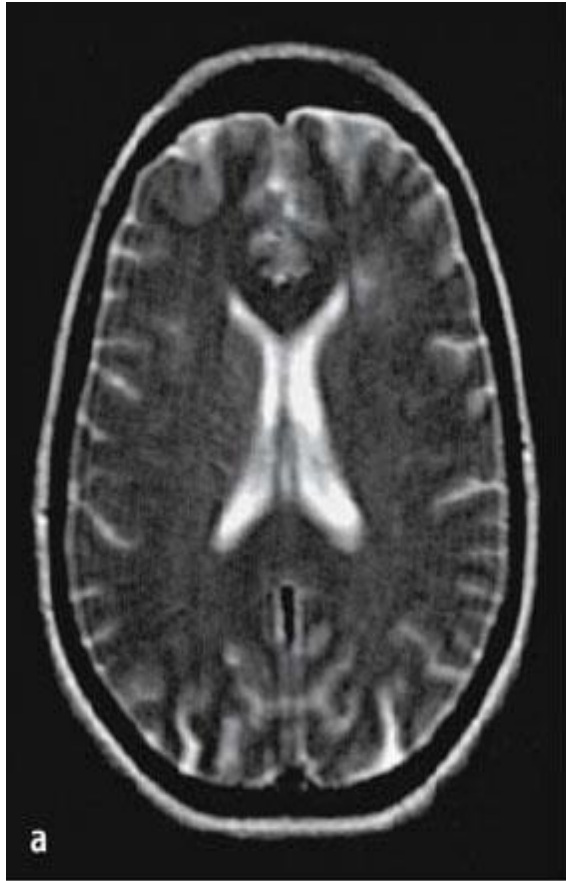
$$\frac{S(b_1)}{S(b_0)} = -b_1 ADC$$

$$ADC = -\frac{1}{b_1} \ln \frac{S(b_1)}{S(b_0)}$$

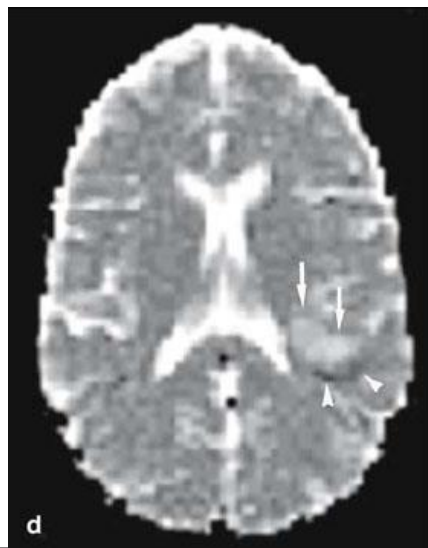
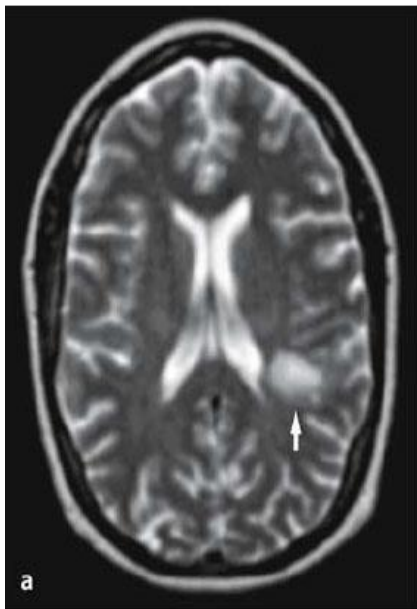
Дијагностика можданих тумора



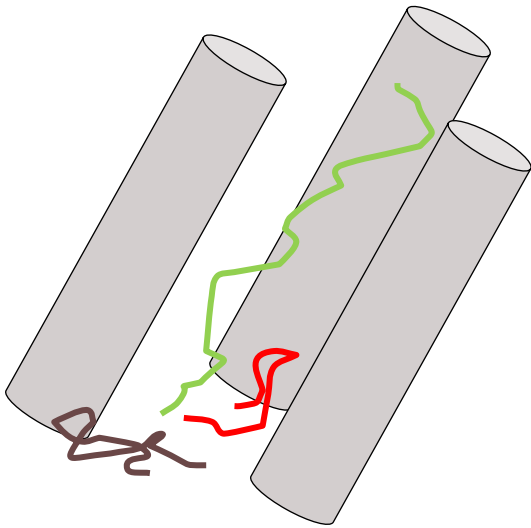
Мождани хиперакутни инфаркт



Мультипла склероза



Узроци анизотропије у мозгу



- Присуство мијелинског омотача
- Микрофиламенти и микротубуле
- Аксонске мембране
- Микроциркулација

Анизотропија дифузије: дифузиони тензор

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} D_{xx} & D_{xy} & D_{xz} \\ D_{yx} & D_{yy} & D_{yz} \\ D_{zx} & D_{zy} & D_{zz} \end{bmatrix}$$

• Тензор је симетричан: $\mathbf{D} = \begin{bmatrix} D_{xx} & D_{xy} & D_{xz} \\ D_{xy} & D_{yy} & D_{yz} \\ D_{xz} & D_{yz} & D_{zz} \end{bmatrix}$

- Решавање проблема својствене вредности, односно налажење преференцијалних праваца дифузије:

$$\mathbf{D} = \Lambda \mathcal{J} \quad \begin{bmatrix} D_{xx} & D_{xy} & D_{xz} \\ D_{xy} & D_{yy} & D_{yz} \\ D_{xz} & D_{yz} & D_{zz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{i} \\ \vec{j} \\ \vec{k} \end{bmatrix}$$

Добијање тензора анизотропије

- Треба наћи везу између интензитета дифузијских имица и компоненти дифузионог тензора за дату амплитуду и трајање дифузионих градијената (вредност \mathbf{b}).

- За класични DWI:

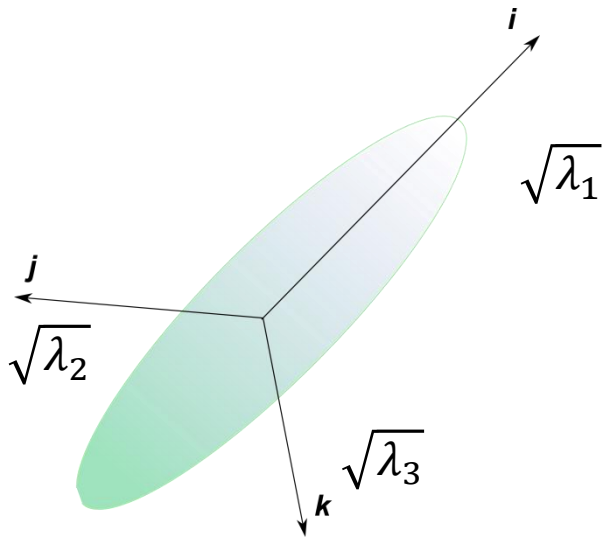
$$\frac{I_2}{I_1} = e^{-(b_2 - b_1)ADC}$$

- За DTI:

$$\frac{I_2}{I_1} = \exp \left(\begin{array}{ccc} -b_{xx}D_{xx} & -b_{yy}D_{yy} & -b_{zz}D_{zz} \\ -2b_{xy}D_{xy} & -2b_{xz}D_{xz} & -2b_{yz}D_{yz} \end{array} \right)$$

- Да би се добиле вредности \mathbf{D} треба снимити дифузијске имице за **минимум шест оријентација дифузионог градијента** – шест једначина-шест непознатих + имиц за $\mathbf{b}=0$
- Уобичајено је да се аквизиција врши за више од шест праваца да би се редуковао шум

