Capitulo 1 MAGNETIC Book AGUNG MRI: uma visão geral

MRI: uma visão geral

- Tópicos desse capítulo
 - MRI: o nome
 - MRI: um breve histórico
 - MRI: equipamento, efeitos fisiológicos e aspectos de segurança
 - Visão geral dos conceitos de MRI

MRI: o nome

- MRI: Magnetic Resonance Imaging
- Imageamento de tecidos moles e processos metabólicos
- Características:
 - Seguro, não-invasivo, permite estudar forma e função
- MRI deriva de NMR: Nuclear Magnetic Resonance
 - *Magnetic:* uso de campos magnéticos
 - Resonance: ajuste entre as frequência de excitação (pulso de RF) e de precessão de spins de alguns nucleos
 - Nuclear: refere-se a spins nucleares

MRI: um breve histórico

• (1933) Isidor Rabi: ressonância magnética nuclear

(A)



Figure 1.10 The determination of the magnetic moment of the lithium nucleus by Isidor Rabi (A). The beam technique devised by Rabi involved passing a beam of gaseous nuclei through several magnetic fields (B). The key innovation introduced by Rabi was an oscillating electromagnetic field (Magnet 3). If the oscillation rate was equal to the resonant frequency of an atomic nucleus (at the current strength of the static magnetic field), the spin of the atomic nuclei would change and then the subsequent magnetic field (Magnet 2) would deflect the nuclei away from the detector. Shown in (C) are data from Rabi's experiment, in which he kept the oscillation rate fixed and changed the current in the static field magnet to modify its magnetic field strength. He found a sharp reduction in beam intensity at about 116 amperes, allowing him to calculate the spin properties of the lithium nucleus. (A ©The Nobel Foundation.)

1946: Felix Bloch (Stanford) e Edward Purcell (Harvard) descobrem ressonância magnética em sólidos e líquidos (prêmio Nobel em 1952)

Figure 1.11 Nobel laureates Felix Bloch (A) and Edward Purcell (B) shared the 1952 Nobel Prize in Physics for their simultaneous but separate discoveries of magnetic resonance in bulk matter. (©The Nobel Foundation.)



- 1950: Erwin Hahn descobre os <u>spin echoes</u>
- 1950-1970: RM é desenvolvida e aplicada para análises físicas e químicas

- 1971: Raymond Damadian mostra que os tempos de relaxação de tecidos normais e tumorais são diferentes, motivando aplicações médicas
- 1972: Damadian pede registro de uma patente





 1973: surge a tomografia computadorizada (CT), introduzida por Hounsfield 1973: Paul Lauterbur demonstra, pela primeira vez MRI, usando técnicas de retroprojeção semelhantes às utilizadas em CT e a técnica de gradientes (*Nature*)





Figure 1.12 The first MR image. The physicist Paul Lauterbur used a series of spatial gradients to take a succession of measurements of a beaker containing two waterfilled test tubes (A). Data collected under each gradient provided different information about the object. By combining

this data using projection methods, Lauterbur was able to reconstruct the spatial organization of the object (B). The resulting picture was the first magnetic resonance image. The use of spatial variation in the magnetic field set the stage for modern MR imaging. (From Lauterbur, 1973.)

• 1976: Peter Mansfield e colaboradores publicam a primeira imagem via MRI de uma parte do corpo: um dedo



 1977: Peter Mansfield desenvolve a técnica de echo-planar imaging (EPI)



Figure 1.13 Nobel laureates Paul Lauterbur (A) and Peter Mansfield (B). Lauterbur and Mansfield shared the 2003 Nobel Prize in Medicine for contributions to the development of MRI. Lauterbur was cited for his introduction of magnetic field gradients, which changed the spin frequency of atomic nuclei over space and thus allowed recovery of spatial information. Mansfield was recognized for his development of echo-planar imaging methods, which allowed rapid collection of images. (A ©The Nobel Foundation; B courtesy of Lisa Gilligan, University of Nottingham.)

1977: Raymond Damadian produz um MRI de corpo inteiro





(A)



(B)



Figure 1.14 The first MR image of the human body. Raymond Damadian and colleagues constructed an early large-bore MRI scanner, which was called "Indomitable." Larry Minkoff, a postdoctoral fellow in the laboratory, was the first subject from whom data were recorded (A). The resulting image of his chest (B), while primitive by modern standards, shows the heart, lungs, and surrounding musculature. (A from FONAR corporation; B from Damadian et al., 1977.)

- Pós 1980: grande desenvolvimento técnico e produção industrial
- 1982: GE \rightarrow primeiro sistema comercial de 1.5 T
- 1992: surge o functional MRI (fMRI)





Prêmio Nobel de Medicina de 2003



Paul Lauterbur







Peter Mansfield

This Year's Nobel Prize in Medicine



The Shameful Wrong That Must Be Righted

This year the committee that awards the robel trize for physiology or medicine that the one thing is has no right to do, is ignored the much aminene sciencises, leading medical sexchooks and the historical faces are in disagrammers with the decision of the committee, so is the U.S. Patents office, even Alifed wobelts will is in disagneement. The comminer is memping to rewrite history.

The sobel prize commisses to physiology or madicing those to award the prize, not to the madical donor, research sciencise who made the breakshrough discovery on which all same sectorology is based, but so two sciencists who later made technological improvements based on his discovery.

