

ДИФУЗИЈСКИ МРИ

ПОДСЕЋАЊЕ: ШТА ЈЕ ДИФУЗИЈА?

- КРЕТАЊЕ МОЛЕКУЛА НИЗ КОНЦЕНТРАЦИОНИ ГРАДИЈЕНТ
- ТРАНСФЕР МАТЕРИЈЕ ЈЕ ДЕФИНИСАН ФИКОВИМ ЗАКОНИМА

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

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

САМОДИФУЗИЈА

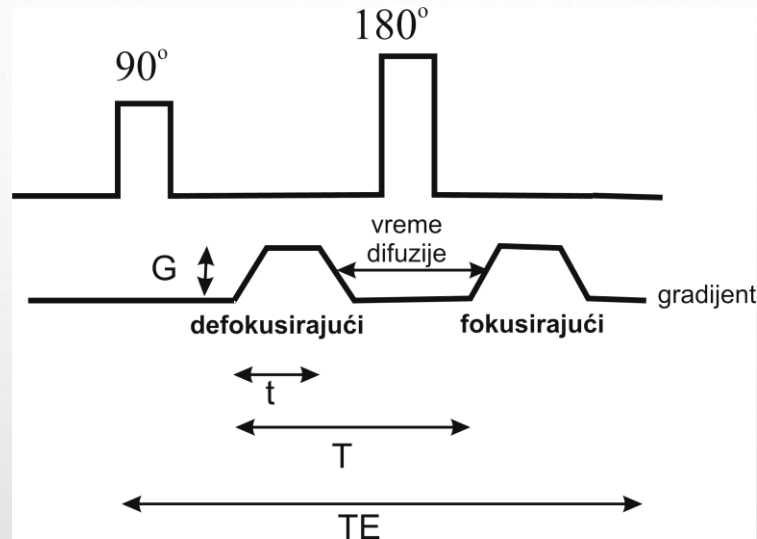
- ИАКО ЈЕ СРЕДЊИ ПОМЕРАЈ МОЛЕКУЛА У ЦЕЛОЈ ЗАПРЕМИНИ ЈЕДНАК НУЛИ, МОЖЕ СЕ ДЕФИНИСАТИ НЕ-НУЛА ВЕРОВАТНОЋА НАЛАЖЕЊА МОЛЕКУЛА НА ОДРЕЂЕНОМ РАСТОЈАЊУ ОД ПОЧЕТНОГ
- СРЕДЊИ СЛОБОДНИ ПУТ (ПОМЕРАЈ) КОЈИ МОЛЕКУЛИ ПРЕЂУ ИЗМЕЂУ ДВА СУДАРА ДАТ ЈЕ АЈНШТАЈНОВОМ ЈЕДНАЧИНОМ

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

- СПЕЦИЈАЛНО ДИЗАЈНИРАНА СТЕЈСКАЛ-ТАНЕРОВА СЕКВЕНЦИЈА ОМОГУЋАВА ДА СЕ НМР/МРИ СИГНАЛ УЧИНИ ЗАВИСНИМ ОД ДИФУЗИЈЕ

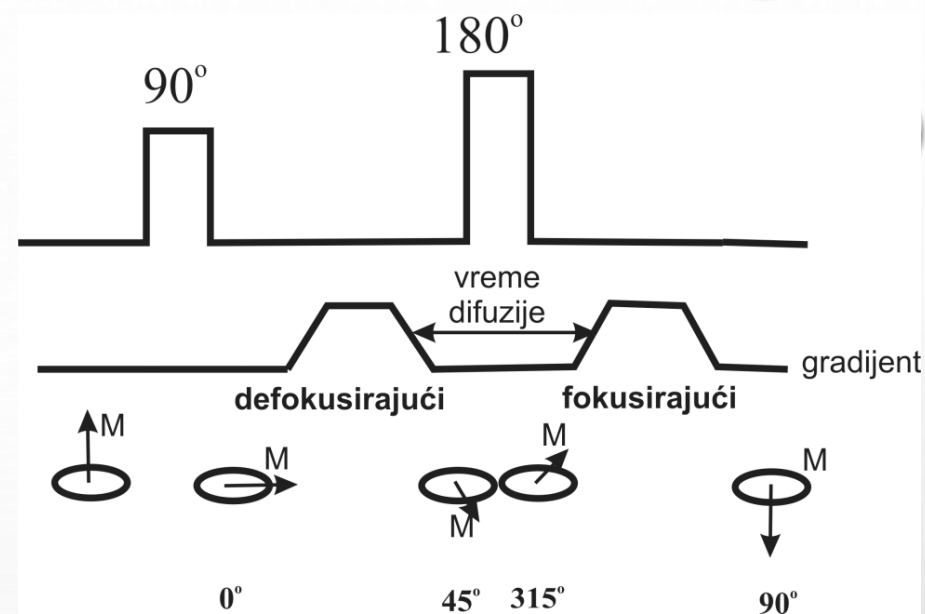
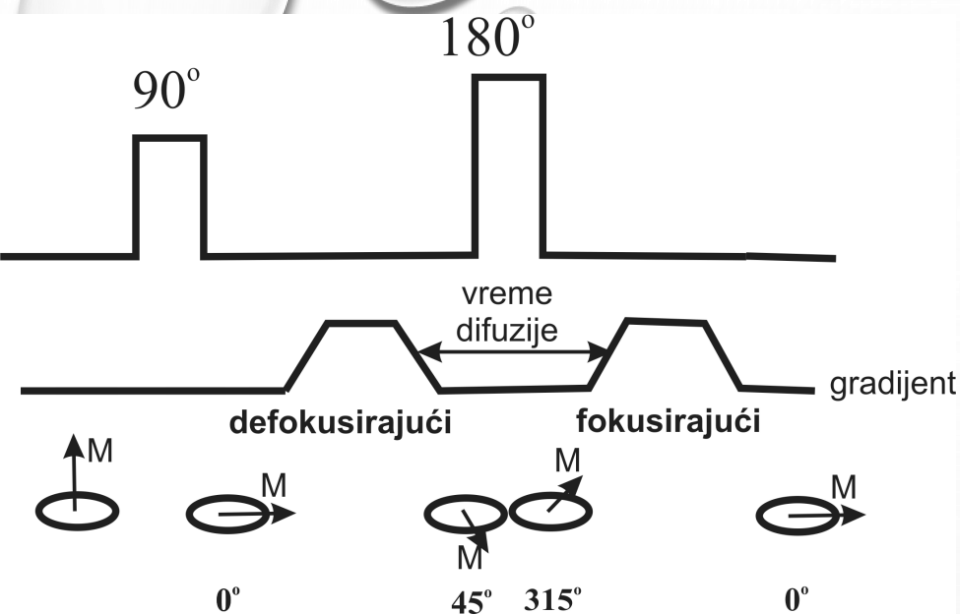
МЕРЕЊЕ ДИФУЗИЈЕ ПОМОЋУ МРИ (*DIFFUSION WEIGHTED IMAGING*)

- STEJSKAL & TANNER 1963. – СПИН ЕХО СЕКВЕНЦИЈА ЗА ПРАЋЕЊЕ ДИФУЗИЈЕ



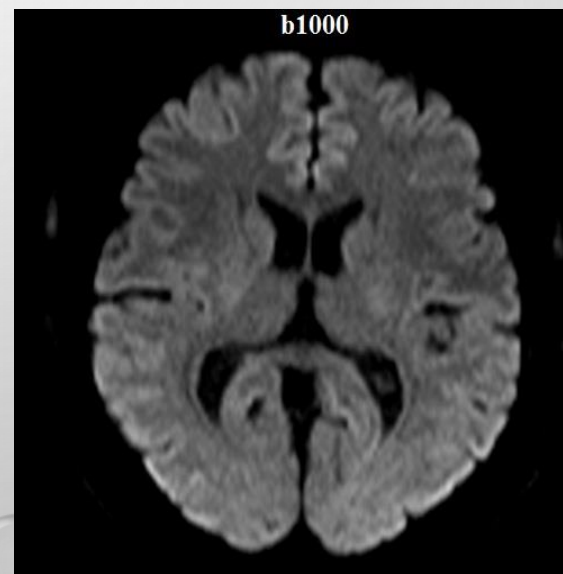
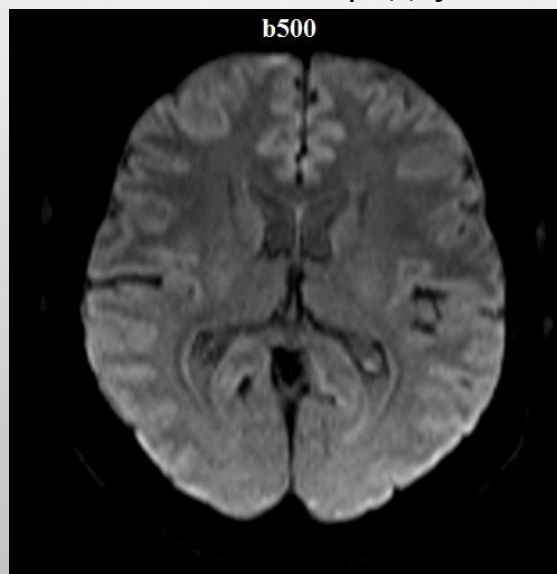
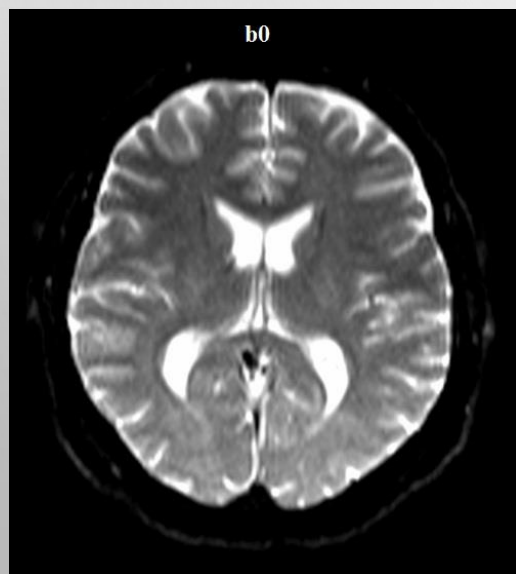
Спинови који се у периоду између дејства градијентних пулсева крећу не могу се фокусирати, што доводи до губитка сигнала.