Дифузиони тензор → Дифузиони елипсоид



$$\Lambda = \begin{bmatrix} 2 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 2 \end{bmatrix}$$



$$\Lambda = \begin{bmatrix} 4 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 2 \end{bmatrix}$$

$$C_s = \frac{\lambda_3}{\langle \lambda \rangle}$$

- Сферичност

$$C_l = \frac{\lambda_1 - \lambda_3}{3\langle \lambda \rangle}$$

- Линеарност

$$C_p = \frac{2(\lambda_2 - \lambda_3)}{3\langle \lambda \rangle}$$

- Планарност



$$\Lambda = \begin{bmatrix} 8 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 2 \end{bmatrix}$$

$$\langle \lambda \rangle = \frac{1}{3}(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3)$$

Скаларни параметри

$$\bar{D} = \frac{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3}{3}$$

Средња дифузивност

$$FA = \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{\sqrt{(\lambda_1 - \langle \lambda \rangle)^2 + (\lambda_2 - \langle \lambda \rangle)^2 + (\lambda_3 - \langle \lambda \rangle)^2}}{\sqrt{\lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2}}$$

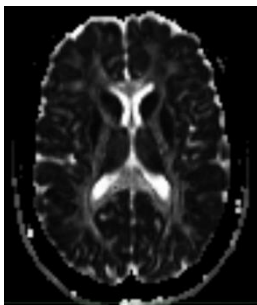
Фракциона анизотропија

$$RA = \frac{\sqrt{\frac{1}{3} \left[(\lambda_1 - \langle \lambda \rangle)^2 + (\lambda_2 - \langle \lambda \rangle)^2 + (\lambda_3 - \langle \lambda \rangle)^2 \right]}}{\langle \lambda \rangle}$$

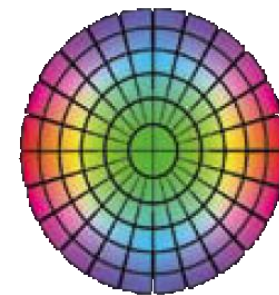
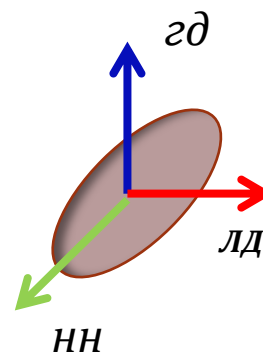
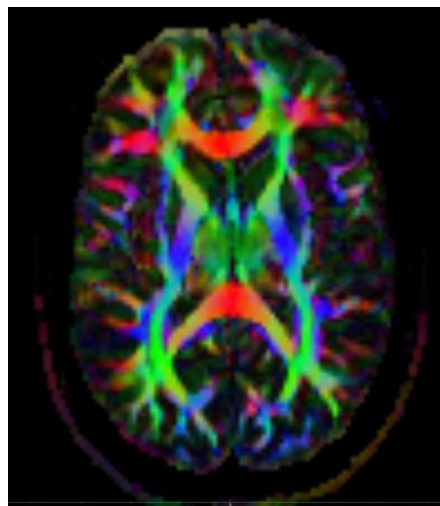
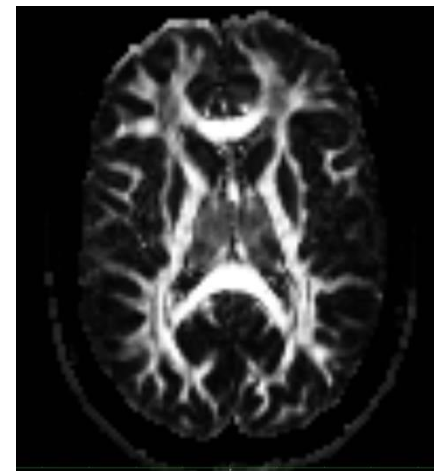
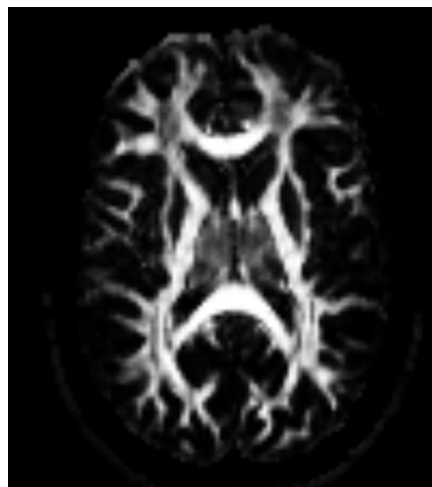
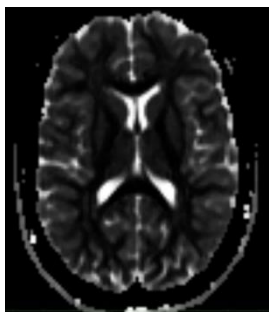
Релативна анизотропија

λ_1

λ_2



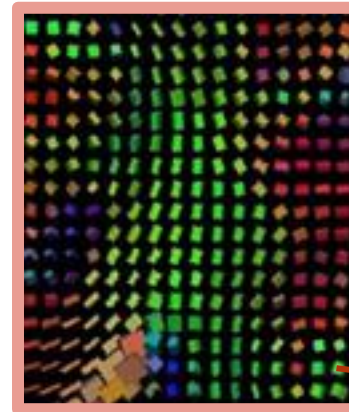
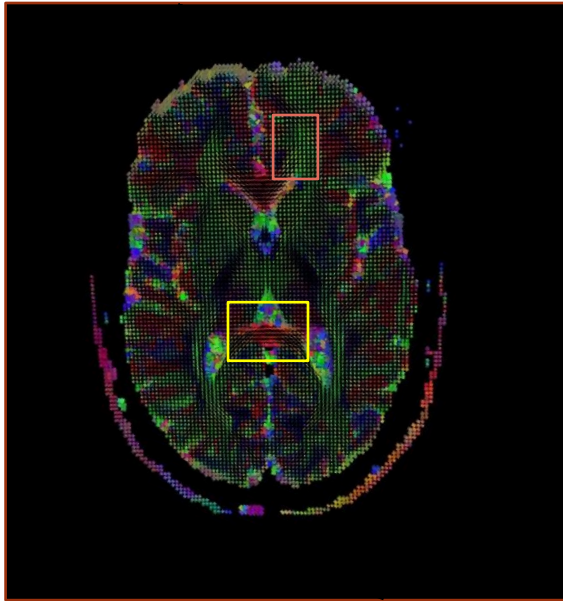
λ_3



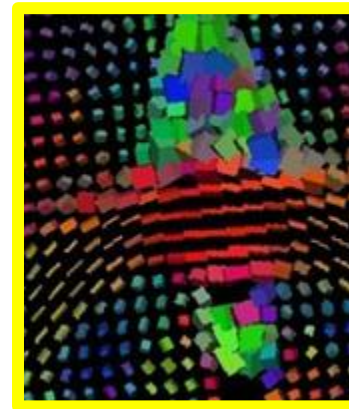
Средње FA вредности у неким структурама мозга

Структура	FA
Кортикална сива маса	0,2
Дубока сива маса	0,2-0,4
Бела маса	0,45
<i>Corpus callosum</i>	0,8