WHAT EMINERT SCIENTISTS AND AUTHORS SAY

There shared is hare that the NateWorkship the approxity because to painted that the willing to contact documented extension (11970) for the that decomposite material of and Tableton difference document by the painted and the control and Add Ministry (111) and Tableton (111). The for a start of the sta Atlicen Shile Briversh, Best Lendre, Alletton

"W any asiang diagoning terming and the integration line with an Angel Antegration M.D., ter Withow Shiel Part in Pathology a Madice Million entre devicament ech an the tractifie of Dentreferst devocer of Milliporter extension defenses anaropianets' activitation faither and the party of activity of Milliporter effects in the Angel Angel and State Heckine, Dahrweither Semice Professor, Sil VI Dometrie Heckel Center

Yanyar dar Ackel va Mackaler's Anzel 🛶 🗉 Adam Parasakan, 🖻 🕽 , Qial, Jackendor of Predad and Shedrani Eblere, Kakaral Institute of Child Health, Habizzal Institute of Bealth,

Phanistan internativicania, akay ali yarazay kinis, io azai ili ono a sui; azi internativizipi internativizipi mina dati o finaziliane pakat uto bendi dily kanyar bendur. lagast krayest densalalanyih deliyide bershajaryast bolut "— Deli 1. Stric, 10, R42, carelin, be'uthilin 100 belani, Atgenti desame duging filida, Tini Balim, 1977 Talende kontas og dep depaktualisioning i behåde astrikeldeler i nagter her di pase a HD... Milas alpspiraristy hafter ha tegne alpspiraristy exercitant subgraaf da algeraaf of HEE "--- lande licitum, caranter of the besk De Academical HEE der Hegenit: Academical HEEE ("--- lande licitum, caranter of the besk De Academical HEEE der Hegenit: Academical HEEE ("---- lande licitum, caranter of the besk De Academical HEEE der Hegenit: Academical HEEE der Hegenit: Academical HEEE der Hegenit: Academical HEEE der Hegenit: Academical HEEE

Boxes and Pitros Candellos Urisentin Parts, 20081

WHAT THE HISTORICAL FACTS SAY*

- K20 Peopel is in inmain to list invig-stand or 16 (reputs second box space
- 1990 Cenator ministrationary for materia (Riccone parties) is sharen adamifectivene interviente Riccone parter (Interviente Interviente inderspect federalised in the Band State of the second to the end of the second state of the second se
- Nexts KWI Construints das his skazen of halfd some spells publikativita-journi Serae.
- Sense KW1 Bala W how sharek-contracting of a supply formation
- er, KM Ladebu die Constein 1971 Steve open in finistein wer wildeling für der ein "Ladebu die prozestudion mappilipadiet in stelle sollte vollen in der die einer wie erk.
- Sect KW Constraints to MAU gening point with its 1.5. Phot Olias sing Red course of its response to depind 11 and 20 a sources to detertions of its point deviation institution within the institution of the source source source of the source source source of the source sour
- Or , INV Looks have a solid bushes a 3-domain of an impair of the local states. The spaint 3-domain in the spaning on applied absenue it by they.
- Nexts 1993 Louiston's 20 cour is political inlines. Recently disp Terredical "places" sublice applicing the is coupler that is did't have exceptioner.
- 1004 Conseq: Comel and (Research publishes method for a Chimanalans) and
- 100 Consistent awarder, Schelling Beieff Julia India Verse, elicities al Indentatio entracionale line lingued its tense bat alcular-contegration of Physics.
- KAO Complexed its property test, fee Separate, Index (which provide III) perce-
- KW High East in 1.5. Print and 1.5. Spans Carl edites Remain (1977) plast, adminisphisphilip ray lookidus entraveligited at BR spanse are Remain (11) on 10 to easy imposing a Canadari (1971) data way.

WHAT THE U.S. GOVERNMENT SAYS

nivel Status Separate Court Separate Court of time Stiplic out on Relative Address with stip Courter Institution (1977) We assuring an And Restant of the Initial States in 1920 Protot favoral Response to Electrony provided and a factorized on the Initial States in the Initial Response to Electrony and a state of the Initial States of the Initial States in the Initial Response to Electrony and American States and American State American States and American State

anied Sindow Parket Chillio Raymont Concentration, moder rolling Mic concentrating to Lindonich in 1997 into the Robert Chillion Antonic Michael States Televille States Confinement Residenter 75 difference: buil to Reproved Decoefficience/group/area legited into the Endinesian Institution in 1985

WHAT ALFRED NOBEL SAID

(b) bit (First Schward, Specificial specificians) is not be bit specarale ", ...bit law main its not insplice downer yields in denticed dyning is condition..." Superface of Manney' and down of addition is not insplice and the specific downer with the object bit is not been bit addition in a direct bit way. The specific downer with the object of the specific downer with the object bit is not been bit addition in a direct bit way.

WHAT THE HOBEL COMMITTEE SAID

a cancel be made in the per 2000 hit	t pr to Peul Iouhelour and Refer (Berefield)" for their di	" priperior commercianção primeiros pel espec	"Nutdement is adulatede entrepresentation to realise shallow	os basé on Nebel Jaell Theorem d
starmstal charmle or cilled by Sciol	. 'b lionalar nadelte di creny – Ad anneller	a malasina filian tan simulash shikin ing	si ila edeller bledteld lympticenne 🕅	

Obviously inexcasable damagend of the much has led the committee to make a decision that is simply outrageous. The Nobel charter allows for three people to be named for the prize. There is no excase whetever to exclude De Hayne of Damadian.

The essence of science is allogiance to the truth. The last institution that should dissegued the truth is the one that considers toolf the arbiter of scientific achievement.