$$S(TE) \propto e^{-\frac{TE}{T_2}} e^{-bD} \quad b = \gamma^2 G^2 t^2 \left(T - \frac{t}{3} \right)$$



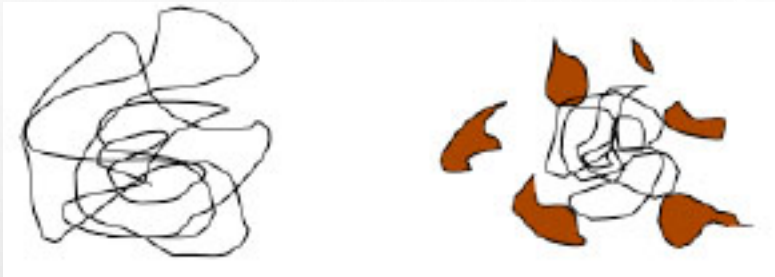
Понашање стационарних протона

Понашање протона који дифундују између два градијента

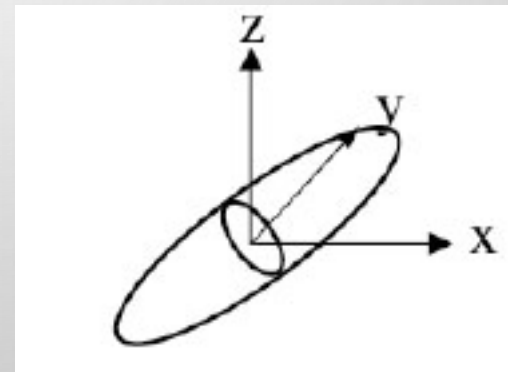
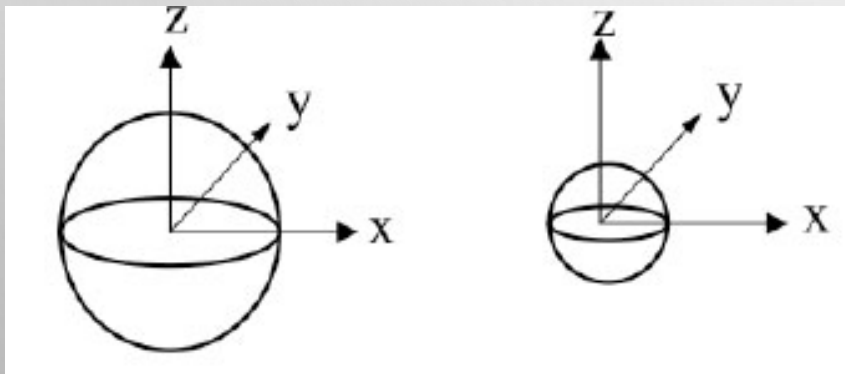


ДИФУЗИЈА ВОДЕ У ТКИВИМА

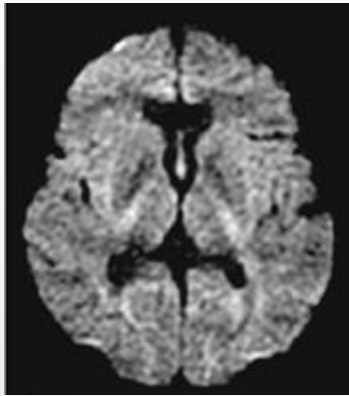
Изотропна неометена Изотропна ометена



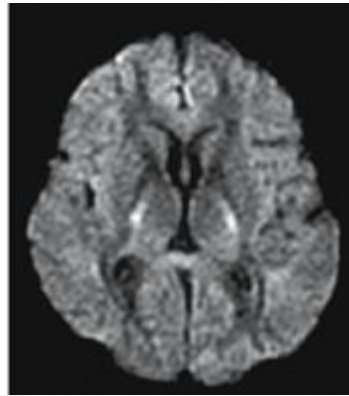
Анизотропна дифузија



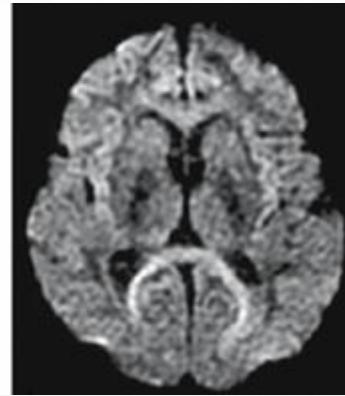
Анизотропија дифузије



Dx



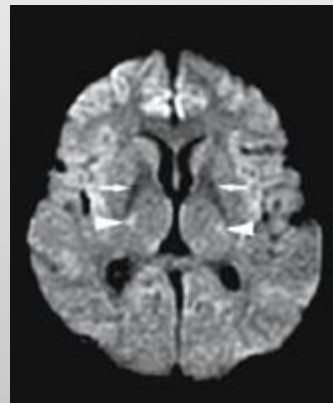
Dy



Dz

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

$$S(b) = N_0 e^{-\frac{b}{T_2}} e^{-bD}$$



DWI слика

Привидни дифузиони коефицијент (ADC)

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

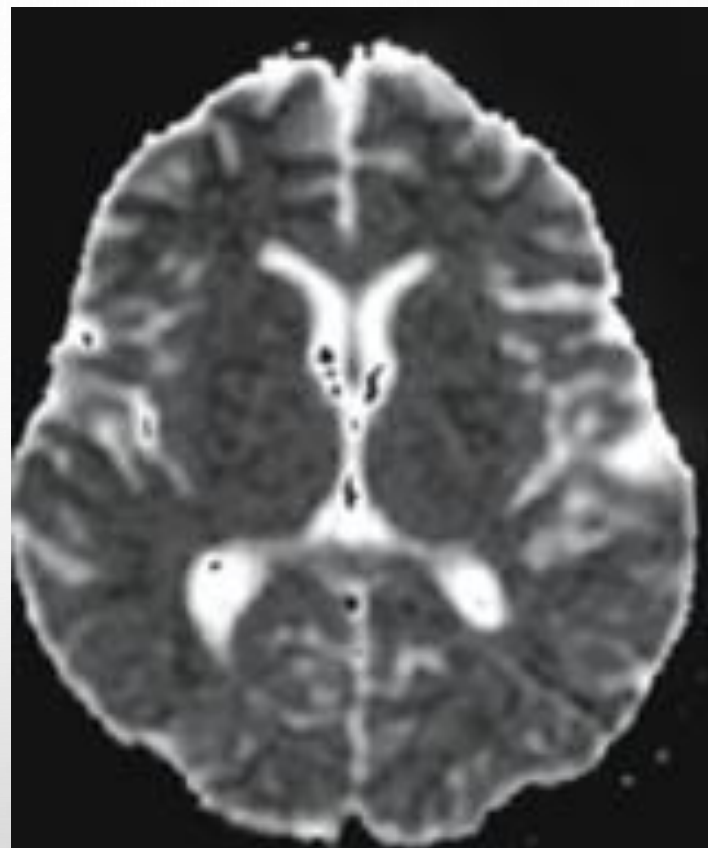
$$S(b_1) = N_D e^{-\frac{TE}{T_2}} e^{-b_1 ADC}$$

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

$$b_0 = 0 \Rightarrow$$

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

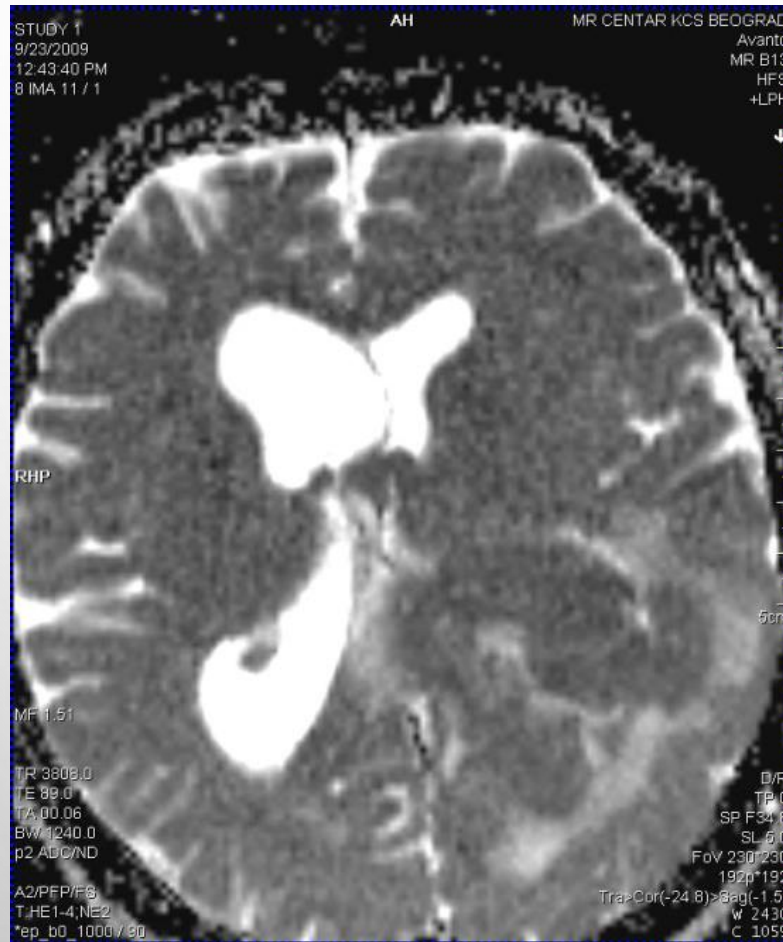
$$ADC = -\frac{1}{b_1} \ln \frac{S(b_1)}{S(b_0)}$$