Тензорски имиџ

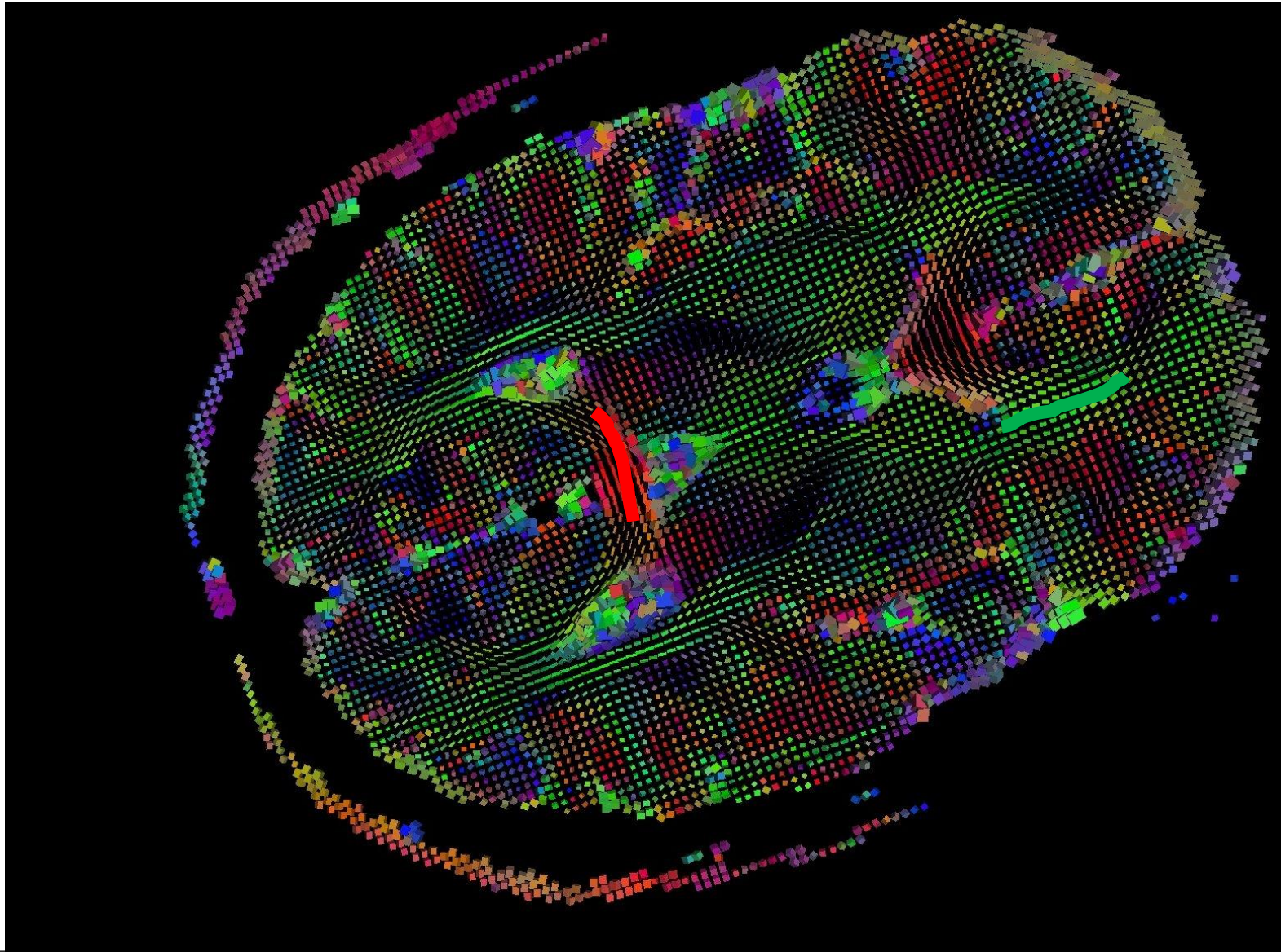


глиф



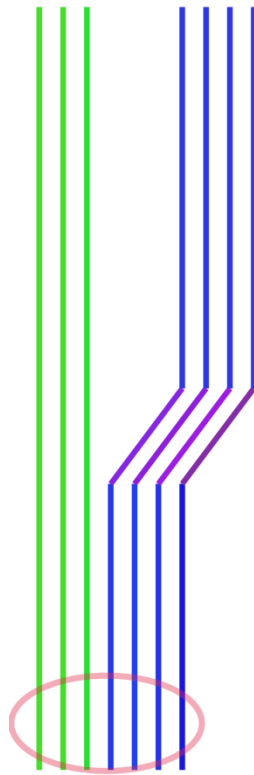
Визуелизација нервних трактова

Трактографија

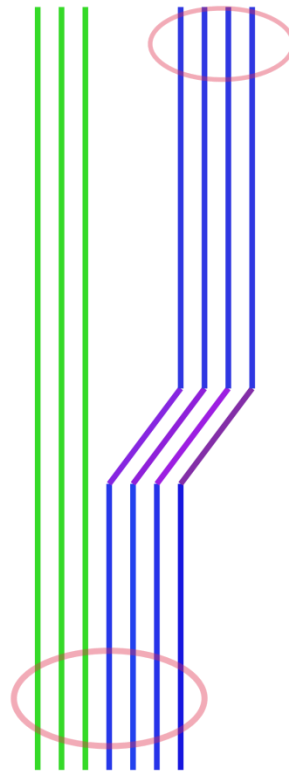


Трактографски алгоритми

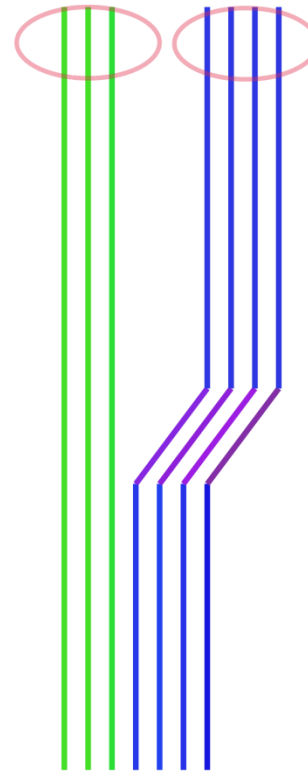
- Детерминистичка трактографија
 - Дефинисање иницијалне тачке/тачака за претрагу трактова (seed points)
 - Дефинисање критеријума за прекид претраге ($FA < 0,2$ и граничног угла)
 - Трактографски алгоритам се састоји од поређења оријентације главног вектора тензора у суседним вокселима.
 - Модификације: укључивање података о анатомским локализацијама трактова



