

# MRI原理与3T应用

程流泉 医学博士

解放军总医院放射科副主任医师副教授  
《中国医学影像学杂志》编辑部主任

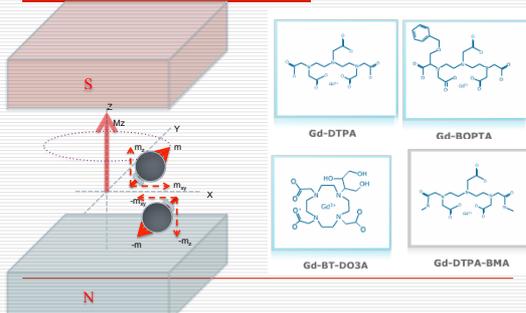


## 说明

- 此部分MRI原理内容的适用听众为有一定MRI原理基础、熟悉MRI高等应用者
- 全部内容为本人在解释临床实践中发现的MRI现象时的心得，参考了不同途径获得的MRI资料
- 对某些MRI现象的解释如有不妥之处，欢迎同行批评指正，共同商讨

程流泉

## Gd造影剂与MRI现象



## magnetic dipole moment

Particle	Electron	Proton	Neutron
Charge:	$-1.6 \times 10^{-19}C$	$+1.6 \times 10^{-19}C$	0
Mass:	1 emu	1836 emu	1837 emu
Spin:	$\frac{1}{2} h/(2\pi)$	$\frac{1}{2} h/(2\pi)$	$\frac{1}{2} h/(2\pi)$
Magnetic Dipole Moment:	$1836\mu_N$	$2.79\mu_N$	$-1.91\mu_N$

Note: C = Coulomb  
 emu = electronic mass unit,  $1 \text{ emu} = 9.1 \times 10^{-31} \text{ kilograms}$   
 h = Planck's constant,  $h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ Joule-seconds}$   
 $\mu_N = \text{one nuclear magneton}$

**×658**

$\mu_s = \frac{q_e h}{4\pi m_e}$  (the Bohr magneton)      $\mu_n = \frac{q_p h}{4\pi m_p}$



## 问题

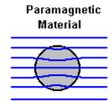
- 为什么不用电子作为MRI的对象?
- Electron Spin Resonance (ESR)
- Electron Paramagnetic Resonance (EPR)
- Paramagnetic



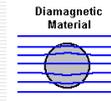
## 顺磁效应 Paramagnetism

- "paramagnetic": they have magnetic effects only when placed a strong, externally applied magnetic field
- When placed in a strong, externally applied magnetic field, the magnetic dipoles of the unpaired outer shell electrons in gadolinium align, creating strong, non-uniform magnetic fields in the vicinity of the gadolinium atom.

Paramagnetic Material



Diamagnetic Material



### 顺磁效应对T1弛豫的影响

$\omega = g \times (B_0 + B')$

Paramagnetic Material

$w_0 = g \cdot B_0$

Gyromagnetic Ratio

Precession Frequency (Hz)

External Magnetic Field Strength (Tesla)

### 顺磁效应对T2弛豫的影响

铁磁现象导致局部的磁场不均匀

Hallervorden-Spatz病

### 共振

射频脉冲中心频率 = 分子热运动频率 = 质子Larmor频率

- 分子自身
- 分子之间的作用
- 分子内的作用
  - 磁偶极-偶极耦合作用
  - 电四极耦合作用
  - 化学位移的各向异性
  - 梯度耦合作用
  - 自旋转动的相互作用

大分子蛋白质

### 相关时间Tc

- 相关时间Tc:
  - 分子转动一个弧度的时间, 相当于自旋子发生磁场上“跃迁”的时间
  - 分子Brown运动的频率 (1/Tc)
  - 适用范围: 各向同性条件下的单纯转动运动
- 非黏液样液体 (自由水), 室温:
  - Tc=10<sup>-12</sup>sec,  $\omega_0^2 Tc^2 \ll 1$
  - 1/T1=1/T2=5KTc (无频率依赖性)
- 固体:
  - Tc=10<sup>-5</sup>sec, T1延长, T2缩短
- 黏液:
  - Tc=10<sup>-9</sup>sec,  $\omega_0^2 Tc^2 = 1$  (频率依赖性)

$$1/T_2 = \frac{K}{2} \left[ \frac{1}{3Tc} + \frac{5Tc}{1 + \omega_0^2 Tc^2} + \frac{2Tc}{1 + 4\omega_0^2 Tc^2} \right]$$

### 相关时间Tc

- 固态物质的Tc=10<sup>-5</sup>秒
- 黏液的Tc接近10<sup>-9</sup>秒
- 自由水的Tc=10<sup>-12</sup>秒

### 分子水平的差异

### T1弛豫的特征

- 当晶格磁场 (1/Tc) 的变化频率与 Larmor 频率 (外加磁场) 一致时, 才能共振发生共振, 此时 T1 最短
- 大于或者小于 Larmor 频率都不会发生共振, T1 延长。
- 晶格磁场的变化频率由分子的大小和环境温度决定
  - 中等大小分子: 脂肪分子
    - 转动频率接近 Larmor 频率
  - 大分子: 蛋白质
    - 转动频率 << Larmor 频率
  - 小分子: 水转动较快
    - 转动频率 >> Larmor 频率