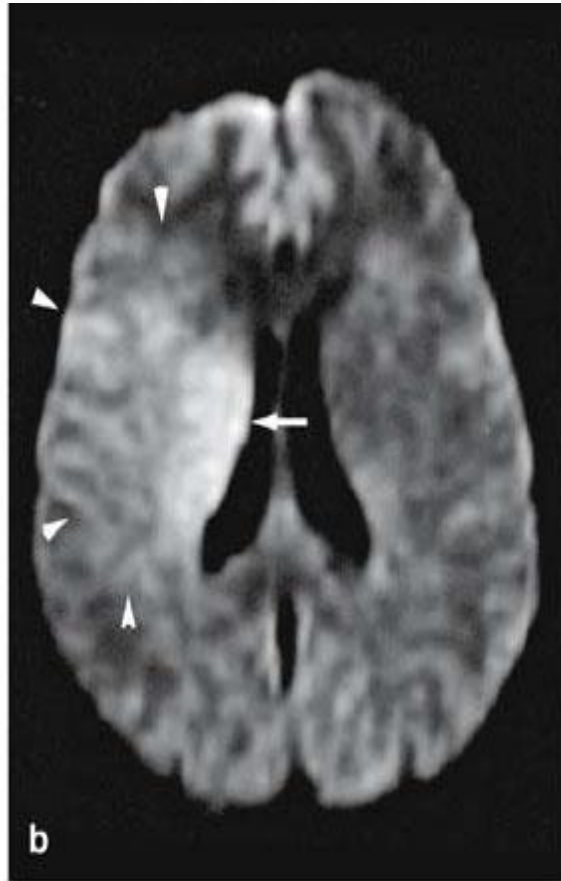
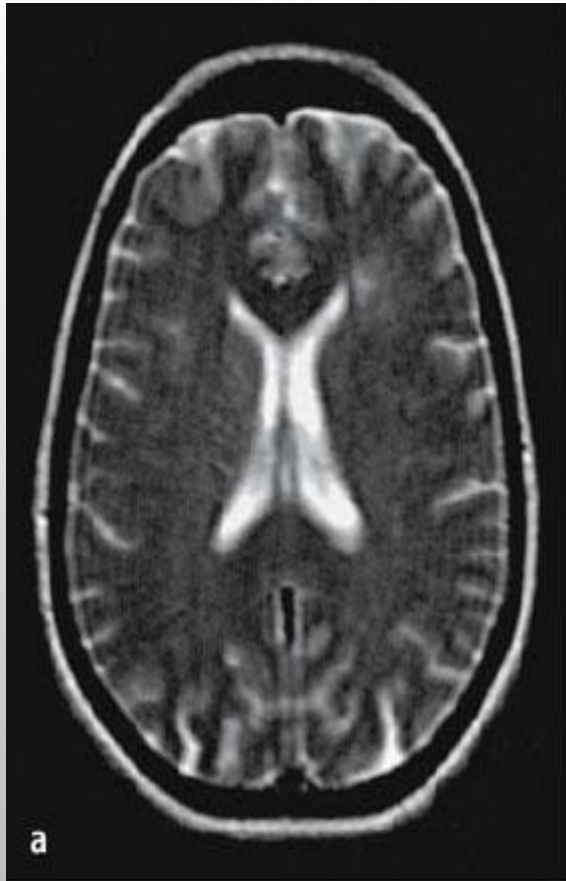
The background of the slide is a light gray gradient. In the top-left and bottom-right corners, there are several realistic water droplets of various sizes, rendered with soft shadows and highlights to give them a three-dimensional appearance.

ПРИМЕНЕ DWI

ДИЈАГНОСТИКА МОЖДЕНИХ ТУМОРА



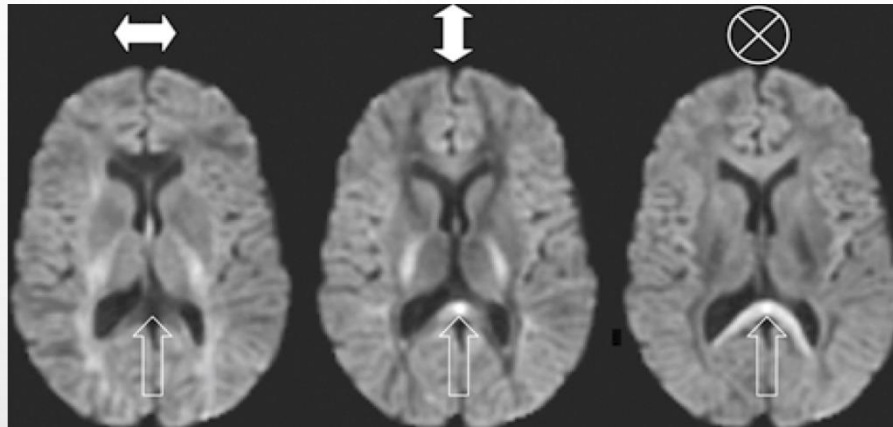
Мождани хиперакутни инфаркт



ДИФУЗИОНО ТЕНЗОРСКО СНИМАЊЕ

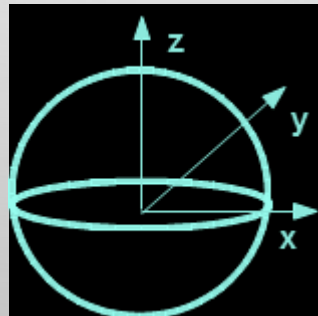
DTI-ДИФУЗИОНО ТЕНЗОРСКО СНИМАЊЕ

- КОРИСТИ ЧИЊЕНИЦУ ДА ЈЕ ДИФУЗИЈА У МОЖДАНОМ И ДРУГИМ ТКИВИМА АНИЗОТРОПНА

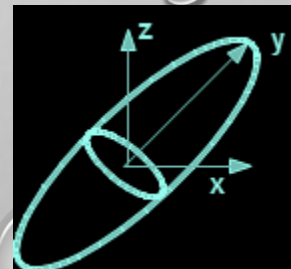


- ДИФУЗИЈА НОРМАЛНО НА НЕРВНЕ СНОПОВЕ ЈЕ ОКО 2,5 ПУТА МАЊА ОД ДИФУЗИЈЕ ДУЖ ЊИХ
- АНИЗОТРОПИЈА ДИФУЗИЈЕ СЕ ОПИСУЈЕ ПОМОЋУ ДИФУЗИОНОГ ТЕНЗОРА, ОДНОСНО У ГЕОМЕТРИЈСКОЈ ИНТЕРПРЕТАЦИЈИ ДИФУЗИОНИМ ЕЛИПСОИДОМ

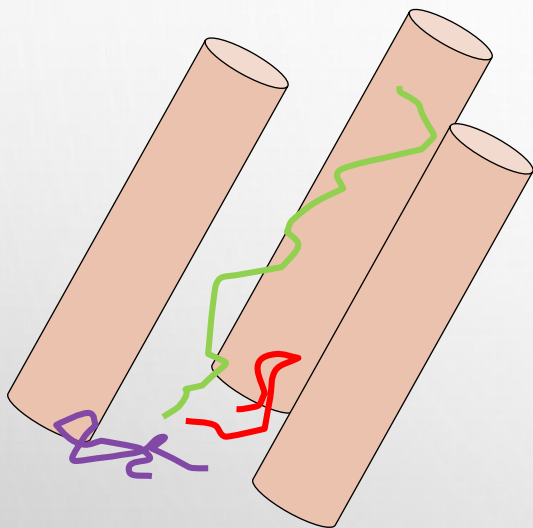
$$\begin{bmatrix} D & 0 & 0 \\ 0 & D & 0 \\ 0 & 0 & D \end{bmatrix}$$



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



УЗРОЦИ АНИЗОТРОПИЈЕ У МОЗГУ



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

АНИЗОТРОПИЈА ДИФУЗИЈЕ: ДИФУЗИОНИ ТЕНЗОР

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} D_{xx} & D_{xy} & D_{xz} \\ D_{yx} & D_{yy} & D_{yz} \\ D_{zx} & D_{zy} & D_{zz} \end{bmatrix} \quad \bullet \quad \text{Тензор је симетричан:} \quad \mathbf{D} = \begin{bmatrix} D_{xx} & D_{xy} & D_{xz} \\ D_{xy} & D_{yy} & D_{yz} \\ D_{xz} & D_{yz} & D_{zz} \end{bmatrix}$$

- 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 имиџа и компоненти дифузионог тензора за дату амплитуду и трајање дифузионих градијената (вредност **b**).