ROI



AND

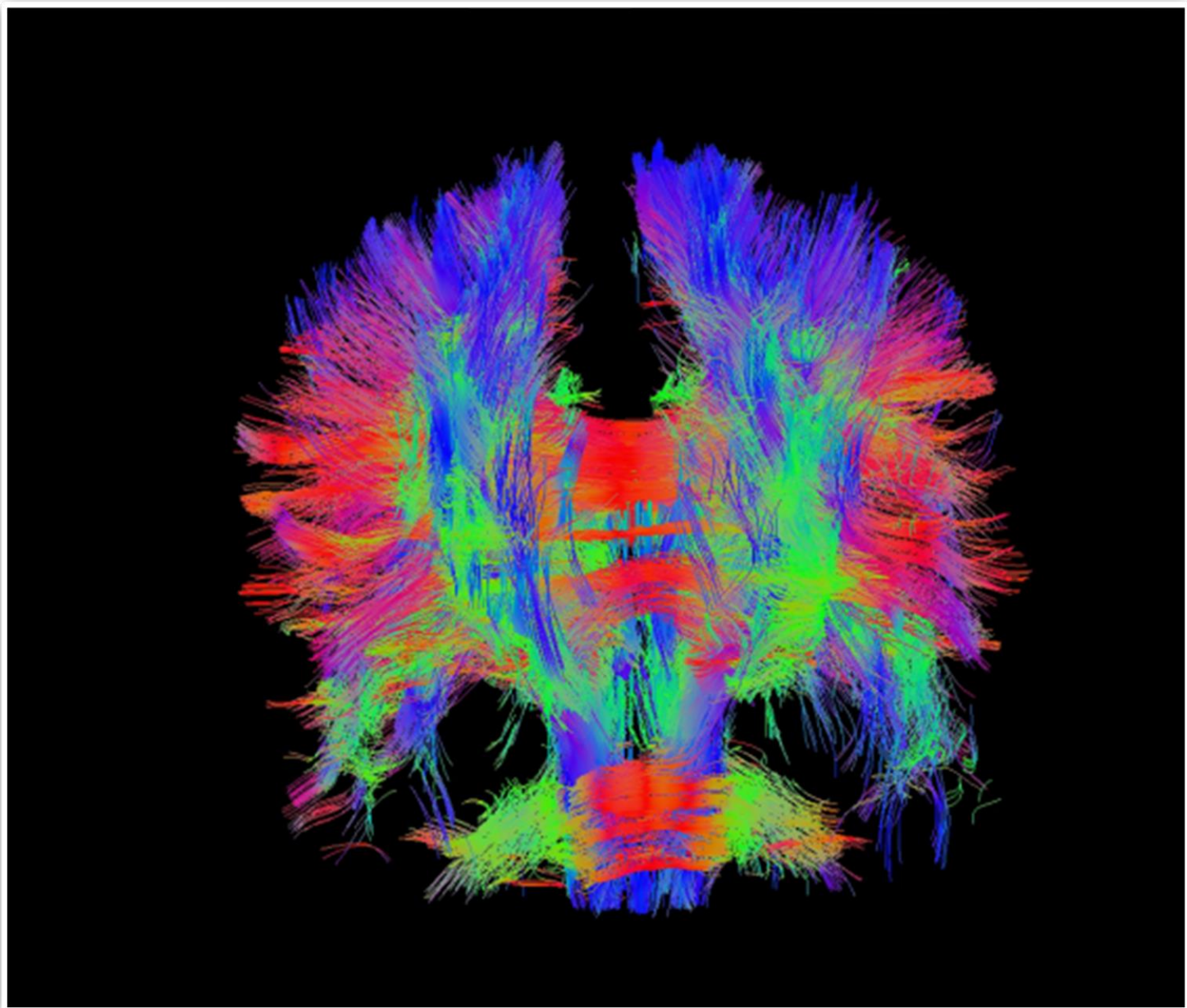


OR

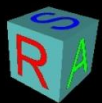
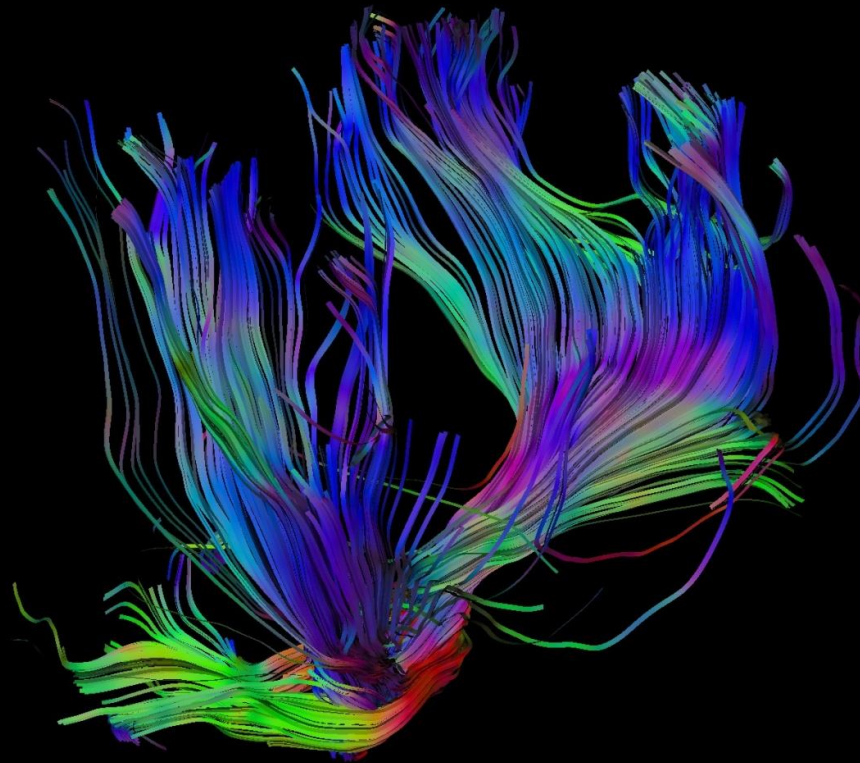
- Пробабилистичка трактографија
 - Као полазну основу користи детерминистичку трактографију

- Разлика је што се из полазног региона на основу функције густине вероватноће насумично генерише више могућих оријентација тракта. Као највероватнија се бира она која има највећу вредност густине вероватноће