### 组织T1值的特征

- 自由水含量和大分子对水分子的吸附力决定组织的 T1 信号。
- 组织内的水受分子间的范德华力作用, 被吸附在大分子蛋白质表面, 成为结合水;
- 结合水的自由翻转运动频率比自由水下降, 向 Larmor 频率靠近, 因此 T1 弛豫时间比自由水缩短。

### T1现象的解释之一

- 中等共振分子、结合水和自由水
- 脂肪、正常组织、病理组织、脑脊液
- 正常状态下, 组织内的自由水和结合水处于一种平衡状态;
- 病理状态下, 这种平衡被打破, 自由水增多, T1 延长。

### 场强升高, T1的变化

### 1.5T与3T参数的优化

- TR=2100ms, TE=10ms
- TR=2060ms, TE=7ms

### 顺磁效应对T1弛豫的影响

$\omega = g \times (B_0 + B')$

Paramagnetic Material:  $w_0 = g \cdot B_0$

Cyromagnetic Ratio:  $g$

External Magnetic Field Strength (Tesla):  $B_0$

Precession Frequency (Hz):  $w_0$

### 抗磁效应

抗磁效应 (Wilson脑病, 铜沉积)

Diamagnetic Material

自由水 结合水 蛋白质

Water Fat

### 顺磁效应对T2弛豫的影响

3T  
8.0ml bolus

自由水 结合水 蛋白质

Water Fat

### 组织的T2弛豫特性

- Tc 越长 ( $T_c > 10^{-6}$ 秒), 氢质子耦联固定, 形成的磁是固定的, 导致  $M_{xy}$  迅速失相;
- Tc 越短 ( $T_c < 10^{-12}$ 秒), 对一定氢质子“静止”相位偏移的正负作用平均为零 (频率运动性变窄或者运动平均现象)
- T2 取决与自由水分子含量和组织局部构成的均匀性 (局部磁场的均匀性)

大分子蛋白质

### T2现象的解释之一

- 中等共振分子、结合水和自由水
- 脂肪、正常组织、病理组织、脑脊液
- 正常状态下, 组织内的自由水和结合水处于一种平衡状态;
- 病理状态下, 这种平衡被打破, 自由水增多, T1 延长。

自由水 结合水 蛋白质

Water Fat

### T2值的变化

$v = \gamma (B_0 + x G_x) = v_0 + \gamma x G_x$

- 主磁场水平
- 梯度场水平
- 组织学水平
  - 体素外
  - 体素内

失相位  $t=0$

相位分散  $t=T$

Dephasing a) Dephasing b) Dephasing c) Dephasing d)

### T2与T2\*

- The sum of T2' and T2 effects that influence transverse decay.
  - $T_2' + T_2 = T_2^*$
- T2' is the transverse decay due to magnetic field inhomogeneities, chemical shift of the second kind and patient induced magnetic susceptibilities.

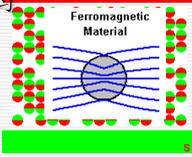
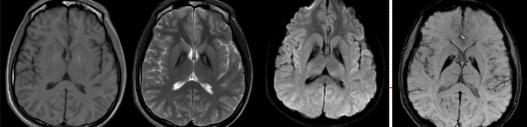
echo

T2 decay

T2' decay

### T2现象的解释之二

- 铁磁现象导致局部的磁场不均匀
- Hallervorden-Spatz病

### 思考题之一

- 推测三者的T1、T2值的差别

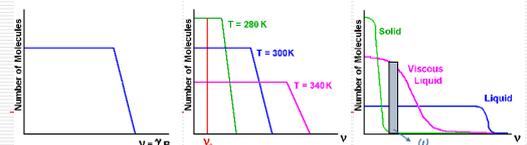


### 试验测试结果



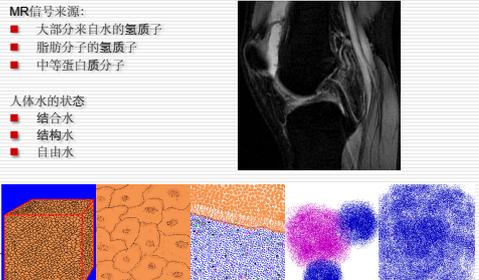
### 弛豫的频率依赖性和温度依赖性

- 怎样解释1.5T和3.0T上T1和T2值的变化？
- 弛豫的频率依赖性
  - Larmor频率决定发生共振的质子数量，当水分子的运动频率与Larmor频率一致时发生共振， $B_1$ 的变化会引起弛豫率的变化。
- 弛豫的温度依赖性
  - 分子的动能与运动的频率相关： $\omega = 1/Tc$ ;
  - 温度的依赖性通过影响Brown运动的频率实现