- За класични DWI:

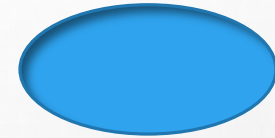
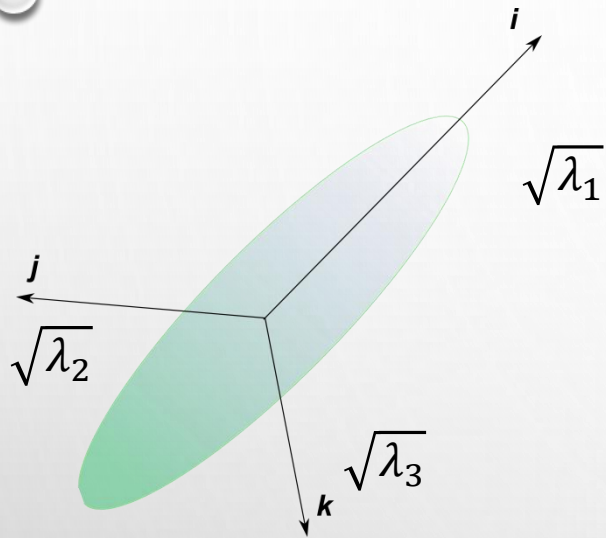
$$\frac{I_2}{I_1} = e^{-(b_2 - b_1)ADC}$$

За DTI:

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

- Да би се добиле вредности **D** треба снимити дифузијске имиџе за **минимум шест оријентација дифузионог градијента** – шест једначина-шест непознатих + имиџ за **b=0**
- Уобичајено је да се аквизиција врши за више од шест праваца да би се редуковао шум

ДИФУЗИОНИ ТЕНЗОР → ДИФУЗИОНИ ЕЛИПСОИД



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

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



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

- Сферичность

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

- Линеарность

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

- Планарность

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

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

СКАЛАРНИ ПАРАМЕТРИ

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

Средња дифузивност

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

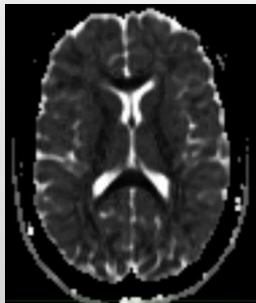
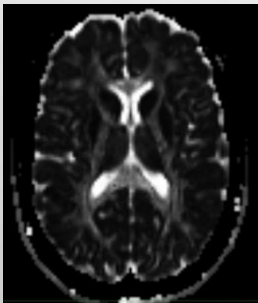
Фракциона анизотропија

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

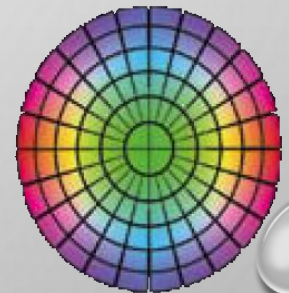
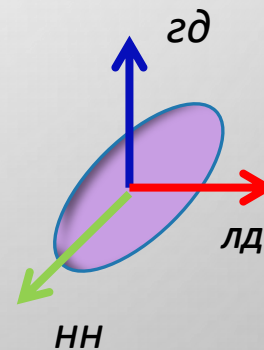
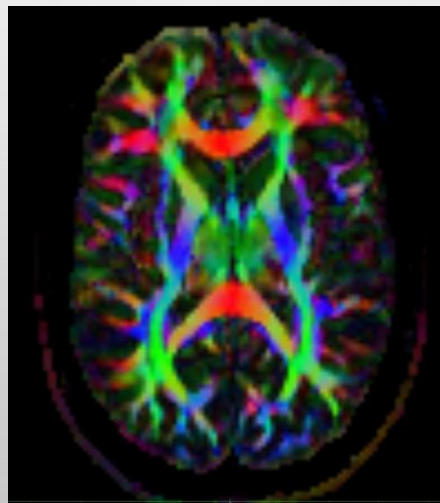
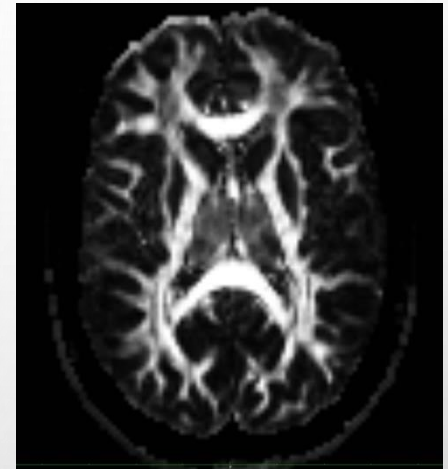
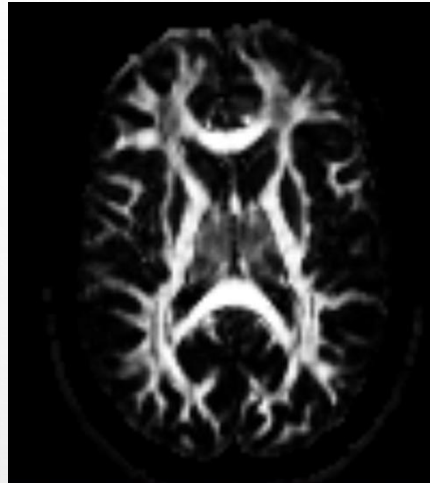
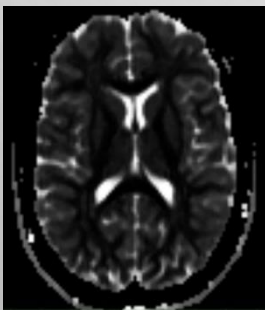
Релативна анизотропија

λ_1

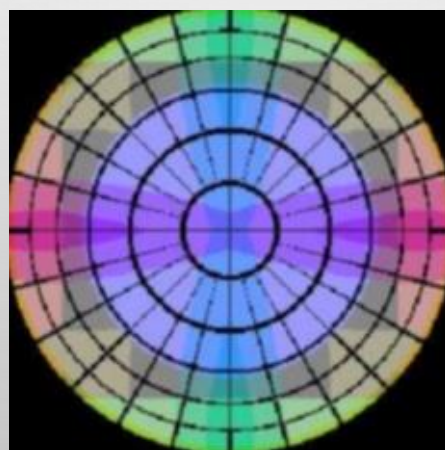
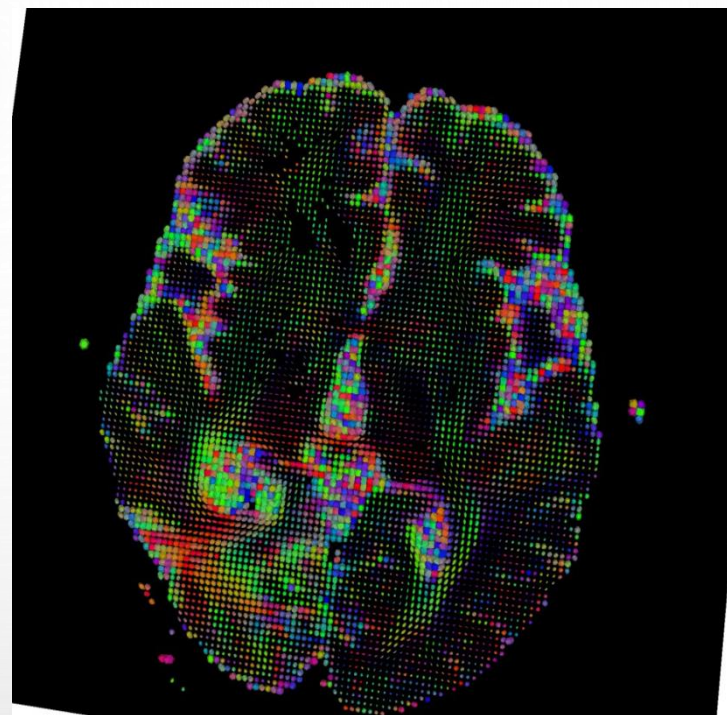
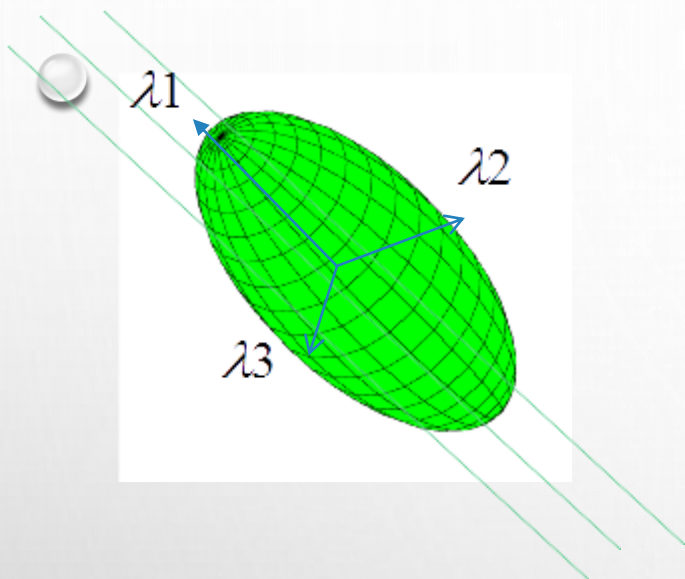
λ_2