Трактографија целог мозга

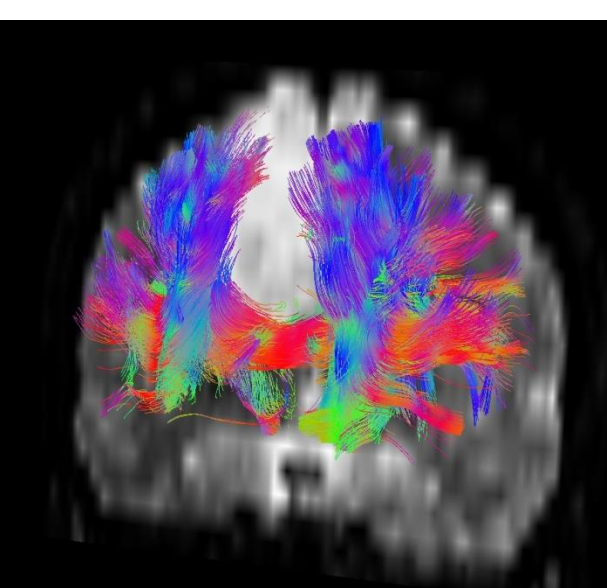
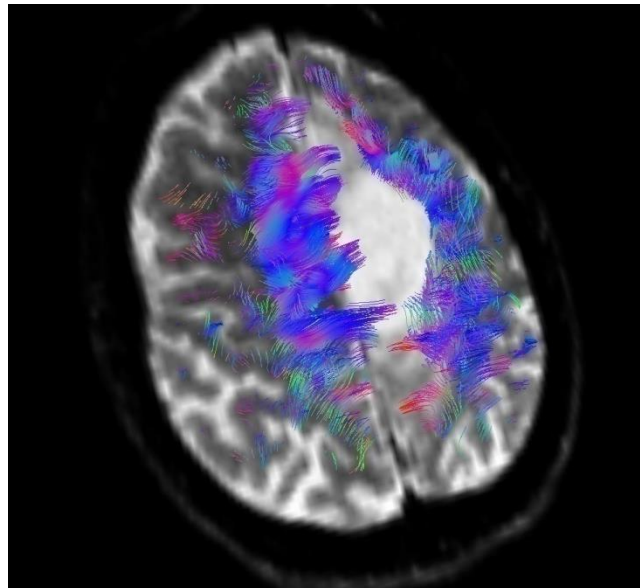
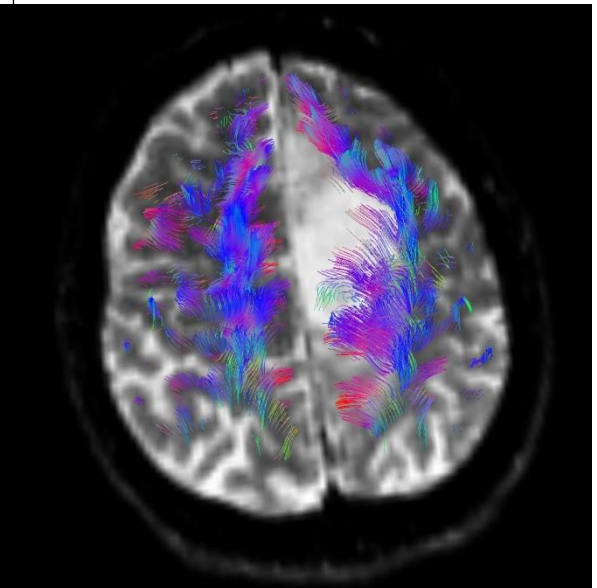
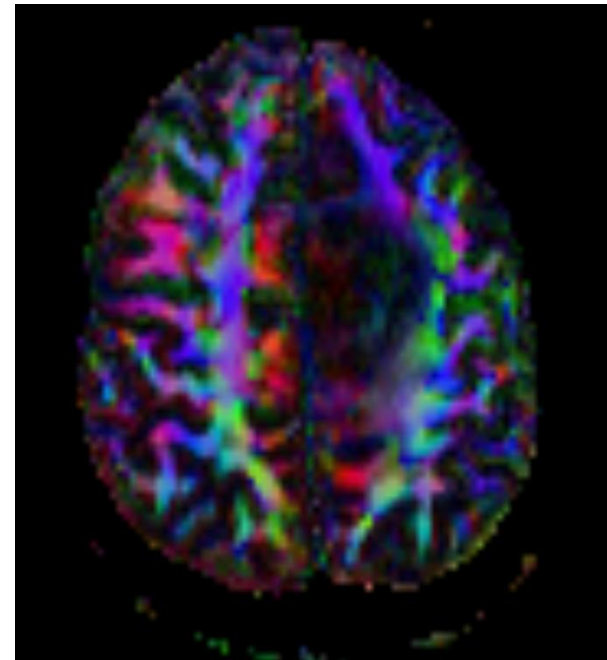
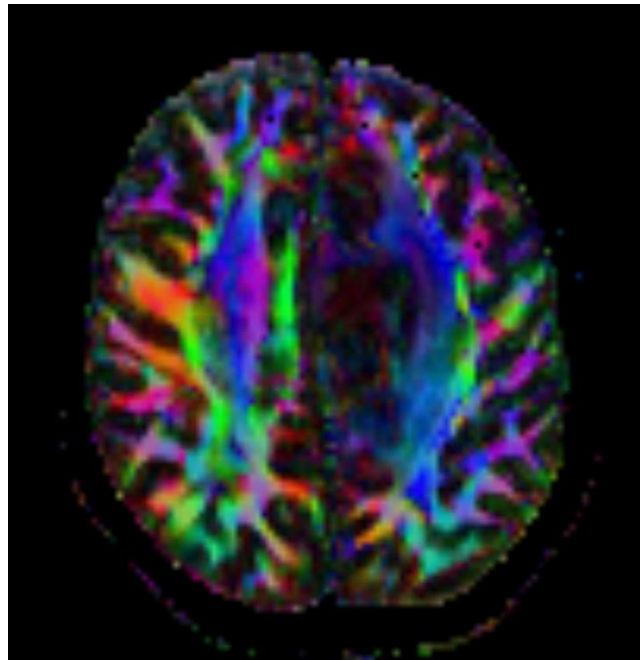
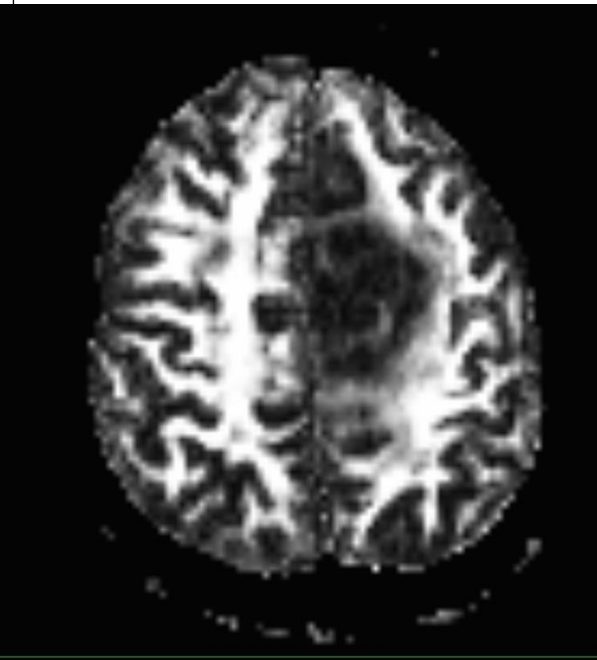


Трактографија кортикоспиналног тракта

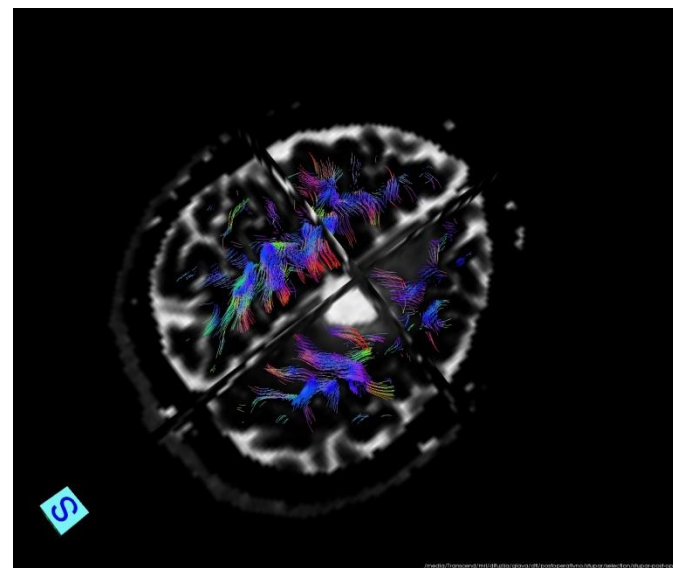
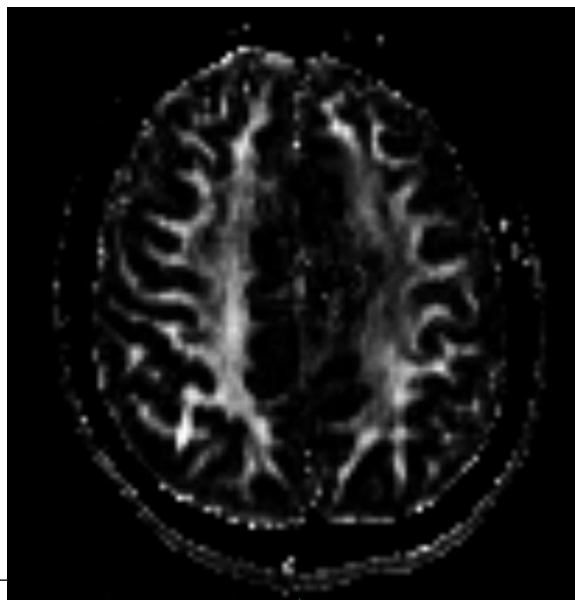
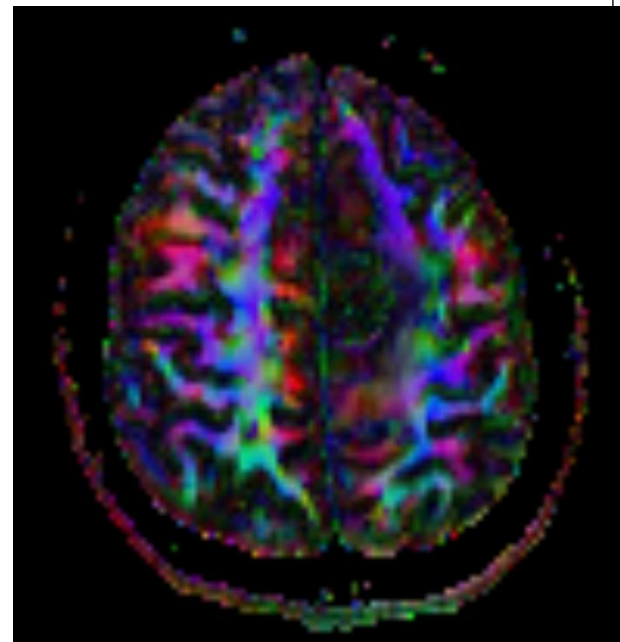
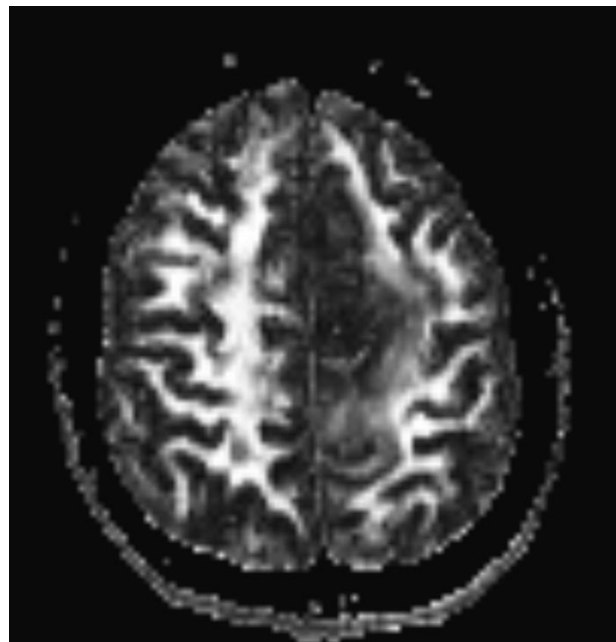