### 合理解释人体的水与大分子物质的弛豫

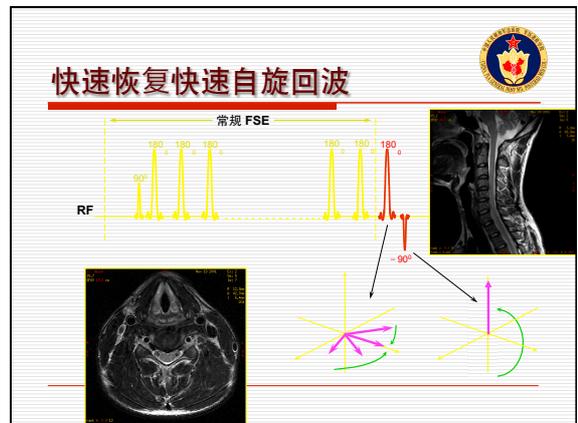
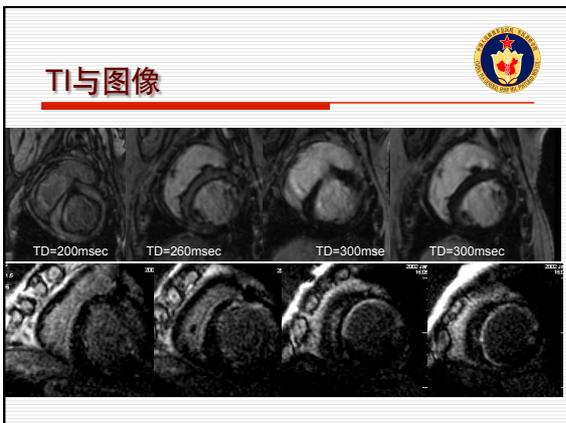
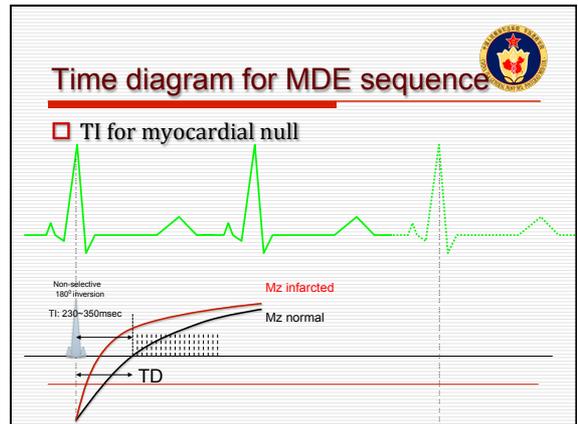
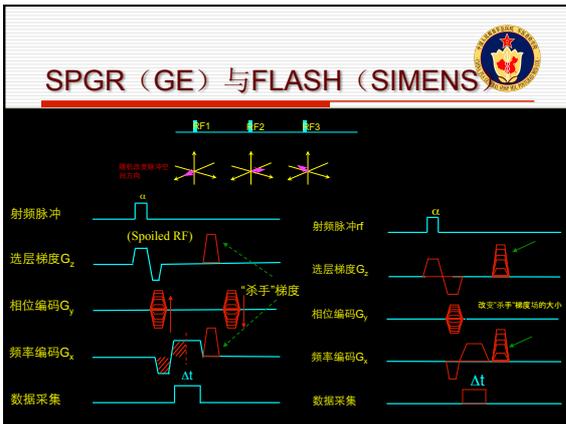
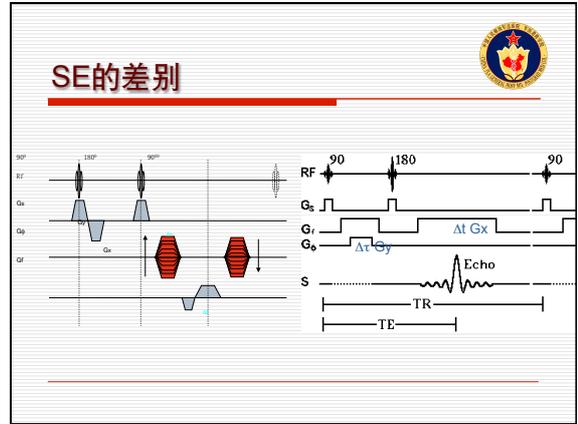
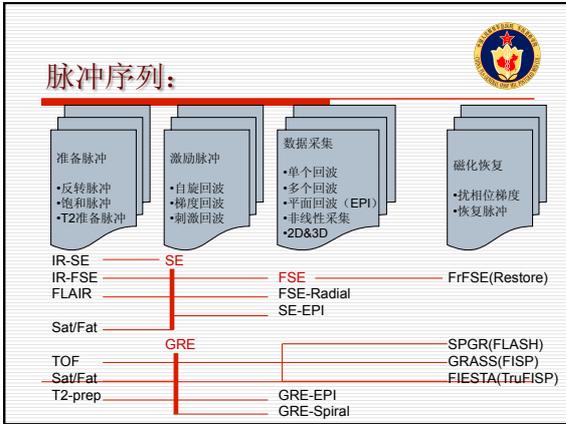
- MR信号来源:
  - 大部分来自水的氢质子
  - 脂肪分子的氢质子
  - 中等蛋白质分子
- 人体水的状态
  - 结合水
  - 结构水
  - 自由水



