

FISICA

1. Prerequisiti di Matematica
2. Richiami di Fisica
3. Onde elettromagnetiche
4. Radioattività
5. Interazione radiazione-materia
6. Onde sonore e ultrasuoni

Michele Arneodo
arneodo@to.infn.it
tel. 0321-660651

PREREQUISITI DI MATEMATICA

1. Lettere dell'alfabeto greco (α , β , γ , δ ...)
2. Equazioni di primo e secondo grado
3. Proprietà delle potenze
4. Definizione e proprietà dei logaritmi
5. Nozioni di base di geometria:
 - (a) Definizione di angolo piano e angolo solido (gradi, radianti, steradiani)
 - (b) Perimetro e area dei poligoni più comuni (triangolo, rettangolo, parallelogramma...)
 - (c) La lunghezza della circonferenza ($2\pi r$)
 - (d) L'area del cerchio (πr^2)
 - (e) Area della superficie e volume di parallelepipedi e cilindri
 - (f) La superficie della sfera ($4\pi r^2$)
 - (g) Il volume della sfera ($\frac{4}{3}\pi r^3$)
 - (h) Il teorema di Pitagora
 - (i) Trigonometria elementare: seno, coseno e tangente per “risolvere” un triangolo rettangolo (per es. dati ipotenusa e un angolo trovare i cateti...)

6. Il concetto di funzione matematica ($y = f(x)$)

7. Nozioni di base di geometria analitica:

(a) Il piano cartesiano

(b) Rappresentazione grafica di una funzione matematica

i. La retta: $y = ax + b$

ii. La parabola: $y = ax^2 + bx + c$

iii. L'elevamento a potenza: $y = ax^n$

iv. L'iperbole: $y = a/x$

v. La funzione esponenziale: $y = e^{ax}$

vi. La funzione logaritmo: $y = \log x$

vii. Le funzioni trigonometriche: $y = \sin(x)$, $y = \cos(x)$,
 $y = \tan(x)$

viii. Il cerchio: $x^2 + y^2 = r^2$

8. Grafici semi-logaritmici e doppio-logaritmici.

9. Notazione scientifica – per es.

- $376 = 3.76 \times 10^2$
- $376000000000 = 3.76 \times 10^{11}$
- $0.0000376 = 3.76 \times 10^{-5}$
- ...

10. Cifre significative; incertezza (o errore) statistica (casuale) e sistematica.

11. I prefissi (deci, centi, milli, kilo,...) – cf. lista.

12. Il concetto di vettore; le componenti di un vettore

13. Le operazioni tra vettori:

- (a) moltiplicazione per una costante
- (b) somma di più vettori (graficamente e usando le componenti)
- (c) prodotto scalare tra due vettori
- (d) prodotto vettoriale tra due vettori

UNITA' DI MISURA

Il risultato della misura di una quantità fisica (una lunghezza, un volume, una pressione, un'energia, una dose,...) si esprime in termini di:

1. Un valore numerico (un numero puro);
2. L'unità di misura in cui la quantità fisica viene espressa.

$$\textit{quantita' fisica} = (\textit{valore numerico}) \times (\textit{unita' di misura})$$

Per es. la differenza di potenziale in un tubo a raggi x può essere:

$$\Delta V = 80 \text{ KV}$$

ossia il prodotto del numero puro 80 e dell'unità "kilovolt"

A tutti gli effetti pratici il simbolo KV va usato come se fosse un simbolo algebrico, come y nell'equazione $x = 3y$.

Trattare i simboli delle unità di misura come entità algebriche è particolarmente utile nella conversione tra diversi sistemi di unità di misura:

$$v = 50 \text{ Km/h} = 50 \frac{\text{Km}}{\text{h}} = 50 \frac{10^3 \text{m}}{3.6 \times 10^3 \text{s}} = 13.9 \text{ m/s}$$

N.B. una carica elettrica sente l'effetto del campo generato da tutte le altre cariche nell'universo, ma NON quello che essa stessa genera (che è invece sentito da tutte le altre cariche nell'universo).

ENERGIA POTENZIALE ELETTRICA

E' definita in ogni punto nello spazio intorno ad un oggetto carico Q .

In ogni punto P è uguale al lavoro fatto per portare una carica q da un certo punto di riferimento (per es. ∞) al punto P .