The Nobel Prize Committee for Physiology or Medicine has diagraphed itself. The only way to right this wrong is for the

committane to correct its error.	will factorie public second, consider a midelle on sequenz, contracta, cubier, etcese-press. Remain Comp.		
HAT CAN BE DONE?	TO: The Nobel Prize Committee for Physiology or Medicine Der Beden offe Hold Constant In IUI Heat have plan. (Weishweite port Ministrie Physings or Medica statisticale Regime Description		
near open per portents are encouraged to add your relation to the range tagging of the pictures, recently, and and we way			
o an expressing their cetrage at this doctsion.	lee		
a to the Nobel Prize Committee for Physiology or	illa		
lites to ensure that this charmful wrong is righted	Cay Bata Egitab		
re the oversit are preserved in Deserver.	Helin The Rob-Constinue to Physically in Robins (Edd Frame, In: 2013) - VII. P. Smithain, Fander: E-Rob to an (Constraint) and (Constraint)		

NY Times 08/10/2003





Proof that this shameful wrong must be righted:

The two winners acknowledge that their work grew out of Dr. Damadian's prior discoveries in magnetic resonance

The following recount of the events in the development of the MRI is quoted from the book A Machine Called Indomitable by former New York Times reporter Sonny Kleinfield, published by Times Books in 1985*

n a second effort to right the sharedial wrong that has been done to Raymond V. Damadian, M. B., by his exclusion from the Nobel Prize for he development of the MRL we present the words of the two winners, revealing how their achievements are based on the landmark discoveries made by Dr. Damadian.

THE CHAIN OF EVENTS BEGINS

in his office at Johns Hopkins University Hospital, both his lago outsteelched, Dovald Hollis put astde Duradian's 1971 Sciwices article on NMR and solled its fundamentals over infra-Service and/o to Aver, and contribution that and that of a form which. Holds that a happy, go-k-kly volce and the sit of a form duration. The new a multical researcher, cought up in AML, apportion of bidogical systems, and he cought paralesed and document of the line of the line of the insertible first. Say choose of the in the first in the base that neutrane that Dannaharin's step into the unknown was specify to the up scene engines in Ralimore, Marg hard, where Holln newlard. Arroug the molical students who weeked with tim new a particular complexit individual scenario (passes theorem to [42"). "When a service in individual scenario (passes theorem to [42"). "When a service is individual scenario (passes theorem to [42"). "Men-tarian scenario (passes) and passes theorem to (passes)." (Men-tarian scenario (passes) and passes theorem to (passes). (Men-tarian scenario (passes) and passes theorem to (passes). Economics deformined further would test Damadaria muchs and, fither proved corner, explore the subject further. At that The second const. appear to adjust the angle of the argument of the second const. appear to be adjusted for a gas-ments on the own WR marker. The second is the second se

time of robins a pair licens, a mortanerros, tory - robo y car old charaithteppined to be interes in hose are to physical and card robe in the dardopward of NARR imaging in medicine. After he near discharged from the Army, Ladoffaurfehlm-ward-ad to contigue doing NAR words, since he saw it as a valuable

of to contrast doing NWE work, study to sure it an available that gaps are a frame in our in understanding beam of other in a larger tisk. The paper, as it was influe absoluted are parallel. Startle had addituded frame appeared base of the paper, as it was influe absoluted are parallel. Startle had addituded frame appeared base of the paper and the startle paper and the startle parallel and the parallel. Startle had addituded frame appeared base of the paper and the startle paper and the startle parallel had addituded in the parallel had addituded additude of the paper and the startle pa

Dr. Lauterbur, in his ownwords, credits Dr. Damadian

Lauterbur remembers the events well. Helpad soors some of

Landow ensubarshie overhendt, teistal som samed her ensigh sjörste der ein far alle Dereman, sind levest her ensigh sjörste der ein far alle Dereman, sind levest her geschlichte er ein far alle Dereman, sind levest her geschlichte er ein far alle Dereman, sind levest her geschlichte er ein far alle Dereman, sind levest her dereman sind berechter er ein far alle dereman sind her derekte beiter ein konsten im eine einer ein



ale images....And I got to thinking funturaryons field gradients provide a gener-al solution to this prob-

comes, no labiling atom mark more than that is uncommune open. I think it was common lowedling at this time, at least throughout New Karsington, that it ap Damadan mented to shall people in NMR methanol. The final developed of at his identical in wave grant geopeneous, methods them in a lefter to Prostlent Nicon, and informed a paraboli of the plan...

presentation the sense is . 1973, some encoded magnetic along with the lint MAR langue ener mode. Achieved on a con-vertional MAR device that theil have somewhat modified for the paperse, fusing grows of two key takes of order in mersel.

the second test of the second study of readjoint shows, never have been shown to give proben inclusion required, resonance signals with machineger water spin-ballicensis, action from their these is the corresponding neural times." Have eyes 1 patienter adjustices into reference Deparkarys. paper, but other some subsequent separations performed by several other sessendners that correlocated what Dancalout

4 di seen neidi i you coli i conservata accutiti; "Here tean idiligi alcutanche le conservata accutiti; "Here tean idiligi alcutanche le conservata accutiti i tean en accutation i la conservata accutation i accutation accutation

Dr. Mansfield, in his own words, credits Dr. Darnadian

al ushten to this prob-lin a office scorn in the physics department at the University of Notingtons, a wary-fasted professor round. New The next key he areb-Maniked set key or ore memory in a 1972 to date a suppl The next term errors wanned and new over comparing the 1972 to derive in oper Held down in indications, are expering collected by Alan Carnese, a productional area gradients in a tran uptal, date of this, and Peter Grawell, a research statistic in its hat, addressel, angusting in They lead appoints to finade at. The term had been date, and by ratio Hill it could replicit and origin substances, and they new bearing statistic term of the term of the statistic devices substances, and they new bearing statistic term of the term of the statistic devices substances, and they new bearing statistic term of the term of the statistic devices substances, and they new bearing statistics. also MR impresto a bit of agrees hat had educated the intertal that were

be love of the body and therefore serve as an application - toposticide people in the bin An Marylidd gain II, "We

be a constrained for body and therefore now as competition of normalies results. It is about the isothermapication probability of the start of the isothermapication of the isothermapication probability of the start of the isothermapication of the isothermapication constrained and the isothermapication of the isothermapication

The Nobel Prize for Medicine allows for threew inners

There is only or esubstantial hope that the Nebel Assembly will change its mind and include Raymond Darrachas in this year's Nobal Price for Matkine. The hero simples must put the in the of discovery list, step forward and insist that he be included. The award allows for three nineary. These is abachaday re-

renor to escale Dr. Duradou and silling preprior the shanelow rearg that has been done to a main who is, because of its ballout mind and indentiable spirit, one of the greatest integenetic toos of patients would wide and the integeners note deserves to be reactionly inpaced by a patier committee or by anterselat.