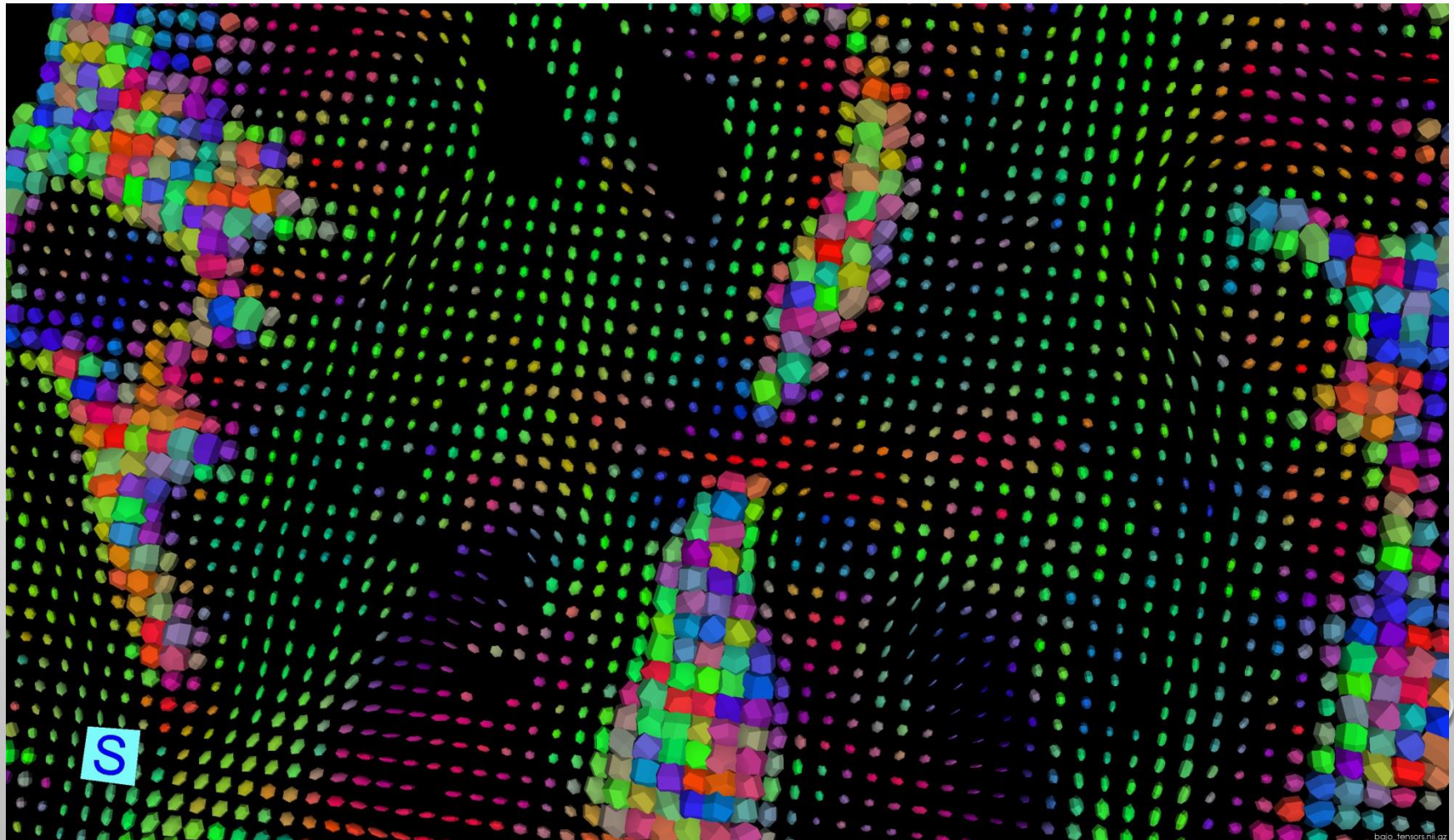
λ_3



Дифузиони елипсоид

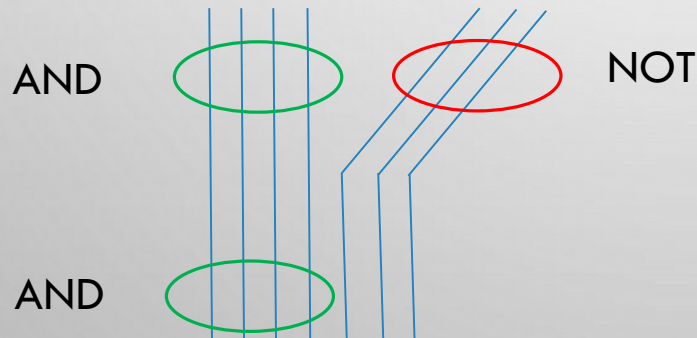


Дифузиони елипсоид 2



ДЕТЕРМИНИСТИЧКА ТРАКТОГРАФИЈА

- „ПРАЋЕЊЕ“ НАЈДУЖЕ ОСЕ ДИФУЗИОНОГ ЕЛИПСОИДА ОД ПРЕТХОДНО ДЕФИНИСАНОГ РЕГИОНА ОД ИНТЕРЕСА.
- ИСТОВРЕМЕНО СЕ ПРАТИ ПРОМЕНА ВРЕДНОСТИ FA И ДЕФИНИШУ СЕ ВРЕДНОСТ ОВОГ ПАРАМЕТРА КОЈА УКАЗУЈЕ НА ЗАВРШЕТАК ТРАКТА
- УКОЛИКО ЈЕ ЗАДАТАК ИЗОЛОВАЊЕ САМО ЈЕДНОГ ТРАКТА ПОСТАВЉА СЕ ВИШЕ РЕГИОНА ОД ИНТЕРЕСА И КОРИСТЕ ЛОГИЧКЕ ОПЕРАЦИЈЕ КОЈЕ УКЉУЧУЈУ ИЛИ ИСКЉУЧУЈУ ROI ИЗ ПРЕТРАГЕ

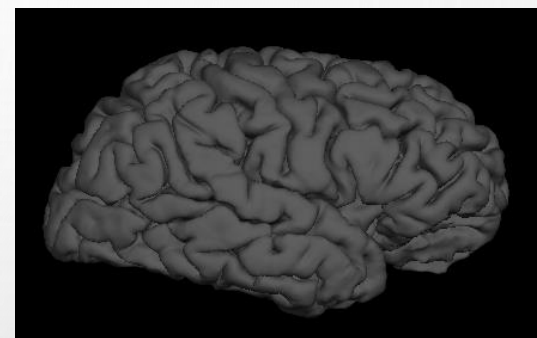
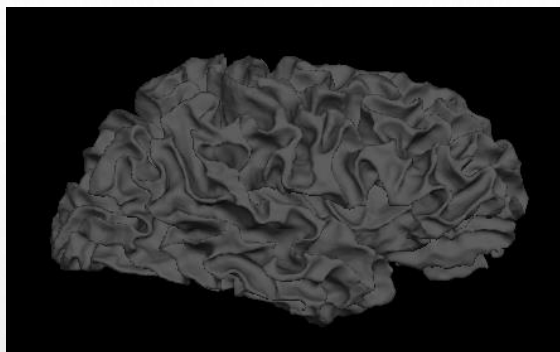
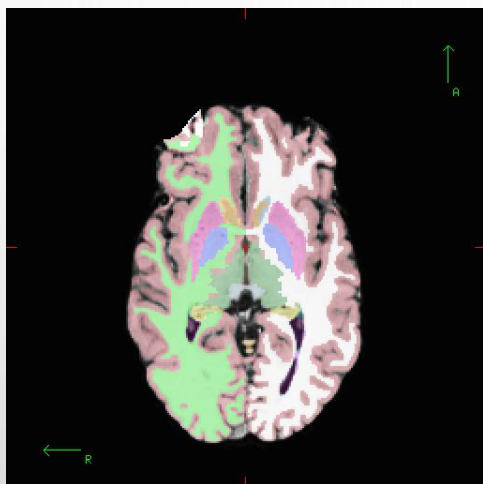


Мане:

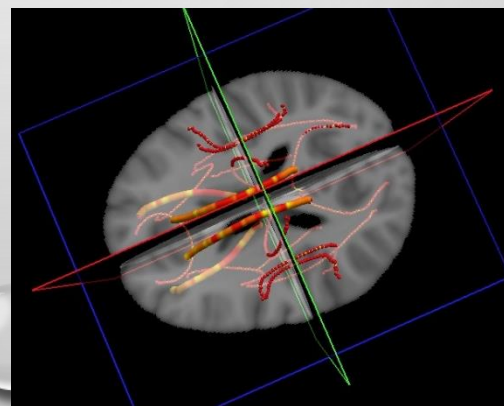
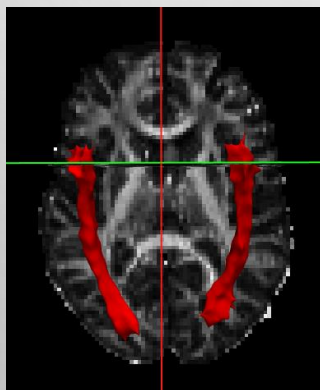
- Трактови понекад „залутају“ у сиву масу.
- Укрштена влакна

ПРОБАБИЛИСТИЧКА ТРАКТОГРАФИЈА

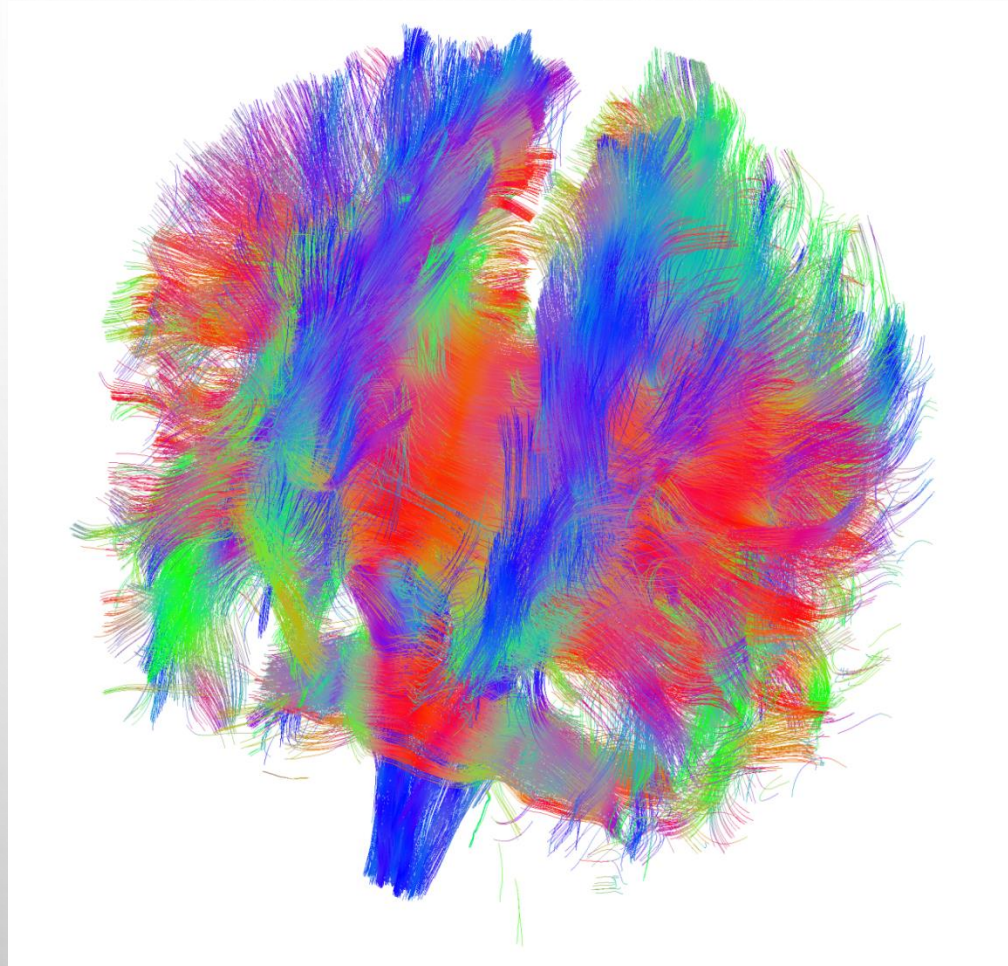
Корак 1. аутоматска сегментација сиве/беле масе/ унутрашњих структура сиве масе