Se ci vogliono 10 J per muovere una carica q da A a $B \Rightarrow$ la differenza dell'energia potenziale elettrica in B e quella in A è

$$U(B) - U(A) = 10 \text{ J}$$

Se A è il punto di riferimento $\Rightarrow$ l'energia potenziale elettrica (o elettrostatica) della carica q in B è 10 J.

NON dipende dal cammino ma SOLO dal punto di riferimento e dal punto P : è la stessa andando lungo il cammino 1, 2, 3,... – il campo elettrico è “conservativo”.

(cf. campo gravitazionale)

POTENZIALE ELETTRICO

L'energia potenziale elettrica dipende dalla carica q (oltre che da Q). Definisco una quantità indipendente da q :

$$V = \frac{\textit{energia potenziale elettrica}}{\textit{carica}}$$

(= energia potenziale elettrica per una carica di 1 C)

Se $q = 2 \text{ C} \Rightarrow$

$$\begin{aligned}\Delta V = V(B) - V(A) &= \frac{U(B) - U(A)}{q} = \frac{\textit{lavoro}(A \rightarrow B)}{\textit{carica}} = \\ &= \frac{10 \text{ J}}{2 \text{ C}} = 5 \text{ V}\end{aligned}$$

Per portare 4 C da A a B :

$$\textit{lavoro}(A \rightarrow B) = (V(B) - V(A)) \times (\textit{carica}) = 5 \text{ V} \times 4 \text{ C} = 20 \text{ J}$$

Esempio: una batteria da 12 V ha una differenza di potenziale di 12 V tra i suoi due morsetti; compie un lavoro (= spende un'energia) pari a 12 J ogni volta che una carica di 1 C va da un morsetto all'altro.

L'ELETTRONVOLT

Abbiamo detto che

$$\Delta U = q\Delta V,$$

dove ΔU è la differenza di energia potenziale elettrica per la carica q dovuta alla differenza di potenziale ΔV .

Se $q = e = 1.6 \times 10^{-19}$ C (= la carica elementare) e $\Delta V = 15$ KV,

$$\Delta U = q\Delta V = (1.6 \times 10^{-19} \text{ C}) \times (15 \times 10^3) \text{ V} = 2.4 \times 10^{-15} \text{ J}$$

Alternativamente, posso scegliere di lasciare indicata la carica elementare, senza cioè fare la sostituzione $q = e = 1.6 \times 10^{-19}$ C. Allora

$$\Delta U = q\Delta V = e\Delta V = e \times (15 \times 10^3) \text{ V} = 15 \times 10^3 \text{ eV} = 15 \text{ KeV}$$

Dunque l'elettronVolt (eV) è l'energia acquistata da una carica elettrica elementare quando passa attraverso una differenza di potenziale di 1 V.

$$1 \text{ eV} = (1.6 \times 10^{-19} \text{ C}) \times (1 \text{ V}) = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$$

ONDE ELETTROMAGNETICHE

Un campo magnetico variabile induce una f.e.m. (= una tensione) in una spira (legge di Faraday). Alternativamente si può dire che un campo magnetico variabile produce un campo elettrico indotto.

Maxwell dimostrò che vale una legge simmetrica alla precedente: un campo elettrico variabile induce un campo magnetico.

La combinazione di queste due osservazioni porta alla previsione delle onde elettromagnetiche.

- Supponiamo di avere una corrente elettrica oscillante con una certa frequenza ν , ossia delle cariche elettriche che si muovono di moto armonico semplice (dunque accelerato) lungo un filo ("antenna").
- Queste cariche in moto producono un campo magnetico (per la legge di Biot-Savart) che oscilla anch'esso con la stessa frequenza ν .
- Per la legge di Faraday, questo campo magnetico variabile induce un campo elettrico che oscilla con frequenza ν . Quest'ultimo, secondo Maxwell, produce a sua volta un campo magnetico oscillante, che a sua volta...
- Questa perturbazione elettromagnetica, detta "onda elettromagnetica", si allontana dall'antenna con una velocità, nel vuoto, pari a $c = 3 \times 10^8$ m/s.

La luce, le onde radio, le micro-onde, i raggi x, i raggi gamma sono onde elettromagnetiche. Differiscono solo per la frequenza.