Примене DTI у дијагностици

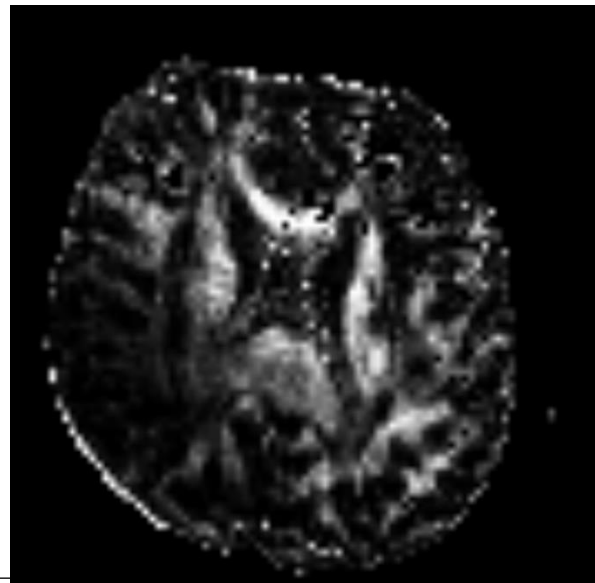
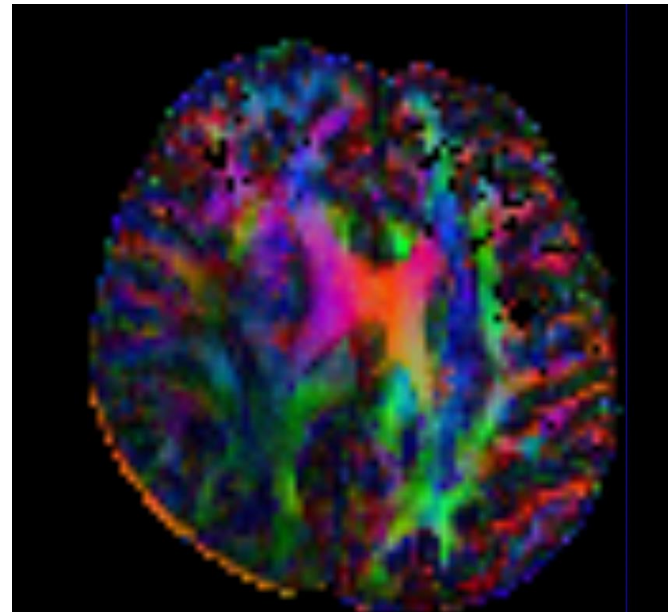
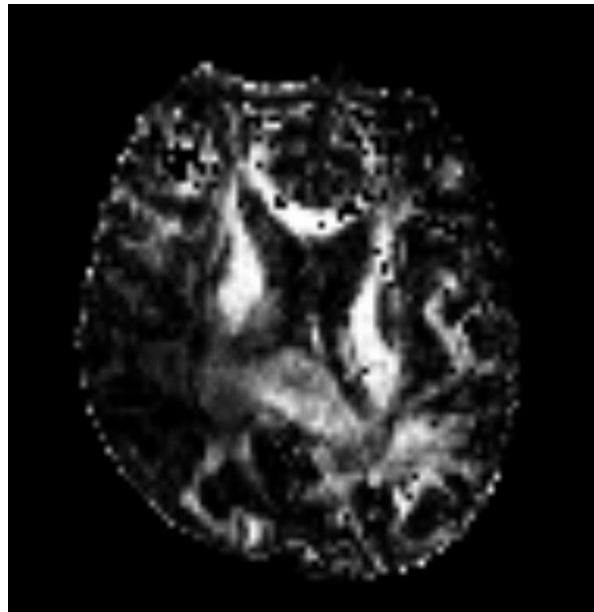
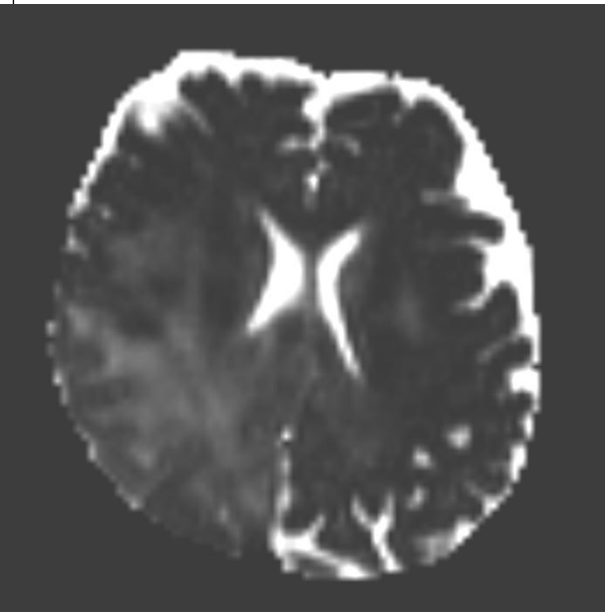
Дифузни атроцитом(преоперативно)