The time has come, not only for great science, but for great-ness of character. It's time for one and all to relegate any deputer cell-rell to the past, so all treve may share the award for their mutually distantial contributions to the development of the NRI, and people all over the world may stee the evening of its presentation of the average weldelight.



1602 - Presal le Callender le finitierie surgesti es Milesenie sugeravitet

 M_{1}^{2} — Reds equiving a system of the local quark forecase. (a solution for the second legelei von engis theda (the sites hiever) and interest and the in it and site of the site of the site interest is index and forget deduce and links and a start and igner (alle) for fil al Costrater), what allest pure annote to see of our pairs (and North IVI - Jungley) with deal to denote this II more and a philosom in

K(r) W^{1} -location interaction for each last W , which is a state which for W^{1} -location on the state. Additional to the last W -location of the last W -loc

editeration, est dense in the import in interfaces, any est (spaties), (KY, rise), (KY) - (spaties) and its approved in the fact and the interface interpreter in a transmed all spatial, for the spatial spatial (D. Remains disc method like) it (par. RI), for the spatial spatial (D. Remains disc method like) it (par. RI), for the spatial spatial (R).

HOW YOU CANHELP RIGHT THIS SHAMEFUL WRONG 36 No. Saked Vice Lowest to for Significance Heddates Desc Readers of her Held Generatives The MDP test Human Just 1 (Moleiner for per Held Vice for Physicage or Belles cheld in July 20 (Strendstreader)

Radia The United Spacetime in Equilation (Tables), and the STA STATE of the STA STATE (Section 2018) - 111 Without States - Headles and States in the State of the States of the States

Express Your Celling e, Hew. Peol for by Knobs of Reported Remotes

It's time for the two winners to help right this wrong and insist that Dr. Damadian be included in this year's Nobel Prize for Medicine "I Wilyley Relid Longenter, after lost for ministry press. "Visit, be layer



Mite to: To Nich Counting for Againing or Med English, Nich Forum, Ec. 200 SE - 171, 77 Stability, State 🛛 🗧 👫 🖬 The sarge met policies. Or or E. 171 Adda - SE 423: 44 + 171 - Adda - SE 423 many second in technologies from a subsection of the State and State my differentiation in a familie i fame. Of the fee fame is 101 - 14 there fare instance fame fame in the famile. OR

does to mp lizzont and possi-

Poid for by The friends of Enyment Damedian

Figure 1.15 An example of an earlymodel scanner. (Courtesy of General Electric Medical Systems, Waukesha, Wisconsin.)







MRI: equipamento, efeitos fisiológicos e aspectos de segurança



MRI Scanners

- Três componentes principais (geração de imagens):
 - Campo magnético estático (B₀)
 - Bobinas de radiofrequência (B₁)
 - Bobinas de gradiente
- E mais...
 - Bobinas de Shimming (homogeneidade)
 - Computadores robustos
 - Equipamentos para monitoração fisiológica
- Questões de Segurança
 - Efeitos fisiológicos dos campos
 - Efeitos psicológios: claustrofobia, ...
 - Ruído





Campo Magnético Estático (B₀)

- Primeiros scanners
 → magnetos permanentes
 - Campo magnético fraco
 - Problemas com homogeinização
- Magnetos Resistivos e Supercondutores
- Dois aspectos fundamentais
 - Homogeneidade de campo (convencional: 10 a 50 ppm)
 - design e densidade de espiras otimizados
 - Intensidade de campo
 - Potência (alta x baixa)
 - Magnetos supercondutores (Nb-Ti)
 - Refrigeração criogênica (He líquido)
 - Custo (alto x baixo)
 - Campo sempre ligado → segurança
 - Humanos (1 7 T), Animais (até 20 T)



Bobinas de Radiofrequência (B₁)

Bobinas transmissoras e receptoras

- Excitar a amostra e captar o sinal
- Por causa da faixa de frequência \rightarrow bobinas de radiofrequência (fig)
- Sinal → excitação relaxação recepção
- **B**₁ uniforme e alta sensibilidade na detecção
- Bobinas de superfície ou de volume (fig)
 - Depende do interesse por regiões específicas ou todo o volume (fig)
 - Bobina de superfície: maior sensibilidade local falta de homogeneidade
 - Bobina de volume: *birdcage coil* menor sensibilidade, maior cobertura
- Otimização de resultados → Phased Array
 - Bobina de volume para excitação e um conjunto de bobinas receptoras















Bobinas de Gradiente

- São utilizadas para localização do sinal → imagens
- Introduzem alterações controladas em B₀ em 1-D
- Assume-se B_0 no eixo z, sendo x e y perpendiculares
- (A) *Maxwell pair*. campos opostos \rightarrow gradiente em z
- (B) Golay pair. gradientes nas direções transversais
- Intensidade do gradiente \rightarrow potência 5 do raio do *bore*
- Aspectos importantes \rightarrow linearidade e intensidade





Bobinas de Shimming

- Em geral, o campo estático não é homogêneo e os gradientes não são totalmente lineares
- As bobinas de *shimming* introduzem campos compensatórios para corrigir inomogeneidades
- Para isso, combinam termos de ordem mais elevada (p. ex. proporcionais a x, x², x³, ...)
- Tipicamente as correções chegam a 0.1 ppm
- Campo magnético da Terra \rightarrow 0.5 Gauss (1Gauss=10⁻⁴ T)
- Em RMf, o shimming é feito para cada cabeça específica, no início da sessão experimental