I FOTONI

Sebbene la radiazione elettromagnetica abbia caratteristiche ondulatoria, in alcune situazioni si comporta come un flusso di particelle (“quanti”) che

1. viaggiano con velocità c
2. trasportano una quantità di energia

$$E = h\nu,$$

dove $h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ J s}$ è la costante di Planck.

Esempio: Si calcoli l'energia trasportata da un fotone prodotto in un generatore di raggi x con una lunghezza d'onda di 10 pm.

$$\begin{aligned} E = h\nu &= h \frac{c}{\lambda} = \frac{6.63 \times 10^{-34} \text{ Js} \times 3 \times 10^8 \text{ m/s}}{10 \times 10^{-12} \text{ m}} = \\ &= 1.989 \times 10^{-14} \text{ J} = 1.989 \times 10^{-14} \times \frac{1}{1.6 \times 10^{-19}} \text{ eV} = \\ &= 1.24 \times 10^5 \text{ eV} = 124 \text{ KeV} \end{aligned}$$

NB può essere utile tenere a mente che

$$E = h \frac{c}{\lambda} = \frac{1240 \text{ KeV pm}}{\lambda}$$

⇒ l'energia di un fotone aumenta al diminuire della lunghezza d'onda

MASSA ED ENERGIA

Una delle conseguenze della teoria della relatività di Einstein è che la massa è una forma di energia:

$$E = mc^2,$$

dove c è la velocità della luce.

Calcoliamo l'equivalente energetico della massa dell'elettrone:

$$\begin{aligned} E &= 9.1 \times 10^{-31} \text{ Kg} \times (3 \times 10^8 \text{ m/s})^2 = 81.9 \times 10^{-15} \text{ J} = \\ &= 81.9 \times 10^{-15} \times \frac{1}{1.6 \times 10^{-19}} \text{ eV} = 0.511 \text{ MeV} \end{aligned}$$

Analogamente si trova che l'unità di massa atomica (uma=1/12 massa ^{12}C) corrisponde a 931.6 MeV.

MASSA E VELOCITA'

All'aumentare della velocità di un oggetto la sua massa efficace aumenta:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}},$$

dove

- m_0 è la massa “a riposo” (= la massa dell’oggetto quando è fermo),
- v è la velocità dell’oggetto,
- c è la velocità della luce.

L'effetto è trascurabile quando v è piccola rispetto a quella della luce.

$$\text{Se } v = (1/10)c \Rightarrow m = 1/\sqrt{1 - (0.1)^2} = 1.005m_0.$$

$$\text{Se } v = 0.98c \Rightarrow m = 1/\sqrt{1 - (0.98)^2} = 5m_0.$$

$$\textit{Energia cinetica} = mc^2 - m_0c^2$$

quando $v/c \rightarrow 0$, $\textit{Energia cinetica} \simeq \frac{1}{2}mv^2$.

PRODUZIONE DI RAGGI X

Tubo a raggi X (vd. fig.):

- In un tubo a vuoto (un'ampolla di vetro in cui è stato fatto il vuoto) sono presenti due elettrodi: l'anodo (A) e il catodo (C), tra i quali c'è una differenza di potenziale ΔV .
- Il catodo consiste di un filamento (F) di tungsteno che viene riscaldato dal passaggio di una corrente elettrica (per effetto Joule: $P = RI^2$).
Se la temperatura è sufficientemente alta, vengono emessi elettroni per “effetto termoionico”: temperatura alta $\Rightarrow$ alta energia cinetica degli elettroni del catodo. L'energia di alcuni elettroni è sufficiente per vincere il legame con il metallo a cui appartengono.
- Gli elettroni (di carica e) sono soggetti alla differenza di potenziale ΔV . Hanno quindi a disposizione una energia potenziale elettrostatica

$$\Delta U = e\Delta V$$

Accelerano quindi verso l'anodo (anche di tungsteno), dove arrivano con una energia cinetica

$$E = \text{Energia cinetica} = \frac{1}{2}mv^2 = \Delta U = e\Delta V$$

- Nell'urto degli elettroni con l'anodo vengono prodotti raggi X:

1. Gli elettroni decelerano rapidamente. Una carica elettrica accelerata emette onde elettromagnetiche. E' quindi possibile che un elettrone, frenando, ceda tutta o parte della sua energia sotto forma di fotoni ("Bremmstrahlung" = radiazione di frenamento).