### 交叉弛豫与大分子的水化作用

- 交叉弛豫
  - 蛋白质与水分子之间的自旋交换，即交叉弛豫，通过质子-质子磁化矢量的交换实现
  - 交叉弛豫使蛋白质溶液的弛豫由大分子的弛豫决定；大分子的弛豫取决于大分子的翻转速率，与分子量和分子形态有关；
- 结合水的 $T_c = 10-9$ 秒，典型黏液特征，有交叉弛豫现象，主宰溶液的T1弛豫；其T2弛豫快，来不及进行交换，因此T2弛豫并非如此。
- 大分子的水化作用
  - 极性基使水分子与大分子形成水化带，结合水分子与多肽极性部分平均距离为2.9A，有交叉弛豫现象；结构水分子与多肽极性部分平均距离为3.7A，偶极-偶极效应减弱，没有交叉弛豫现象。
  - 非极性基使邻近水分子以各向异性方式转动





### 相位编码与K空间

### Fourier变换与K-空间

$$f(x, y) = \frac{1}{N^2} \sum_{k_x=0}^{N-1} \sum_{k_y=0}^{N-1} F(k_x, k_y) e^{(j\frac{2\pi}{N} x k_x + j\frac{2\pi}{N} y k_y)}$$

### 空间的特征

### 60秒增强时相

### 动态增强扫描: 脉冲序列特征

### 顺序填充、K空间优先填充、K空间最后填充

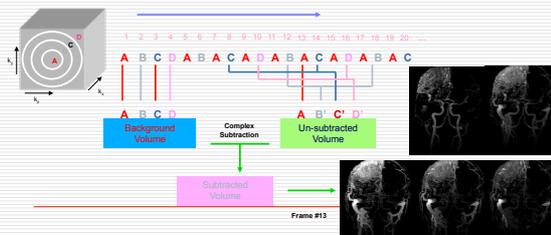
### 血管“三段论”的k空间填充设定

- 腹段：K空间最后填充
  - 在造影剂没有到来之前先填充K空间周围，造影剂充盈期填充K空间中心，紧接着完成腹部采样，进入大腿段，有利与抓住大腿段的动脉期
- 大腿段：K空间优先填充
  - 利用腹段节省的时间线完成动脉充盈
- 小腿段：椭圆K空间优先填充
  - 在静脉没有完全充盈之前结束椭圆K空间中心采样

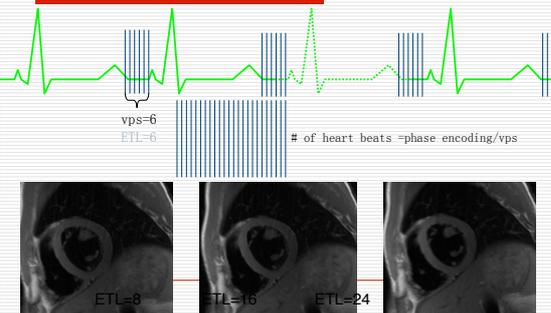


### Time-resolved MRA (动态MRA)

- 分时分段K空间填充
- Elliptic-Centric Encoding



### 分段K空间

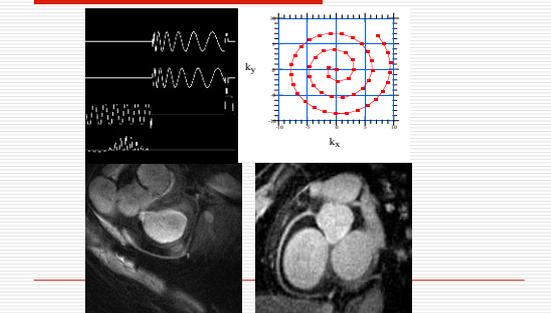


vps=6  
ETL=6

# of heart beats = phase encoding/vps

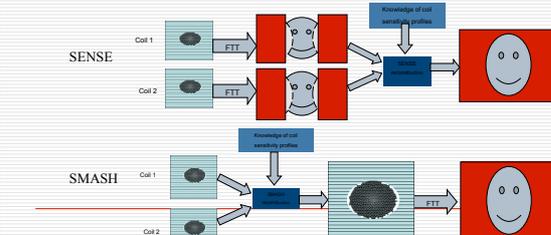
ETL=8    ETL=16    ETL=24

### Spiral K-space



### 多线圈并行采样技术

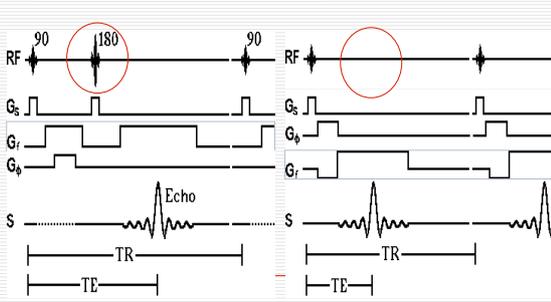
- 并行成像技术是将相位编码步骤分成2或更多组，由2或更多线圈同时各自独立进行K-空间采样，借助于各线圈的空间敏感度信息重建MRI图像