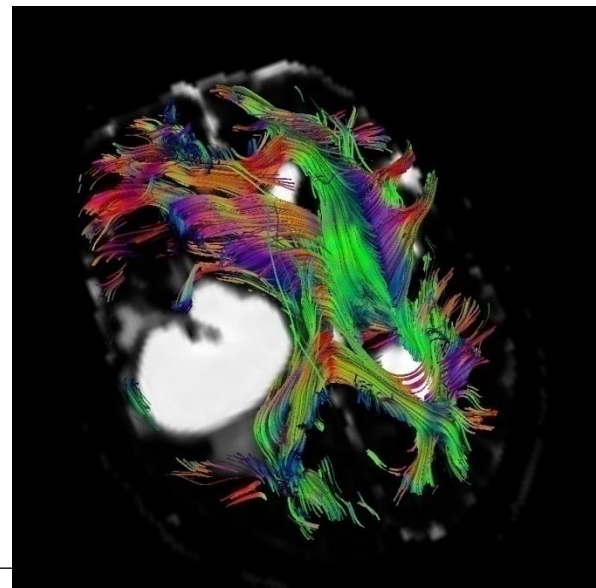
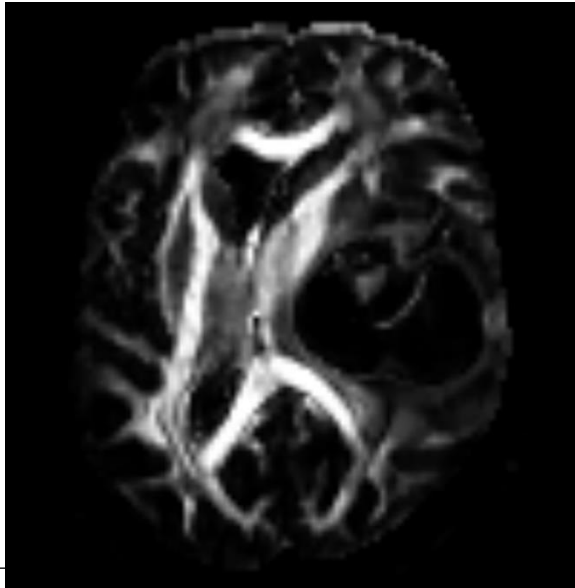
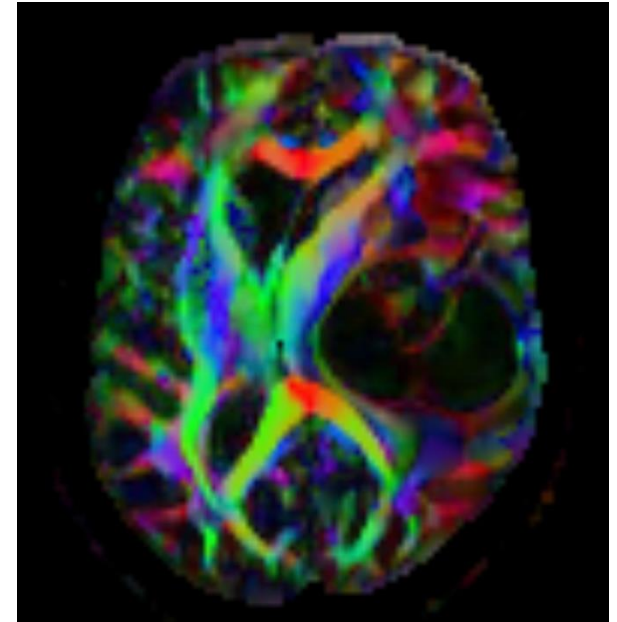
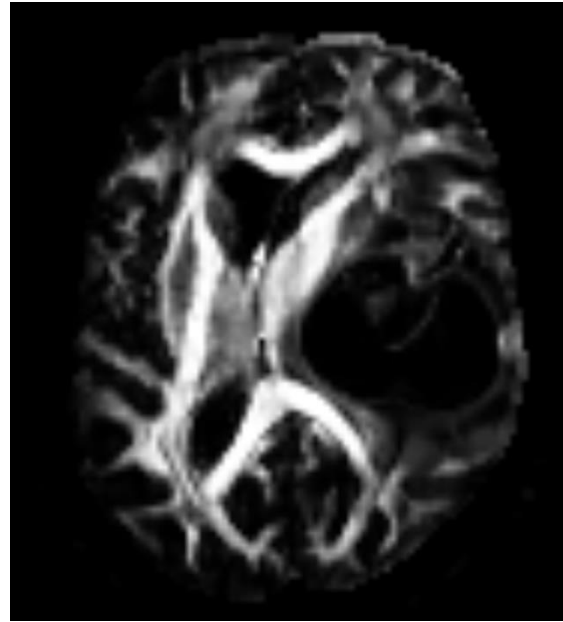
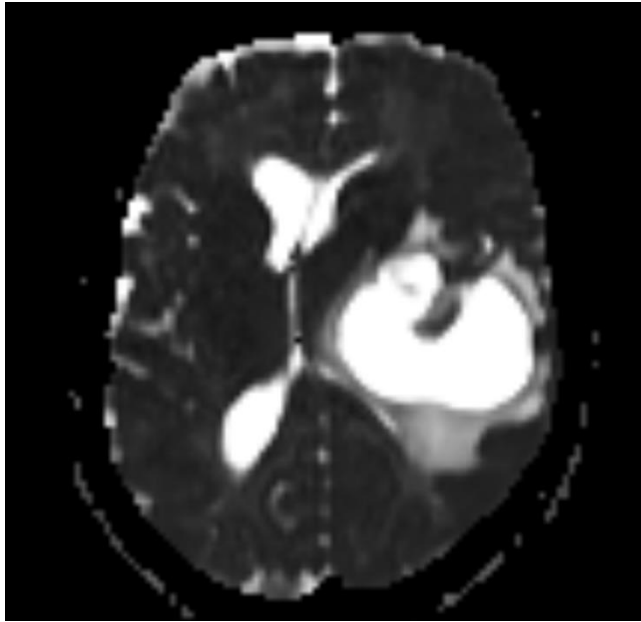
Дифузни астроцитом (постоперативно)



Високоградусни глиом?

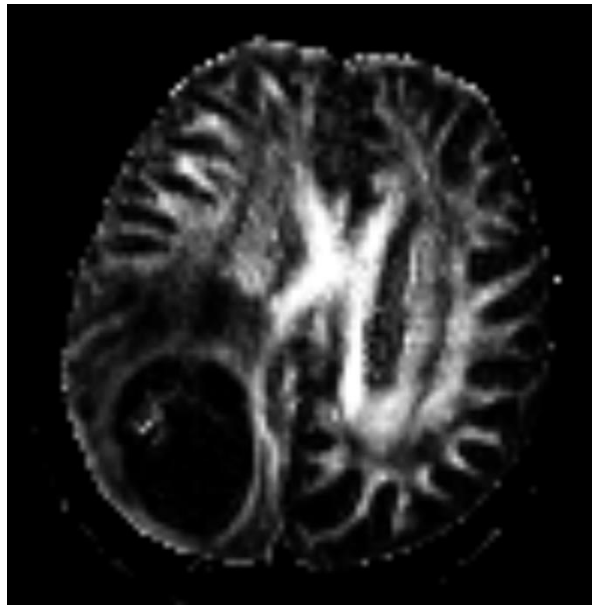
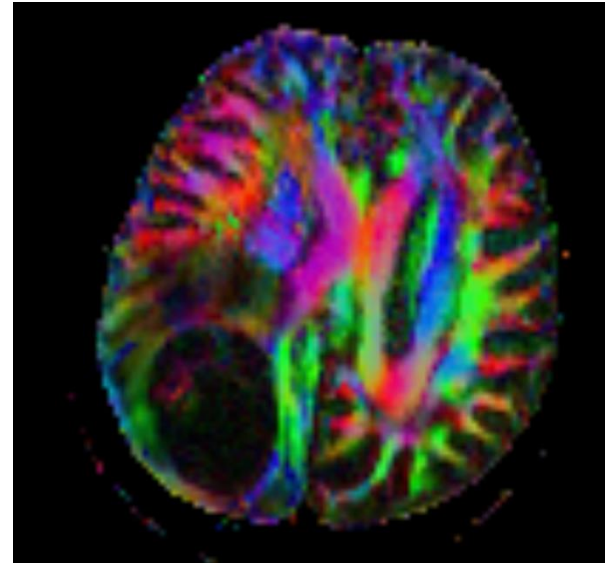
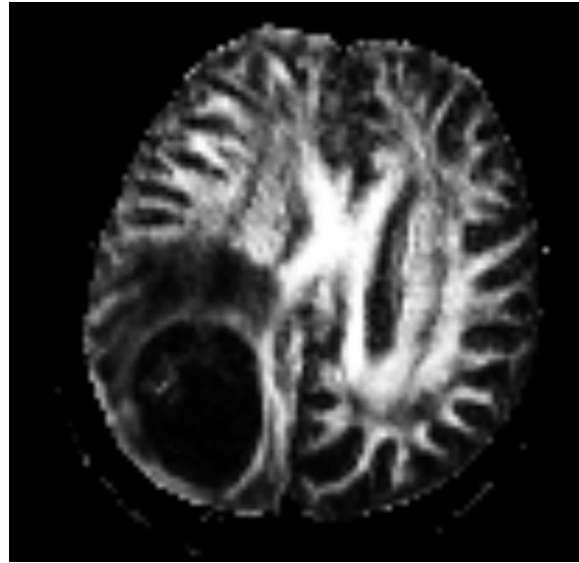
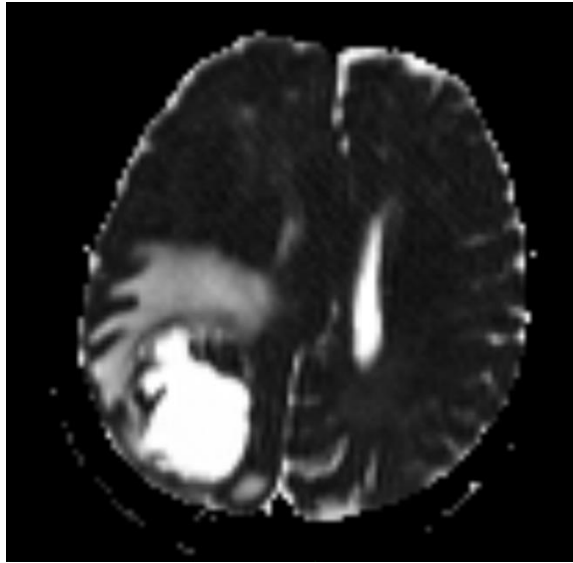