L'energia di un fotone è $h\nu$. La massima frequenza (ossia la minima lunghezza d'onda) si ha quando tutta l'energia dell'elettrone passa al fotone:

$$h\nu_{\max} = h \frac{c}{\lambda_{\min}} = e\Delta V$$

E' possibile che solo parte dell'energia dell'elettrone sia ceduta al fotone $\Rightarrow$ spettro continuo.

2. E' possibile che un elettrone incidente colpisca uno degli elettroni delle shell più interne (per es. la shell K) di uno degli atomi dell'anodo. La lacuna che si viene a creare viene riempita da uno degli elettroni esterni. Nella transizione viene emesso un fotone di energia pari alla differenza di energia tra i due livelli (e quindi di frequenza ben definita).

Queste transizioni danno luogo alle "righe caratteristiche" nello spettro dei raggi X.

N.B.

Affichè possa essere emesso un elettrone K, l'elettrone incidente deve avere un'energia almeno pari all'energia di legame dell'elettrone bersaglio (ossia l'energia necessaria per estrarlo).

NOTE:

1. La maggior parte degli elettroni incidenti perde la propria energia in migliaia di piccoli urti in cui gli atomi dell'anodo vengono eccitati o ionizzati. In alcuni casi gli elettroni prodotti a seguito della ionizzazione hanno a loro volta energia sufficiente per ionizzare (“raggi delta”).

L'effetto netto è di riscaldare l'anodo ($\rightarrow$ necessario raffreddamento !). Per $\Delta V = 100 \text{ KV}$ più del 95% dell'energia spesa per accelerare gli elettroni viene dissipata in calore. Solo qualche per cento produce raggi X.

2. Le righe caratteristiche non sono di grande utilità nè per fini diagnostici nè terapeutici: costituiscono soltanto una piccola frazione dello spettro.

DISTRIBUZIONE ANGOLARE DEI RAGGI X

1. Bersaglio “sottile” (l’elettrone ha al più una sola collisione, quindi il fascio di elettroni procede quasi indisturbato attraverso il bersaglio):

I raggi X sono emessi per lo più perpendicolarmente al fascio di elettroni (cf. curva A in fig. 2-16b).

Per energie molto elevate del fascio di elettroni (decine di MeV, anzichè decine di keV) gli elettroni sono emessi nella stessa direzione del fascio di elettroni (cf. curve B,C in fig. 2-16b).

2. Bersaglio “spesso” (il fascio di elettroni viene assorbito completamente; è quello che avviene in un normale tubo a raggi X):

I raggi X sono prodotti in tutte le direzioni intorno al punto di impatto. Tuttavia quelli prodotti alla destra della linea OT (fig. 2-16a) vengono assorbiti dall’anodo. Il massimo di intensità si ha nell’intorno della linea OO’.

- Il tubo a raggi X viene alimentato alla tensione alternata di rete (220 V, 60 Hz, cf. fig. 2-3a)
- Un trasformatore genera l'alta tensione (ΔV) necessaria per alimentare il tubo.

L'alta tensione in uscita dal trasformatore è anche alternata (cf. fig. 2-3c); questo non è accettabile: l'anodo deve sempre essere a potenziale superiore a quello del catodo (altrimenti i raggi X verrebbero generati in corrispondenza del catodo, con possibile danneggiamento del filamento)

→ l'alta tensione viene “raddrizzata”: viene tenuta solo la parte positiva della sinusoide, tipicamente usando un diodo (lascia passare la corrente solo in una direzione).

Con circuiti raddrizzatori complessi (figg. 2-5 e 2-6) si ottiene una tensione quasi continua.

- Un trasformatore viene anche usato per ottenere la tensione di alimentazione del filamento (dell'ordine di 10 V).

In tubo a raggi X con anodo rotante, in un'esposizione di 2 s a una corrente di tubo di 100 mA e una tensione di 100 KV, l'incremento di temperatura dell'anodo (massa ≈ 0.5 Kg) può essere, in certe condizioni, di 3000° (il punto di fusione del tungsteno è 3400°).

Per evitare il surriscaldamento dell'anodo il costruttore fornisce le "curve di carico" (cf. fig. 2-11): data una certa tensione del tubo, una certa corrente, la curva di carico fornisce il max tempo di esposizione per diverse velocità di rotazione dell'anodo e per diversi tipi di raddrizzatore (monofase o trifase).