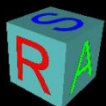
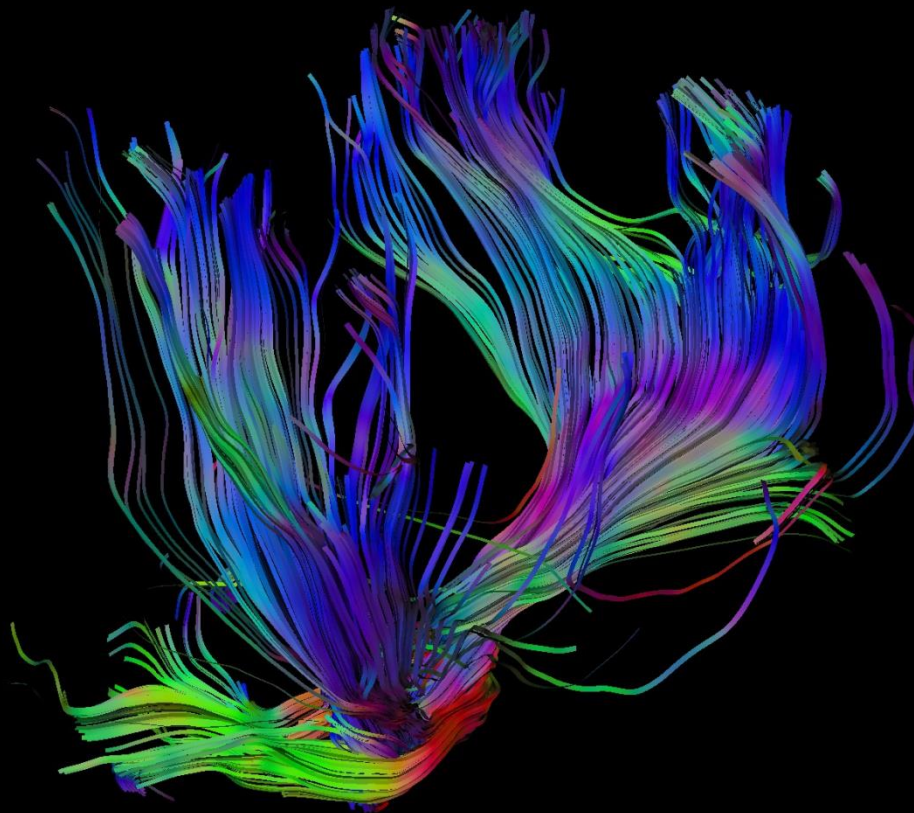
Корак 2. Трактографија уз коришћење мапа вероватноћа дистрибуције беле масе



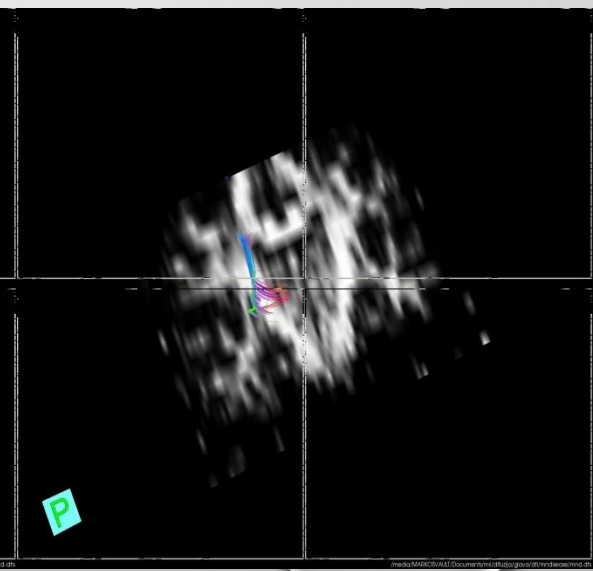
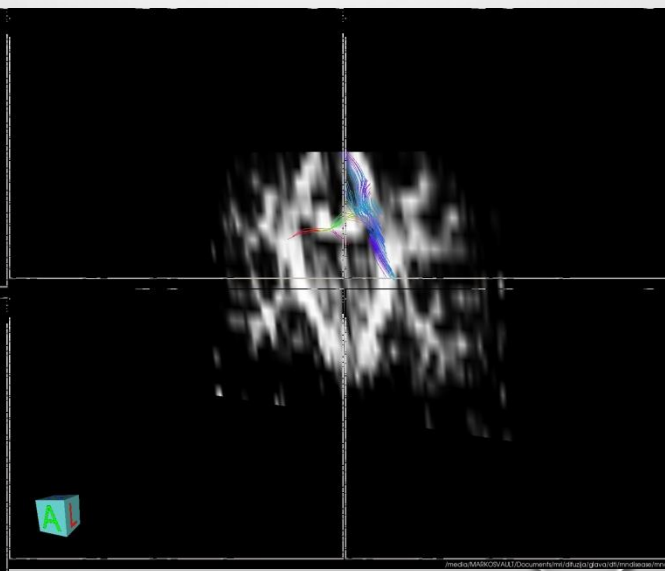
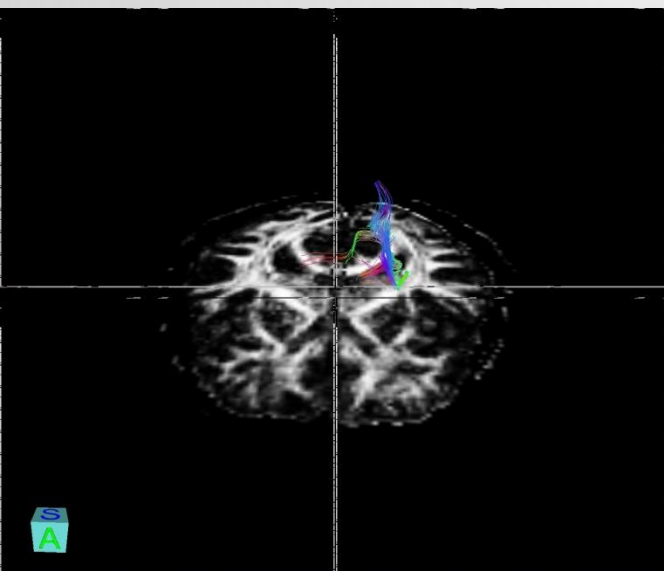
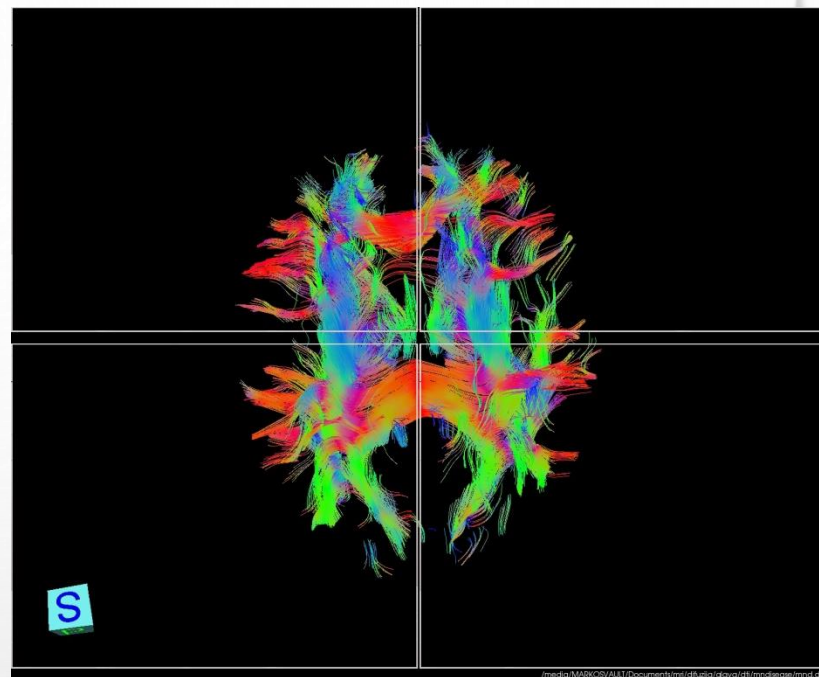
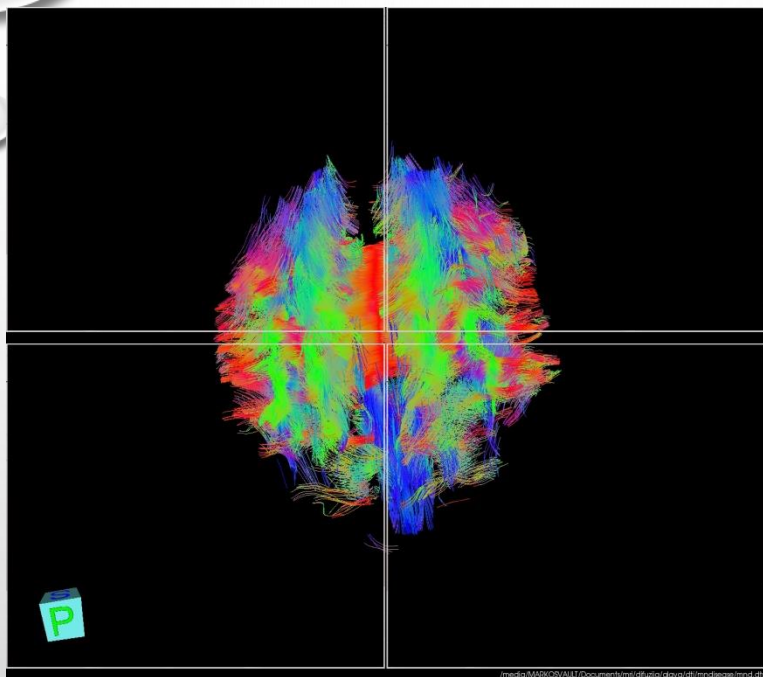
ТРАКТОГРАФИЈА У ЦЕЛОМ МОЗГУ