GBM



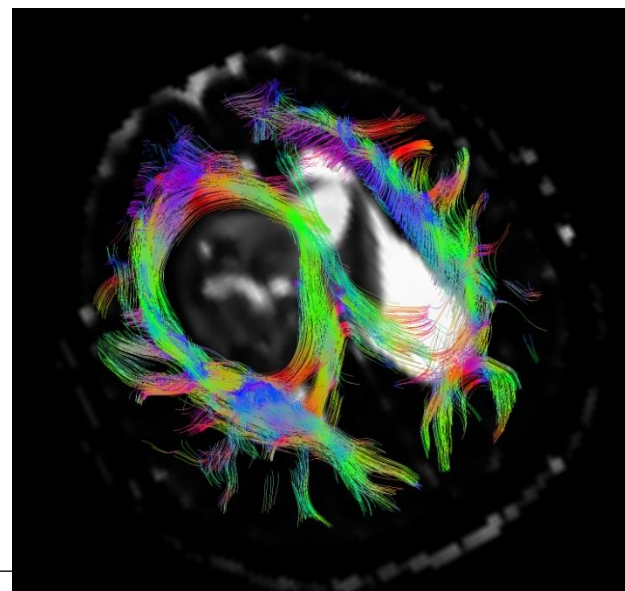
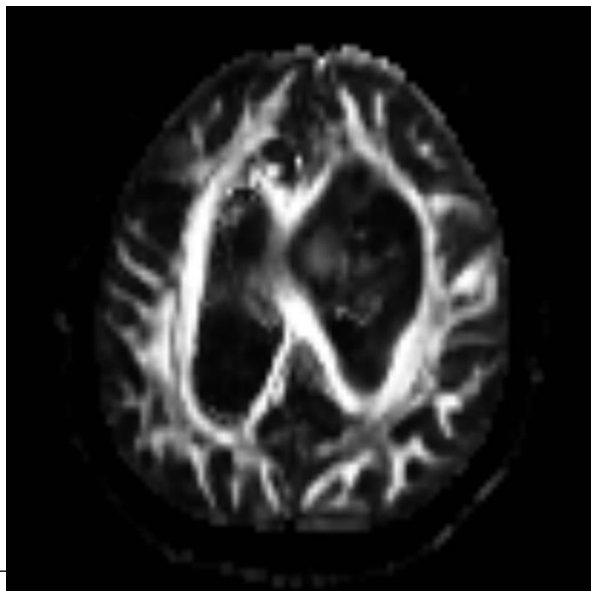
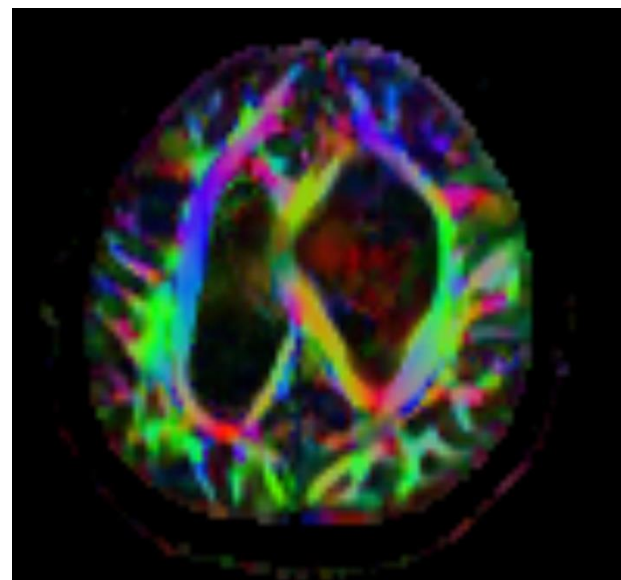
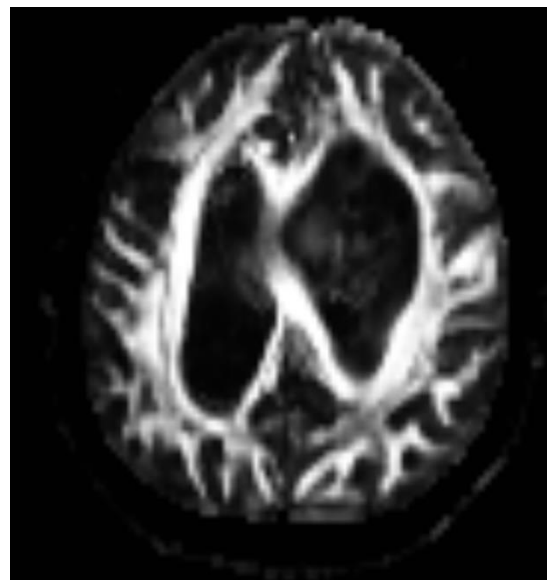
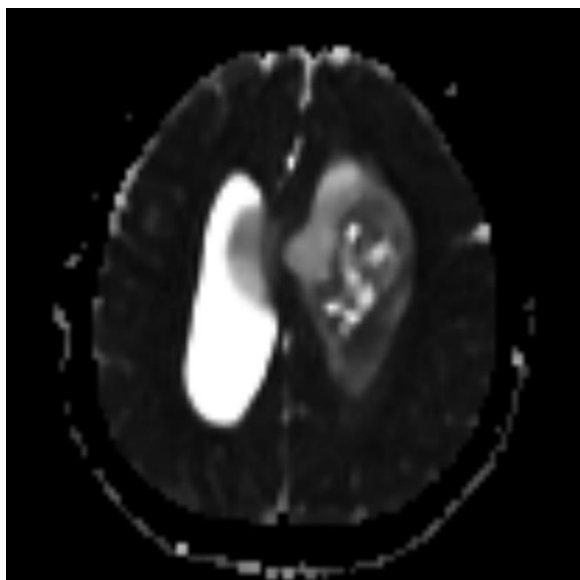
M, 58

GBM



M, 55 y

Интравентрикулярни тумор



F, 32 y

Фузија са анатомијом