E' importante non solo valutare il max tempo per un'esposizione singola, ma anche il max numero di esposizioni che è possibile fare in sequenza.

A questo scopo è necessaria una stima dell'energia depositata sull'anodo:

$$\begin{aligned} \textit{Unita' Termica (UT)} &= \\ &= (\langle I \rangle \textit{ in mA}) \times (V \textit{ picco in KV}) \times (\textit{tempo di esposizione in s}) \end{aligned}$$

Il numero di UT è approssimativamente uguale all'energia in J depositata sull'anodo:

$$\textit{Energia} = f \times UT$$

dove f dipende dalle caratteristiche specifiche del tubo, e in particolare il tipo di raddrizzatore.

RADIOATTIVITA'

I nuclei sono composti da protoni e neutroni, legati tra loro dalla “interazione nucleare forte” (una delle 4 interazioni fondamentali della natura: gravità, elettromagnetismo, interazione nucleare forte, interazione nucleare debole).

Alcuni tipi di nuclei non sono stabili: tendono a raggiungere una configurazione più stabile (a cui compete una minore energia, cf. oggetto che cade in un campo gravitazionale) trasformandosi in un nucleo diverso. Questo può avvenire

1. Emettendo una particella α (=2 protoni+ 2 neutroni = un nucleo di ${}^4_2\text{He}$) con energia $\sim \text{MeV}$ (decadimento α).
2. Emettendo un elettrone (decadimento β^-) o un positrone (decadimento β^+) con energia $\sim \text{MeV}$.
3. Emettendo un fotone con energia $\sim \text{MeV}$ (decadimento γ – analogo a quanto succede in un atomo quando passa da un livello eccitato allo stato fondamentale).

N.B. Decadimento α , β e γ sono qualitativamente differenti: la particelle α fanno parte del nucleo – NON invece raggi γ , elettroni o positroni.

DECADIMENTO β

Viene emesso un elettrone (β^-) o un positrone (β^+). Il nucleo NON contiene elettroni o postroni.

1. β^- : $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}$ (Z aumenta di 1)
2. β^+ : $p \rightarrow n + e^+ + \nu$ (Z diminuisce di 1)

L'energia dell'elettrone può variare da 0 a un valore massimo dell'ordine di qualche MeV (variabile da nucleo a nucleo) – cf. fig. 3.6. La quantità rilevante è l'energia media $\bar{E}$.

Insieme all'elettrone (o al positrone) viene emesso un anti-neutrino (o un neutrino). Si tratta di particelle con massa trascurabile rispetto a quella dell'elettrone (forse nulla) e prive di carica elettrica.

CATTURA ELETTRONICA

Gli elettroni che ruotano intorno al nucleo hanno una certa probabilità di venirsi a trovare molto prossimi al nucleo. Questo avviene soprattutto per gli elettroni delle shell più interne (per es. elettroni K, L, M).

$$p + e(\textit{di solito K}) \rightarrow n + \nu$$

Si viene quindi a creare una lacuna in una shell interna. Questa viene colmata da

1. Emissione di raggi X (K, L, M...)
2. Emissione di elettroni Auger.

LINEAR ENERGY TRANSFER (LET)

Alcune delle collisioni di una particella carica nella materia rilasciano sufficiente energia da generare “elettroni δ ”, la cui energia non è assorbita nelle immediate vicinanze del percorso della particella iniziale.

Trascurando le perdite di energia che danno luogo a elettroni δ , si ottiene il Linear Energy Transfer L_Δ :

$$L_\Delta = dE/dx_\Delta$$

Si tratta dello stopping power ottenuto escludendo collisioni che danno luogo a elettroni δ con energia superiore a Δ . Tipicamente $\Delta = 150$ eV.

Normalmente il LET si esprime in $\text{KeV}/\mu\text{m}$.