ПОЈЕДИНАЧНИ ТРАКТОВИ

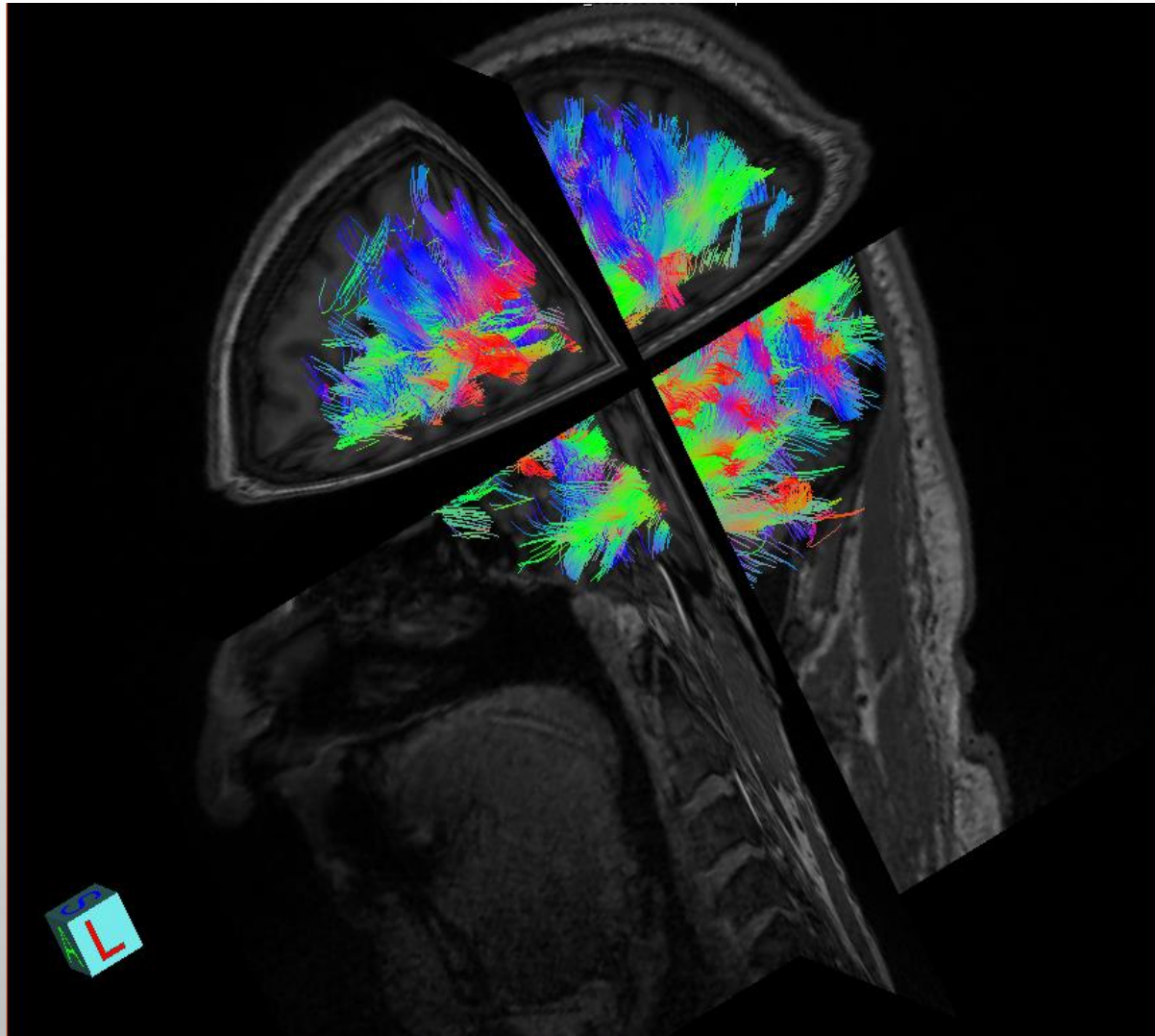


3D ПРЕДСТАВА ДИСТРИБУЦИЈЕ ТРАКТОВА



+ АНАТОМСКИ СНИМАК (3D T1)

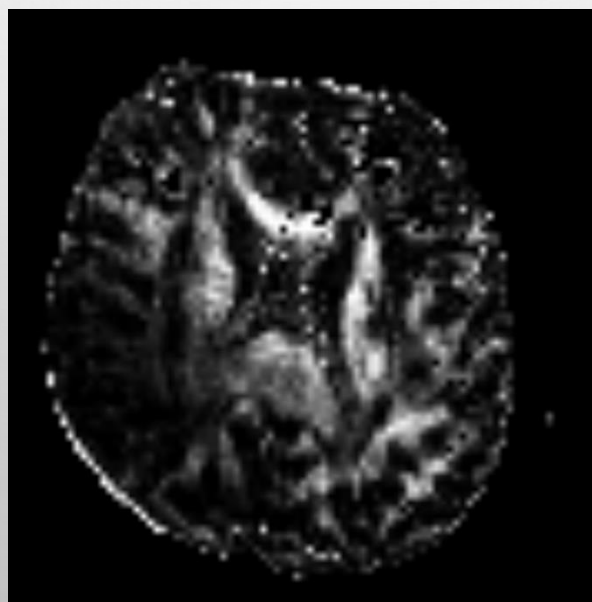
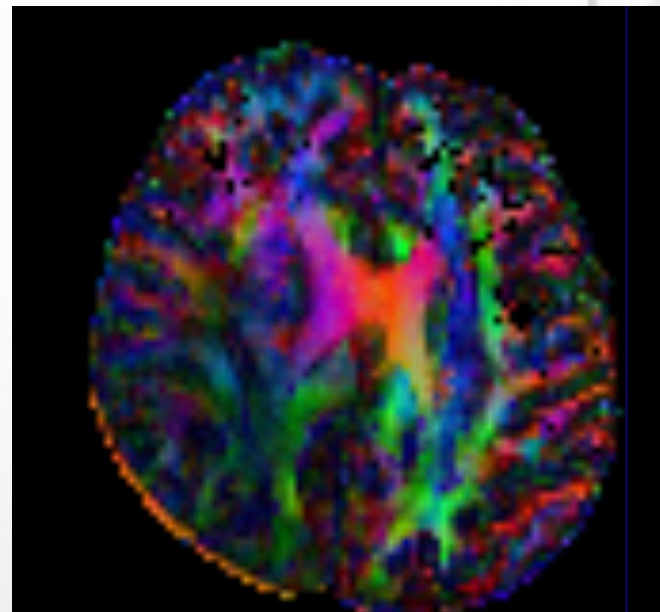
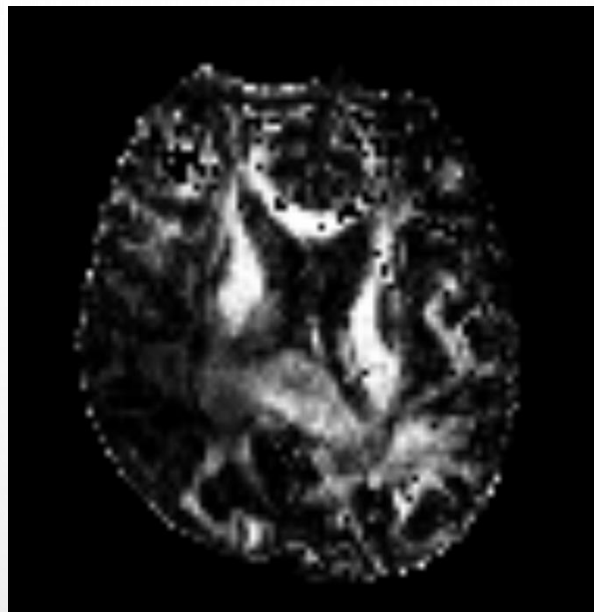
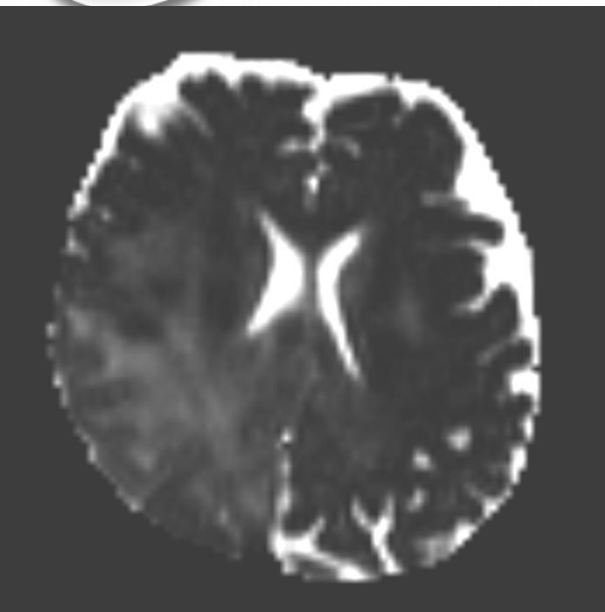
- DTI+MPRAGE