SENSE

SMASH

### SE与GRE



RF 90 180 90 RF

$G_x$   $G_y$   $G_z$   $G_x$   $G_y$   $G_z$

S Echo S

TR TE TR TE

### 不同回波的效应

- SE/FSE
  - 180°使脉冲使失相位的质子以原来同样的速度返回，组织磁化率差别导致的局部磁场不均匀被补偿，T2\*得到控制。
- GRE
  - 局部组织磁化率差别是恒定存在的，重聚梯度不能补偿或者反转磁化率差别，局部磁场不均匀持续存在，加速T2弛豫。

### 更多的应用：SWI

Susceptibility Weighted Imaging

### 由SE到FSE

准备脉冲: 反转脉冲, 饱和脉冲, T2准备脉冲

激励脉冲: 自旋回波, 梯度回波, 刺激回波

数据采集: 单个回波, 多个回波, 平面回波 (EPI), 非线性采集, 2D&3D

磁化恢复: 扰相梯度, 恢复脉冲

IR-SE, IR-FSE, FLAIR, Sat/Fat, SE, FSE, FSE-Radial, SE-EPI, FrFSE(Restore)

### SE-EPI, GRE-EPI

Spin Echo: 90°, 180°, Phase, Frequency

Gradient Echo: Alpha Pulse, Phase, Frequency

Spin Echo EPI: 90°, 180°, Phase, Frequency

Gradient Echo EPI: Phase, Frequency

### 不同序列的效应

- FSE-T2WI, SSFSE-T2WI, EPI-T2WI
- 使用较长的ETL或者多次激发可以减轻磁敏感效应

### 当场强由1.5T升高到3.0T!

### 场强提高的效应

- Boltzmann statistics:
  - $N_-/N_+ = e^{-E/kT}$
  - 宏观磁化矢量 (Mz)
- E: 两种状态的能量差别;
- K: Boltzmann's 常数 =  $1.3805 \times 10^{-23}$  J/Kelvin;
- T: 绝对温度

高能态      低能态

### 3.0T固有优势: 高信噪比 (SNR)

- 理论上SNR提高2倍

3T      1.5T

### SNR提高后.....

- 在保证相同的图像质量情况下
  - 提高空间分辨率
  - 提高时间分辨率
  - 提取更多的信息
  - 扩展应用范围

### 2D/3D CSI

- SNR增加
- 显示减小体素, 降低部分容积效应, 波谱分

### 提高空间分辨率

### 颈动脉斑块成像

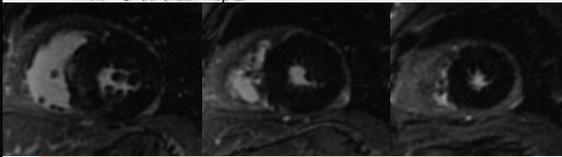
3T      256\*256      256\*256

512\*512      512\*512

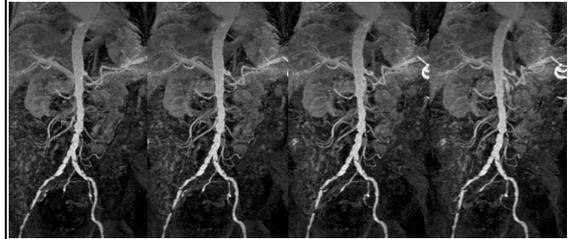
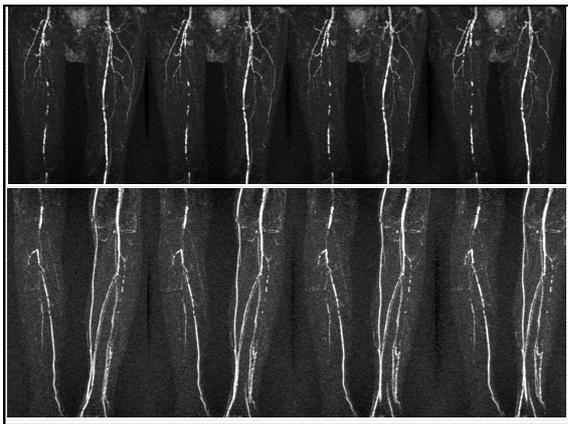
**缩短扫描时间**