Computadores – sequências de pulso



Sistema de Controle Experimental

- Sistema para gerar os estímulos experimentais
 - Comandos, imagens, palavras, sons, ...
 - Usualmente isto é feito através de projeção em tela
- Sistema para registrar reações
 - Sistema de botões, joystick, ...
- Sincronia entre apresentação dos estímulos e a aquisição de imagens
- Preocupação básica: nada disso pode interferir com os campos e com a geração das imagens

Equipamentos para Monitoração Fisiológica

Registros fisiológicos durante MRI visam:

- Controle de pulsação, respiração, CO₂ exalado, condutância da pele
- Monitoração do estado do paciente sob exame

Registros fisiológicos durante fMRI visam:

- Registrar os "ruídos fisiológicos" → imagem
 - P.ex.: o volume de ar nos pulmões pode afetar o campo
 - Esses ruídos são utilizados quando da análise dos dados
- Estudo da relação fisiologia e cognição → informação
 - Nível de "excitação": diâmetro da pupila ou condutância da pele
 - Posição e movimento dos olhos -> atenção

MRI: Aspectos relativos a segurança

Os exames de RM são muito seguros, porém...

Situações de risco podem envolver:

- Efeitos do Campo Magnético Estático (B₀)
- Efeitos dos Campos de Radiofrequência (B₁)
- Efeitos dos Gradientes de Campo
- Ruido Acústico
- "Efeitos Psicológicos"

Efeitos do Campo Magnético Estático (B₀)

- Não há registro consistente de efeitos danosos do campo magnético estático
 - FDA aprova uso regular de *scanners* até 4T para humanos
- Cuidado com o "efeito projétil" → fig
- Objetos metálicos ocultos → fig
- Efeitos magnetohidrodinâmicos
 - Em geral, esses efeitos são fisiologicamente insignificantes
 - Possível exceção: tecidos endolinfáticos do interior do ouvido
 - Sensação de náusea e vertigem em alto campo (4-7T)
 - As pessoas devem introduzidas lentamente no scanner








Efeitos dos Campos de Radiofrequência (B₁)

- Aquecimento resistivo do tecido induzido pelos campos
 - Mais importante na superfíce e extremidades, mínimo no centro do corpo
- Fatores determinantes: frequência de RF, tipo de pulso de RF, TR, tipo de bobina de RF (usualmente Pulso de RF ~ 100 MHz)
- A absorção de potência de RF por tecidos é medida em termos de SAR (Specific Absorption Rate) → Watts/Kg
- Imagens da cabeça \rightarrow 3.2 W/Kg
- Sistemas comerciais só operam dentro de limites seguros
- Cuidado: P&D em bobinas e novas sequências de pulso
- Certas sequências (FSE, MTC) podem ficar entre 4-8 W/Kg

Efeitos dos Gradientes de Campo

- Principal problema: gradient switching \rightarrow correntes internas
- Slew rate: dB/dt → tabela
- Não tem problema de efeitos térmicos, mas...
 Pode induzir: sabor metálico, *magnetophosphenes*, estimulação nervosa periférica e contração muscular
- Origem física: lei da indução de Faraday
- Posicionamento: evitar loops
- "Efeitos de borda" são mais pronunciados → fig

Gradient Performance

Trio

General

Performance per Axis	
Max. Amplitude	40 mT/m
Min. Rise Time	200 µs
Max. Slew Rate	200 T/m/s
Effective Performance (vector addition of all 3 gr	adient axes)
Max. eff. Amplitude	69 mT/m
Min. eff. Rise Time	200 µs
Max. eff. Slew Rate	346 T/m/s

Peripheral Nerve Stimulation





Why does EPI make so MUCH noise?

Strong, Static Magnetic Field

Current pulse to create gradient fields



Together, these produce mechanical forces on the coils that create the gradient fields; so the coils move.

The result is acoustic noise.

Acoustic Noise .. and how to avoid?

- passive damping ~ 10 15 dB
 - acoustic insulation
 - more mass & stiffer
- encapsulation & vacuum ~ 20 30 dB
 - cooling
 - MRI system becomes longer
- "active" damping ~ 20 dB
 - avoid mechanical / acoustical resonance



Current FDA Criteria for Non-significant Risk

- Field strength < 4T
- SAR < 3 W/kg averaged over 10 minutes in head
- SAR < 8 W/Kg in any 1 cc of tissue in head averaged over 5 minutes
- Acoustic Noise <140 dB peak and 99 dB average with ear protection
- No painful or severe peripheral nerve stimulation

"Efeitos Psicológicos"

- Sensação de aflição/ansiedade é comum em MRI clínico
- Isso pode ser causado por vários fatores: claustrofobia, elevado nível de ruído, restrição de movimentos, ...
- Essas sensações podem variar de leve ansiedade a um ataque de pânico
- Do ponto de vista experimental → movimento afeta a qualidade de imagem

Minimizar o desconforto psicológico

- Tratar os *pacientes/voluntários* com cuidado
- Dar explicações detalhadas de todo o procedimento
- Alojá-los no scanner com o máximo de conforto
- Dar-lhes o panic button
- Manter contato verbal



'OK, Mrs. Dunn. We'll slide you in there, scan your brain, and see if we can find out why you've been having these spells of claustrophobia."

Visão geral dos conceitos de MRI

Interação do spin do próton com o campo magnético

- MRI: baseia-se na interação entre um spin nuclear e um campo magnético externo B_0 (ver figura)
- Essa interação é descrita em termos do momento de dipólo nuclear μ (como um giroscópio ou um peão)
- Mais adiante, veremos que a frequência angular de precessão de μ é dada por $\omega_0 = \gamma B_0$ (γ é a constante giromagnética)
- Para o próton do H:

 $\gamma = \frac{\gamma}{2\pi} = 42.6$ MHz/Tesla

• Para 2 T $\rightarrow \omega_0 = 85.2$ MHz



Sistemas de Spins Nucleares Magnetizados

- Momento angular nuclear:
 - Núcleos com massas atômicas ímpares e/ou números atômicos ímpares possuem um momento angular → spin (J)
- Exemplos: ¹H, ¹³C, ¹⁹F, ³¹P
- Partículas subatômicas com spin possuem momento de dipolo magnético
- Atenção: spin e momento magnético são propriedades <u>intrínsecas</u> dessas partículas



Figure 3.1 Nuclei with nonzero $\vec{\mu}$ are regarded as microscopic magnets.