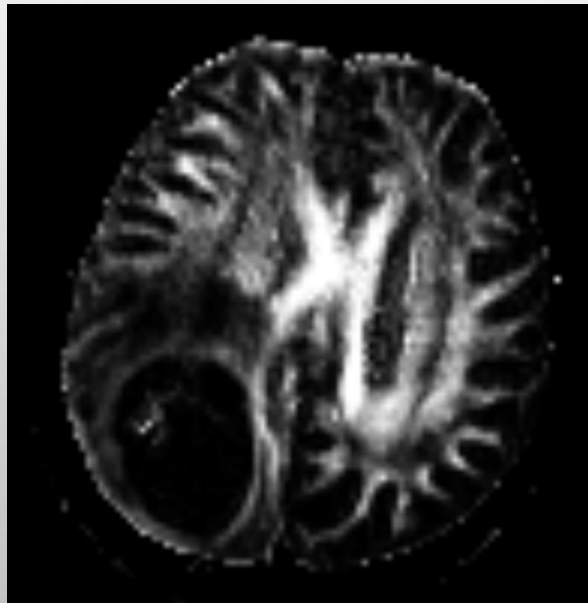
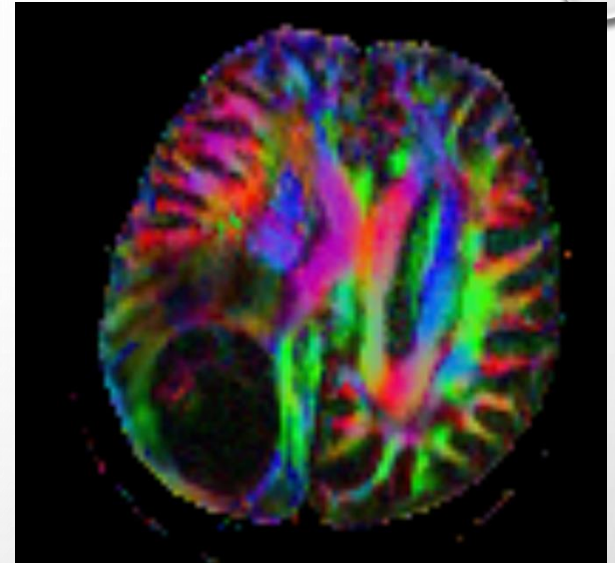
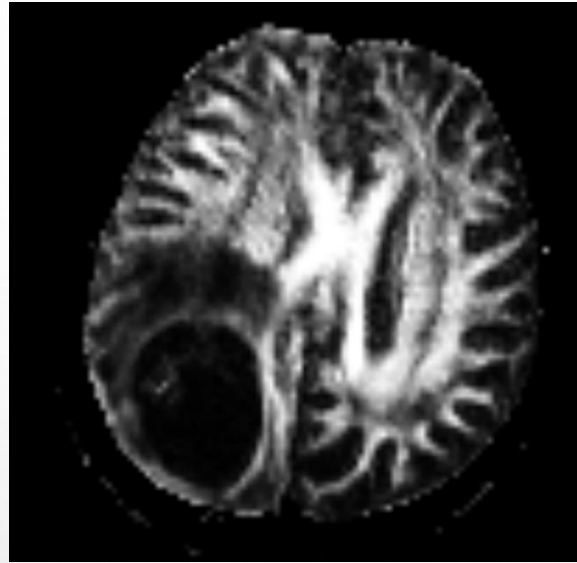
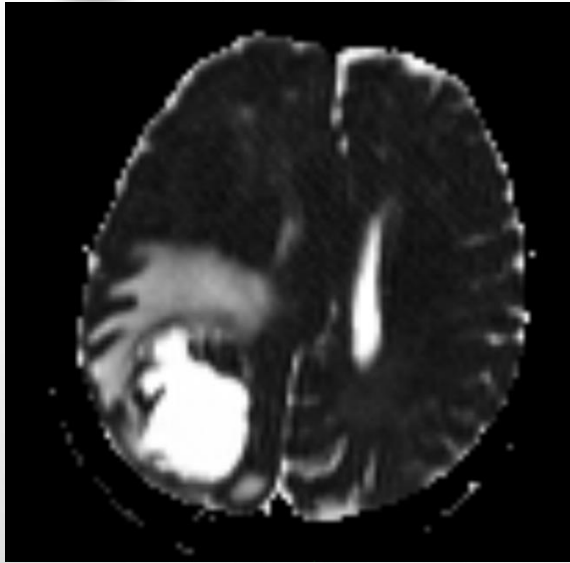
КАКО СЕ DTI ПАРАМЕТРИ МЕЊАЈУ У ПРИСУСТВУ ПАТОЛОГИЈЕ

- БЕЛА МАСА ЗАХВАЋЕНА ЛЕЗИЈОМ:
 - ПОВЕЋАНА ДИФУЗИЈА (ПОВЕЋАН ИНТЕНЗИТЕТ НА МАПИ ТРАГА)
 - СМАЊЕНА АНИЗОТРОПИЈА (СМАЊЕНА FA)
- ЕТИОЛОГИЈА ПРОМЕНА У DTI ПАРАМЕТРИМА НИЈЕ У ПОТПУНОСТИ РАСВЕТЉЕНА
 - ГУБИТАК АКСОНА И НАРУШАВАЊЕ ИНТЕГРИТЕТА МЕМБРАНА
 - ДЕМИЈЕЛИНАЦИЈА
 - ГЛИОЗА/ЗАПАЉЕНСКИ ПРОЦЕС

ВИСОКОГРАДУСНИ ГЛИОМ

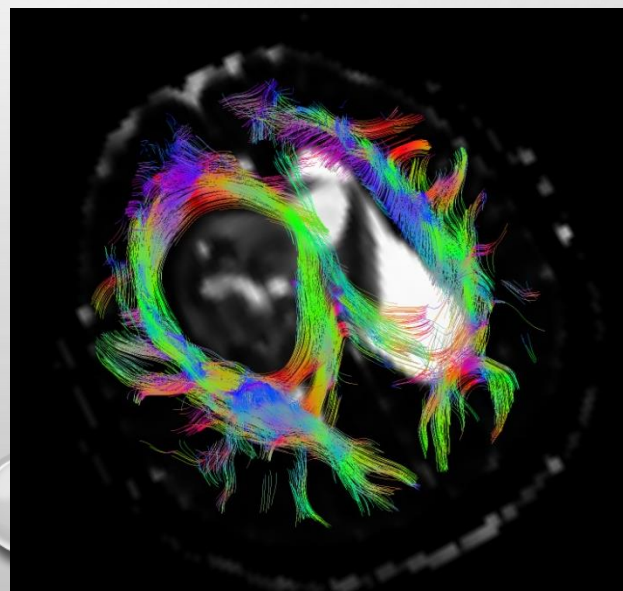
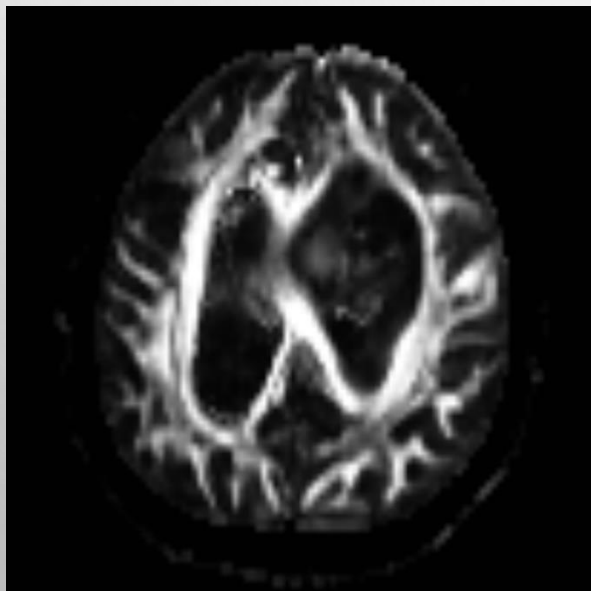
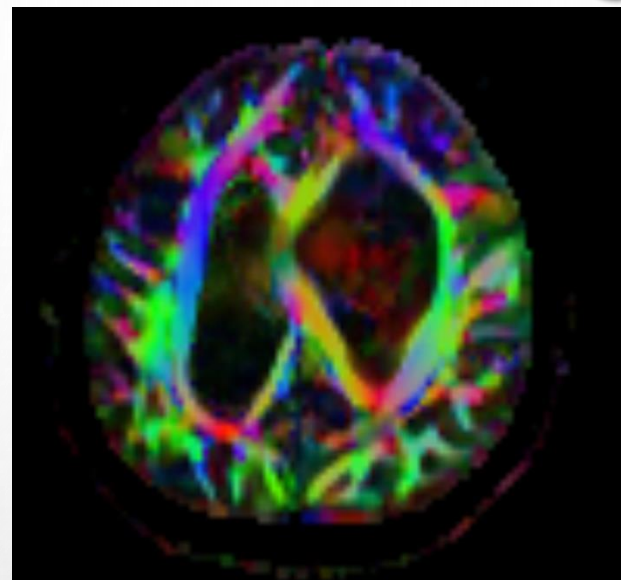
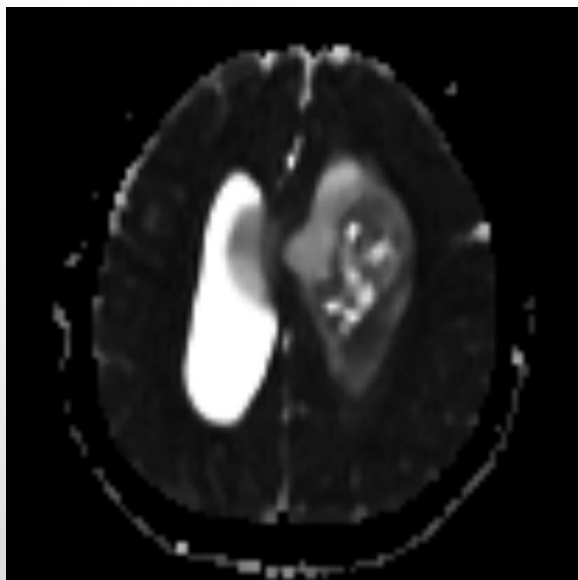


ГЛИОБЛАСТОМ



М, 55 y

ИНТАВЕНТРИКУЛАРНИ ТУМОР



F, 32 y