□ 心肌延迟强化扫描@3T

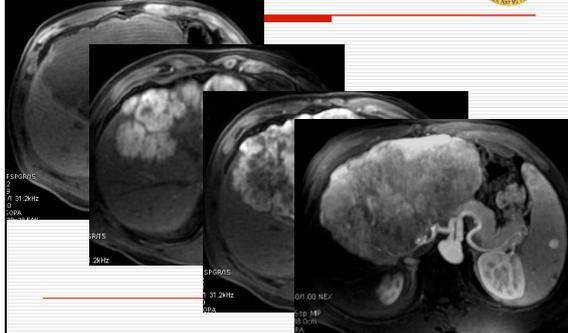
- 与1.5T比较, 保持其他参数不变
- NEX由2改1
- 屏气时间缩短1/2



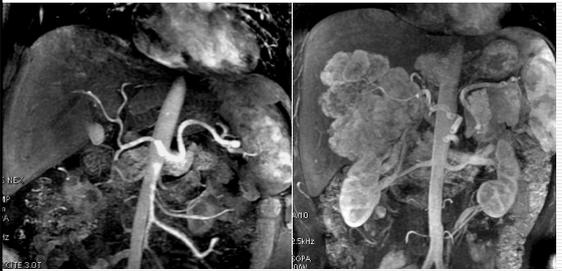
**3 station MRA @3T**

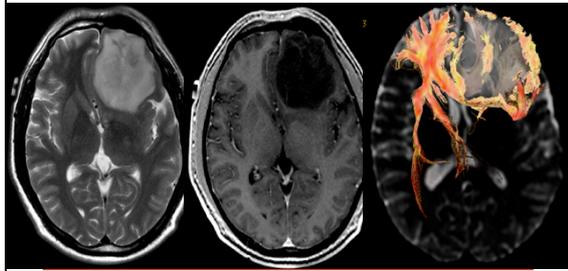
**腹部: 多时相增强**



**腹部: 高分辨扫描**



**更多的应用: 神经系统DTI**



### 更多的应用: T2 Mapping

Cartilage Imaging

### 大鼠动物实验@3.0T

### 化学位移的效应

由于周围的电子云分布差异, 两核的磁场环境不同, 共振频率发生变化。

### 化学位移

- $\Delta f = \text{freq encoding} \times 440\text{Hz/pixel} \pm \text{RBW}$
- 水和脂肪的频率差别3.5ppm
- 220Hz@1.5T
- 440Hz@3.0T

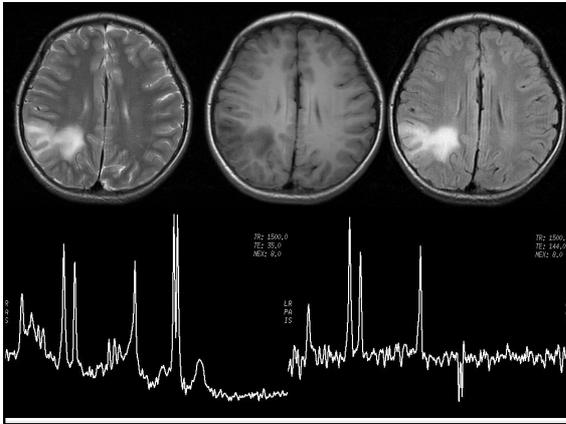
$$\Delta f \propto B_0$$

### MR Spectroscopy

CH<sub>3</sub>CH<sub>2</sub>C(=O)OCH<sub>3</sub>

### 化学位移增大, 信噪比增加, 分辨更多的化合物

- TE 35 TR 2000
- TE 144 TR 2000



### 相位差别的应用, Dixon法水脂分离

**@1.5T**

- TE=0 相位一致
- TE=2.2ms 相位分散
- TE=4.4ms 相位一致
- TE=6.6ms 相位分散

### CSI: lipid content

### In/oppose phase

- 脂肪组织的弛豫率与脂肪提出物类似;
  - 脂肪分子属于中等分子,  $T_c = 10-7$ 秒: 短T1;
  - 疏水基团, 各向同性转动: 长T2
- 当脂肪细胞和一个器官组织混在一起时, T1弛豫具有双向性, 疏水特性使水和脂肪分子隔离, 导致局部磁场不一致, 用Dixon方式可以区分。
  - 脑内脂质为磷脂, 属于极性脂肪
- 顺磁性物质