Exemplo de um <u>conceito errado</u> Núcleos (Prótons e seus spins)

Os núcleos ativos em RM se caracterizam por sua tendência a alinhar seu eixo de rotação a um campo magnético aplicado. Devido ás leis da indução Eletromagnética, núcleos que possuem carga efetiva e estão em rotação adquirem um momento magnético e são capazes de alinhar-se a um campo magnético externo. Isso ocorre quando o número de massa é impar. O processo desta interação é o "momento angular" ou "rotação" (spin)



Momentos Magnéticos Nucleares

- O "argumento clássico" de que o momento magnético nuclear origina-se por causa da <u>rotação</u> (momento angular) de uma partícula carregada (ex. próton) está <u>errado</u>!
- Exemplos: nêutron e elétron $\rightarrow spin = \frac{1}{2}$
- Spin e momento magnético de partículas subatômicas são propriedades intrínsecas, comportam-se de acordo com a mecânica quântica e não têm análogo clássico.

Momento Magnético Nuclear

Relação entre momento magnético e spin:



 $\vec{\mu}$: momento magnético ou momento de dipolo magnético

 \vec{J} : spin nuclear

 γ : razão giromagnética

Propriedades de alguns núcleos com atividade NMR			
Núcleo	Spin	Sensibilidade Relativa	Razão Giromagnética (MHz/T)
$^{1}\mathrm{H}$	1/2	1.000	42.58
¹³ C	1/2	0.016	10.71
¹⁹ F	1/2	0.870	40.05
³¹ P	1/2	0.093	11.26

Movimento de um dipolo magnético em um campo magnético externo

- · Hipóteses:
 - Tratamento clássico
 - Ausência de interações mútuas
- O torque experimentado pelo momento de dipolo magnético é dado por:

$$\frac{d\vec{J}}{dt} = \vec{\mu} \times B_0 \vec{k}$$

• Como $\vec{\mu} = \gamma \vec{J}$

$$\frac{d\,\vec{\mu}}{dt} = \gamma\,\vec{\mu} \times B_0\vec{k}$$

Equação de movimento para spins isolados (tratamento clássico)

• Solução

$$\mu_{xy} = \mu_x + i\mu_y \rightarrow \vec{\mu}_{xy} = \mu_x \vec{i} + \mu_y \vec{j} \quad \begin{cases} \mu_{xy}(t) = \mu_{xy}(0) \ e^{-i\gamma B_0 t} \\ \mu_z(t) = \mu_z(0) \end{cases}$$
Precessão
nuclear

• Em termos vetoriais $\Rightarrow \vec{\omega} = -\gamma \vec{B}_0 = -\omega_0 \vec{k}$



Equação de Movimento

 Tomando-se a equação de movimento em termos das suas componentes e derivando-as com respeito a t:



Soluções:

$$\begin{cases} \mu_x(t) = \mu_x(0)\cos(\omega_0 t) + \mu_y(0)\sin(\omega_0 t) \\ \mu_y(t) = -\mu_x(0)\sin(\omega_0 t) + \mu_y(0)\cos(\omega_0 t) \\ \mu_z(t) = \mu_z(0) \end{cases}$$



Figure 3.3 Precession of a nuclear spin about an external magnetic field is similar to the wobbling of a spinning top in a gravitational field.

- Dois pontos importantes: ۲
 - Frequência de precessão \rightarrow frequência de Larmor $\omega_0 = \gamma B_0$
- - A precessão em torno de B_0 é horária (regra da mão esquerda)

Matriz de Rotação

• Em termos de cada componente, a precessão é dada por:

$$\mu_x(t) = \mu_x(0)\cos(\omega_0 t) + \mu_y(0)\sin(\omega_0 t)$$
$$\mu_y(t) = -\mu_x(0)\sin(\omega_0 t) + \mu_y(0)\cos(\omega_0 t)$$
$$\mu_z(t) = \mu_z(0)$$

 Uma outra maneira de descrever a precessão nuclear é através da Matriz de Rotação:



 Macroscopicamente, o <u>comportamento coletivo</u> do sistema de spins pode ser representado pela <u>soma</u> vetorial dos momentos magnéticos microscópicos:

$$\vec{M} = \sum_{n=1}^{N_s} \vec{\mu}_n$$

- N_s: número total de spins
- Vamos considerar spin = $\frac{1}{2}$. Submetidos a B₀, os spins assumem uma de <u>duas possíveis orientações</u>. Cada uma delas corresponde a uma diferente <u>energia de interação</u> com o campo magnético externo B₀.

- Para cada momento magnético, pela Mecânica Quântica, temos: $E = \vec{\mu} \cdot \vec{B}_0 = -\mu_z B_0 = -\gamma \hbar m_I B_0$
 - Spins para cima \rightarrow m_I = $\frac{1}{2}$
 - Spins para baixo $\rightarrow m_{I} = -\frac{1}{2}$
- Portanto:



Equilíbrio do Alinhamento de Spin

- A magnetização resultante de um sistema sob ação de B₀ depende do número de efetivo de spins apontando na direção do campo
- Pode-se usar física estatística (caps. 5 e 6) para mostrar que esse número depende do gap de energia entre os dois estados (alinhamento paralelo e anti-paralelo) e da temperatura ambiente (N é o no. total de spins da amostra):

excesso de spins
$$\simeq N \frac{\hbar \omega_0}{2kT}$$

• Isso resulta em uma magnetização dada por:

$$M_0 = \frac{\rho_0 \gamma^2 \hbar^2}{4kT} B_0$$

Considerações Estatísticas

De acordo com a Estatística de Maxwell-Boltzmann:

٠

$$\frac{N_{\uparrow}}{N_{\downarrow}} = \exp\left(\frac{\Delta E}{KT_s}\right)$$

• Na prática $\rightarrow \Delta E \ll KT_s$ e a expressão acima pode ser aproximada:



- Existe um pequeno excesso de spins para cima por estarem em um estado de menor energia
- Isso acaba resultando em uma magnetização macroscópica efetiva: o vetor de magnetização M

• Assim,
$$\vec{M} = \sum_{n=1}^{N_s} \vec{\mu}_n$$
 implice $\Rightarrow \vec{M} = M_x \vec{i} + M_y \vec{j} + M_z \vec{k}$
$$= \left(\sum_{n=1}^{N_s} \mu_{x,n}\right) \vec{i} + \left(\sum_{n=1}^{N_s} \mu_{y,n}\right) \vec{j} + \left(\sum_{n=1}^{N_s} \mu_{z,n}\right) \vec{k}$$

- Os dois primeiros termos são nulos \rightarrow fase randômica
- No <u>eixo z</u>, temos:

$$\mu_{z,n} = \begin{cases} +\frac{1}{2}\gamma\hbar \\ -\frac{1}{2}\gamma\hbar \end{cases} \quad \overrightarrow{M} = \left(\sum_{n=1}^{N_{\uparrow}}\frac{1}{2}\gamma\hbar - \sum_{n=1}^{N_{\downarrow}}\frac{1}{2}\gamma\hbar\right)\vec{k} = \frac{1}{2}\left(N_{\uparrow} - N_{\downarrow}\right)\gamma\hbar\vec{k}$$

• Assim, a magnetização global aponta na direção z:

$$M_z^0 = |\vec{M}| = \frac{\gamma^2 \hbar^2 B_0 N_s}{4KT_s}$$

- A expressão acima vale apenas para spin = $\frac{1}{2}$.
- De uma maneira geral, temos \rightarrow $M_z^0 = \frac{\gamma^2 \hbar^2 B_0 N_s I(I+1)}{3KT_s}$

Excitações por Pulsos de Radiofrequência (RF)

- A excitação dos spins é produzida através de pulsos de RF: campos magnéticos oscilantes $\rightarrow \vec{B}_1(t)$
- · Condição de Ressonância
 - Campo de RF de frequência $w_{rf} \rightarrow E_{rf} = \hbar \omega_{rf}$
 - Para induzir uma transição dos spins de um estado de energia para outro, devemos ter:

$$\hbar \omega_{\rm rf} = \Delta E = \gamma \hbar B_0$$

ou
$$\omega_{\rm rf} = \omega_0$$

Condição de Ressonância

Detectando a magnetização do sistema

• Processo de excitação



• Magnetização transversal (cap.4):

$$M_{+}(t) = M_{x}(t) + iM_{y}(t) = M_{0}e^{-i\omega_{0}t + i\phi_{0}}$$

 O sinal é detectado na forma de uma voltagem induzida em uma bobina receptora (cap.7):

$$emf = -\oint \frac{d}{dt} \left(\vec{M} \cdot \vec{\mathcal{B}}_{rf} \right) d^3r$$

• Pode mostrar que o sinal dependerá de $\rightarrow \text{sinal} \propto \frac{\gamma^3 B_0^2 \rho_0}{T}$



Figure 3.5 Distribution of nuclear magnetic moments observed at an arbitrary time instant. The excess of vectors pointing along the external field is greatly exaggerated.

MRS: Magnetic Resonance Spectroscopy

- Os prótons de H (de onde provém o sinal) fazem parte de diferentes compostos, portanto estão imersos em diferentes ambientes químicos
- Isso provoca alterações locais de campo magnético, o que se reflete em alterações na frequência de Larmor de precessão
- Isso é chamado de *chemical shift*
- A frequência $\omega_0(j)$ passa a depender da espécie química j (caps. 8, 10 e 17)
- Chemical shift imaging : cada espécie dá a sua contribuição para o sinal:

sinal $\propto \sum_{i} M_0(j) \omega_0(j) e^{-i\omega_0(j)t + i\phi(j)}$

Frequência de Larmor

- Vamos voltar à Equação de Larmor, que dá a frequência de precessão $\Rightarrow \omega_0 = \gamma B_0$
- Algumas observações:
 - Esta frequência depende do campo e da razão giromagnética (específica de cada núcleo)
 - Seletividade: é possível excitar um tipo de núcleo, sem perturbar outros
 - Isocromata: grupo de spins nucleares que têm a mesma frequência de ressonância
 - Na prática, mesmo para um dado tipo de núcleo, existe um intervalo de frequências de ressonância (isocromatas múltiplas)
 - Isso deve-se a <u>dois fatores</u>:
 - Existência de inomogeneidades locais em B₀
 - Efeito de deslocamento químico (*chemical shift*)

Frequência de Larmor

- Devido ao ambiente químico e à blindagem dos elétrons, um núcleo "sente" um campo magnético efetivo $\Rightarrow \hat{B}_0 = B_0 (1 \delta)$
- Com isso, a <u>frequência de ressonância</u> torna-se:

$$\hat{\omega}_0 = \omega_0 - \Delta \omega = \omega_0 (1 - \delta)$$

- A equação acima indica que, spins em diferentes ambientes químicos possuem deslocamentos diferentes, mesmo se o campo é perfeitamente homogêneo
- O valor de δ é muito pequeno: algumas ppm (parte por milhão). Depende do contexto químico em que o núcleo está
- Exemplo: prótons de gordura (CH₂) apresentam deslocamento de 3,35 ppm em relação à frequência de prótons de água (H₂0)
- Sistemas biológicos apresentam um amplo intervalo de valores de δ
- A determinação de estrutura química de um objeto através do deslocamento químico é chamada Espectroscopia NMR

dMRSI: espectroscopia funcional







Magnetic Resonance Imaging

- Imagens: vêm de se correlacionar o sinal com localizações espaciais de diferentes fontes
- Para isso, se introduz um campo magnético de varia ao longo da amostra. Assim, o sinal produzido varia espacialmente de acordo com: $\omega(x) = \gamma B(x)$
- x: coordenada espacial na direção do gradiente de campo