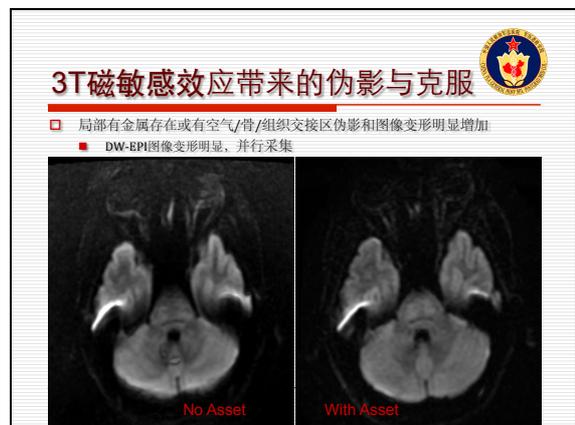
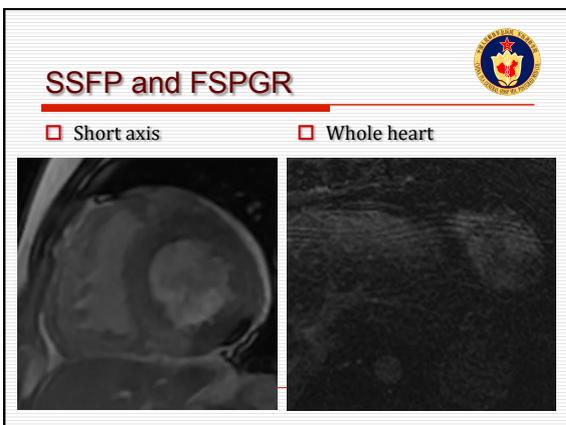
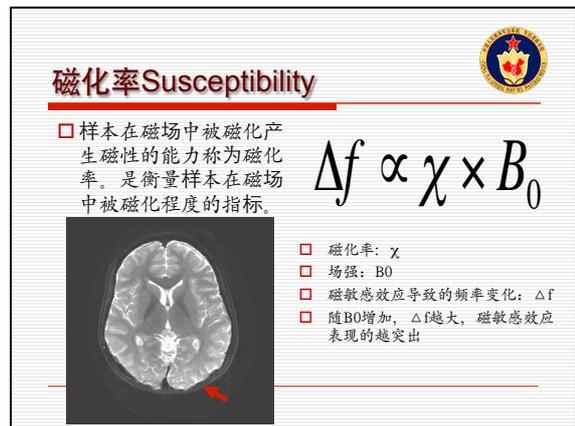
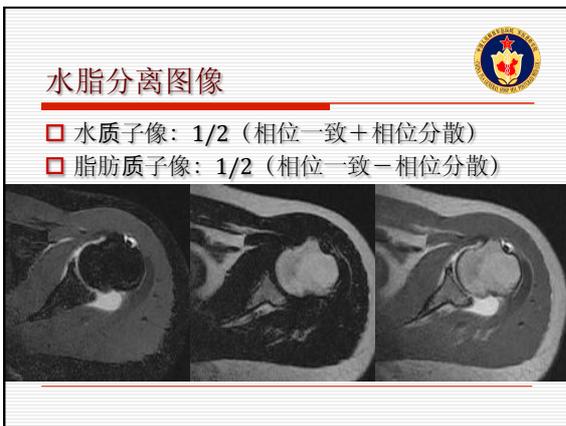
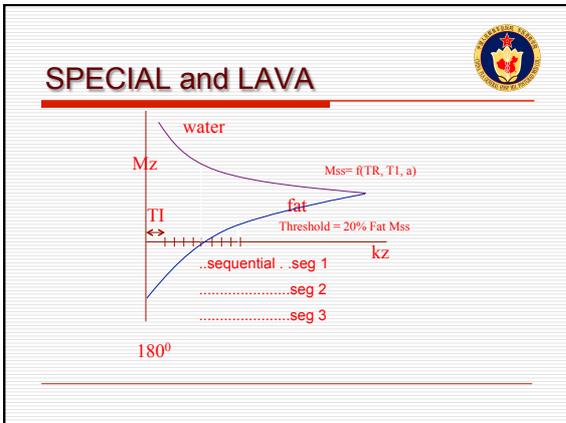
### Chemical shift @ 1.5T and 3.0T

**3.0T**      **1.5T**

### Increase RBW

RBW = +/-16kHz  
Chemical shift = 1.76 pixel

RBW = +/-32kHz  
Chemical shift = 0.88 pixel



### 3T磁化率效应在fMRI的应用

- FMRI (BOLD)由于局部血液中含氧血红蛋白增高,利用局部磁敏感效应的改变而成像
- 在3T上对与兴奋有关的信号改变的敏感性更高 1-2% @ 1.5T, 4-8% at 3T
- 可以进行更高的空间和时间分辨率成像

### 3T磁化率效应在灌注的应用

- 3T
- 8.0ml bolus
- 1.5T
- 16.0 ml bolus

### 电介质效应 dielectric effects

电介质效应和物质本身的特性有关,介电常数越大,对外电场的干扰越大。场强越高,外电场越强,诱发的电极化强度越强

### 电介质效应 dielectric effects

3.0T      4.0T      7.0T

### 电介质效应 dielectric effects

At 1.5T (63.86 MHz)  
 $\lambda_0 = 4.68m$   
 Tissue  $\epsilon_r \approx 80$   
 $\lambda_t \approx 52cm$