- Diferentes configurações de gradiente permitem obter cortes em qualquer direção

Tempos de Relaxação

- **Relaxação longitudinal:** a interação dos spins com a sua vizinhança (interação spin-rede) leva a restauração da magnetização na direção longitudinal
- Esse processo é caracterizado por uma constante de T_1 chamado tempo de relaxação longitudinal
- De acordo com a Equação de Bloch (cap.4), a evolução temporal • desse processo, para uma situação inicial M,(O)=O, é dada por:

$$M_{z}(t) = M_{0}\left(1 - e^{-t/T_{1}}\right)$$

- **Relaxação transversal:** ocorre ao mesmo tempo que a relaxação longitudinal, mas de forma independente > deve-se à interação spin-spin ou à defasagem de spins que estavam focalizados
- T₂: tempo de relaxação transversal $(obs.: T_2^*)$
- T_F : tempo ao eco
 - $M_{\perp}(t) = M_0 \left(1 e^{-T_R/T_1} \right) e^{-T_E/T_2}$ T_{R} : tempo de repetição

Resolução e Contraste

- A resolução do MRI depende da maneira como o sinal e o ruído são sampleados e filtrados (caps. 12, 13 e 15)
- As imagens de MRI dependem de vários aspectos: densidade de prótons, tempos de relaxação, temperatura, movimento dos prótons, deslocamento químico, heterogeneidade do tecido, e outros
- Esses aspectos afetam os diferentes níveis de contraste da imagem → MRI é mais versátil do que outras técnicas de imagem que baseiam-se apenas em um tipo de contraste
- A relação sinal/constraste (discutido no cap.15) pode ser vislumbrada a partir da equação
Resolução e Contraste

 A relação sinal/constraste (discutido no cap.15) pode ser vislumbrada a partir da equação

$$M_{\perp}(t) = M_0 \left(1 - e^{-T_R/T_1}\right) e^{-T_E/T_2}$$

- Para T_R longo (comparado a T₁) e T_E curto (comparado a T₂), a imagem será mais sensível à <u>densidade de prótons (Fig. 1.4a</u>)
- Para T_E da ordem de T₂ e T_R longo, a imagem é ponderada pela <u>densidade de prótons e T₂</u> → o contraste para tecidos de diferentes T₂ é realçado (Fig. 1.4b)
- Para T_R menor/igual que T₁ e T_E curto, a imagem é ponderada pela <u>densidade de prótons e T₁</u>(Fig. 1.4c)

Efeito de TR e TE no contraste por T2 e T2*



Efeito de TR e TE no contraste por T1





Fig. 1.4: Images of the human head with different forms of contrast: (a) a spin density-weighted image, (b) a T_2 -weighted image and (c) a T_1 -weighted image. These different acquisitions can be seen to create different contrasts between white matter, gray matter and cerebrospinal fluid. They all reveal excellent anatomic detail.

Intensidade do Campo Magnético

- Interesse em campos mais fortes → a relação sinal/ruído aumenta com o campo (cap.15)
 - Campo baixo \rightarrow menor que 0.5 T
 - Campo médio → entre 0.5 T e 1.0 T
 - Campo alto \rightarrow maior que 1.0 T
- Vimos que sinal $\propto \frac{\gamma^3 B_0^2 \rho_0}{T}$. O ruído é ~ B₀
- Já foi comprovado em experimentos com humanos que o relação sinal/ruído é proporcional a B_0 para 0.5 T < B_0 < 4.0 T
- Considerações sobre frequência de excitação (tabela)



Category	Subcategory	Frequency (MHz)	Field strength (T)	Wavelength (m)
radio waves	LF (long wave) MF (medium wave) AM radio (MF) HF (short wave) VHF (short wave) FM radio (VHF) UHF SHF	$\begin{array}{c} 0.03\text{-}0.3\\ 0.3\text{-}3\\ 0.54\text{-}1.6\\ 3\text{-}30\\ 30\text{-}300\\ 54\text{-}216\\ 300\text{-}3\times10^3\\ 3\times10^3\text{-}3\times10^4\\ 10^4\text{-}3\times10^5\end{array}$	$\begin{array}{c} 7 \times 10^{-4} \text{-} 7 \times 10^{-3} \\ 7 \times 10^{-3} \text{-} 0.07 \\ 0.013 \text{-} 0.038 \\ 0.07 \text{-} 0.7 \\ 0.7 \text{-} 7 \\ 1.27 \text{-} 5.07 \\ 7 \text{-} 70 \\ 70 \text{-} 700 \\ 233 \text{-} 7 \times 10^3 \end{array}$	$\begin{array}{c} 10^{4} \text{-} 10^{3} \\ 10^{3} \text{-} 10^{2} \\ 555 \text{-} 188 \\ 10^{2} \text{-} 10 \\ 10 \text{-} 1 \\ 5.55 \text{-} 1.39 \\ 1 \text{-} 0.1 \\ 0.1 \text{-} 0.01 \\ 0.3 \text{-} 10^{-3} \end{array}$

Table 1.1: Range of radio and microwave frequencies. The letters F, L, M, H, V, U and S refer to frequency, low, medium, high, very, ultra and super, respectively. Associated free-space wavelengths and NMR field strengths for protons are given here.

Ressonância Magnética Funcional (fMRI)



DTI + fMRI



Imagens por tensor de difusão