At 3.0T (127.72 MHz):  
 $\lambda_0 = 2.34m$   
 Tissue  $\epsilon_r \approx 60$   
 $\lambda_t \approx 30cm$

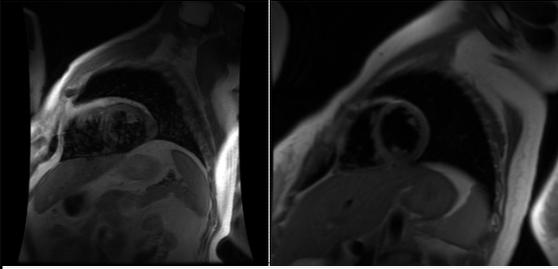
Permittivity is also a function of frequency!  
 Comparable to body dimensions ☹

### 电介质效应 dielectric effects

射频脉冲在人体内分布不均匀引起的

介质名称	介电常数	介质名称	介电常数	介质名称	介电常数
空气	1	干燥淀粉	2.2	湿沙	15~20
聚苯乙烯颗粒	1.05~1.5	石膏	1.8~2.5	氨	21
洗衣粉	1.1~1.3	食用油	2~4	胶乳	24
液态煤气	1.2~1.7	粮食	2.5~4.5	乙醇	25
塑料粒	1.5~2	干燥沙	3~4	炭灰	25~30
玻璃片	1.2~2.2	沥青	4~5	矿石	25~30
奶粉	1.8~2.2	水泥	4~6	丙醇	20~30
汽油	1.9	甲醛	5	甲醇	30
环乙醇	2	异氰酸脂	7.5	甘油	37
柴油	2.1	丁醇	11	水	81

### 电介质效应 dielectric effects



### SAR

$SAR \propto B_0^2 \times B_1^2 \times \tau_{rf}$

- 同样扫描条件下3.0T的SAR是1.5T的4倍
- 大大限制了RF在人体所允许的沉积量
- 进而限制扫描层数



### SAR值的控制

- 短梯度线圈:**
  - 优点: 高性能的同时安全性使用范围广, 心脏扫描、血管扫描、EPI、FIESTA...
  - 缺点: 扫描范围小
- 长梯度线圈:**
  - 优点: 扫描覆盖范围大
  - 缺点: 安全限制无法使用高性能



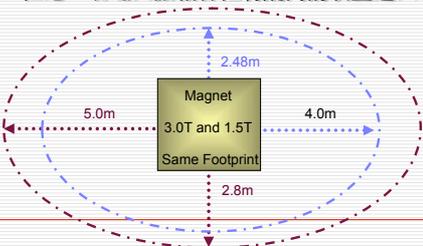
### 3T应用中还需要理解的问题

- 噪声和伪影也明显



### 3T 带给我们的安全问题

- 静磁场强度增加一倍
  - 杜绝一切磁共振相容性有疑问的装置进入。



### 3T快速切换的梯度场带来的问题

- 周围神经刺激
- 射频能量的蓄积
  - 严防患者灼伤
  - 高热患者绝对禁忌
- 噪音问题:
  - 患者的听力保护
- 金属异物、化妆
- 激光定位器
  - 避免眼睛损伤
- 保证与患者及时、即时有效的交流:
  - intercom system
  - Patient alert System
- 熟知各种Emergency button的位置及用途

### 3T MRI的特点

- SNR提高
- T1的变化: 生物组织的T1值延长
- T2的变化: 生物组织的T2值缩短
- 磁化率增高: 伪影与利用
- 化学位移增大: 伪影与利用
- 电介质效应: 伪影与克服
- SAR值: SAR值增高与“微波炉效应”
- 安全问题:
- 开发与利用

### T1、T2值的变化与参数调节

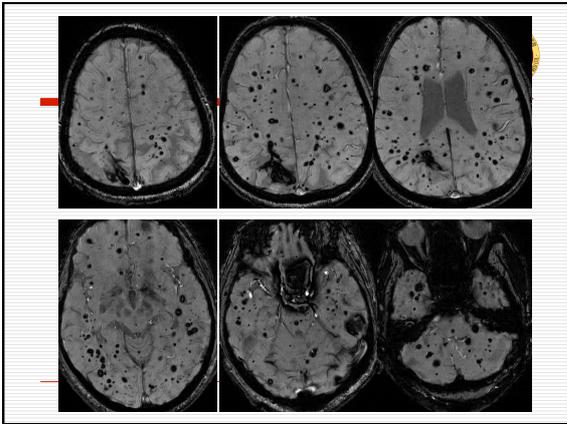
- 教科书
  - T1、T2值是物质的固有属性
- 实际应用中
  - T1值延长
  - T2值缩短

### 一个哲学问题

---

### 女性, 54岁, 反复发作性头痛

- 一个哲学问题: 看不到就是不存在?



谢谢您的耐心!

程流泉  
[Cheng.Jiuquan@gmail.com](mailto:Cheng.Jiuquan@gmail.com)  
 13910209982