EFFETTO FOTOELETTRICO

Il fotone cede tutta la sua energia $E_\gamma = h\nu$ a un elettrone atomico, che emerge con un'energia cinetica:

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2 = E_\gamma - E_{legame}$$

- L'energia del fotone deve essere $> E_{legame}$
- La sezione d'urto (un'area proporzionale alla probabilità che il processo avvenga) è

$$\sigma \propto 1/(E_\gamma)^3$$

- ca. 80% delle interazioni sono con elettroni K (se l'energia è sufficiente). Quando l'energia del fotone scende sotto la soglia per interazione con elettroni K, la sezione d'urto scende improvvisamente ("K edge"). Analoghi effetti per le shell L etc.
- Forte dipendenza dal numero atomico:

$$\sigma \propto Z^4$$

- La distribuzione angolare degli elettroni emessi varia con l'energia dei fotoni. Si ha emissione prevalentemente a 90° a bassa energia ($\sim$ KeV) e in avanti ad alta energia ($\sim$ MeV)

EFFETTO COMPTON

Un fotone di energia $E_{\gamma 0} = h\nu_0$ a un elettrone (che consideriamo libero). Il fotone cede parte della sua energia all'elettrone, che rincula, e il resto dell'energia appare sotto forma di un fotone di lunghezza d'onda maggiore.

- Modesta dipendenza della sezione d'urto dall'energia per energie tipiche dei raggi X. A energie superiori la sezione d'urto decresce con l'energia.
- La sezione d'urto è $\propto Z$.
- Distribuzione angolare dei fotoni diffusi: cf. fig. 2.4, 2.5
- Spettro energetico degli elettrone Compton: cf. fig. 2.6

PRODUZIONE DI COPPIE

Il fotone, in presenza di un nucleo, può convertirsi in una coppia e^+e^- (se l'energia del fotone è superiore a $2m_e c^2 = 1.022 \text{ MeV}$).

- Andamento della sezione d'urto con l'energia: cf. fig. 2.7
- La sezione d'urto è $\propto Z^2$.
- La coppia e^+e^- è prodotta approssimativamente nella stessa direzione del fotone. L'angolo tra direzione di elettrone (o positrone) e quella del fotone incidente è $\theta \approx m_e c^2 / E_\gamma$.

ULTRASUONI

Onde sonore con frequenza $> 2 \times 10^4$ Hz $\Rightarrow$ “ultrasuoni”.

Possono essere prodotti con cristalli “piezoelettrici”: applicando una differenza di potenziale alternato (e quindi un campo elettrico alternato) si mettono a vibrare con una frequenza uguale a quella della differenza di potenziale.

Viceversa, se messi in oscillazione da ultrasuoni (ossia sottoposti a vibrazioni meccaniche con frequenza ultrasonora, generano una differenza di potenziale alternata.

Si ottengono ultrasuoni con frequenze fino al GHz $\Rightarrow \lambda = 0.3 \mu\text{m}$ in aria (dove $v \approx 340$ m/s) e $\lambda = 1.5 \mu\text{m}$ in acqua (dove $v \approx 1450$ m/s). Si comportano come “raggi sonori” che si propagano in linea retta.

Per applicazioni mediche si usano intensità da 10^{-4} a 10 W/cm² e frequenza max ≈ 1 MHz.

L'intensità si attenua con legge esponenziale:

$$I = I_0 \exp(-\alpha x)$$

con α coefficiente di assorbimento che varia da materiale a materiale (cf. tab. 15.2) ed è proporzionale alla frequenza.

ECOGRAFIA

Tecnica basata sulla riflessione da parte di interfacce tra mezzi diversi attraversati da ultrasuoni. Tipicamente lo stesso cristallo viene usato sia come trasmettitore che come ricevitore (cf. fig. 20.8.1).

Il cristallo (“trasduttore”) viene messo in contatto con la pelle attraverso un gel che agisce da sostanza conduttrice del suono.

Frequenze tipiche 1-15 MHz.

Vengono emessi brevi impulsi della durata ciascuno di 1-5 μs circa 200 volte al secondo.

Una volta emesso l’impulso il cristallo piezoelettrico rimane in attesa di eventuali segnali riflessi. Date le elevate velocità del suono nei tessuti (cf. tab. 20.8.2), la ricezione avviene senza interferenza con la successiva emissione da parte del cristallo.

N.B.

- Il tessuto osseo assorbe 10 volte di più dei tessuti molli, che a loro volta assorbono 10 volte di più dei fluidi corporei (sangue, liquido amniotico, urina) $\Rightarrow$ la vescica piena si comporta da “finestra acustica” per l’esame delle strutture vicine.
- La velocità del suono nell’aria è $\ll$ che nei tessuti $\Rightarrow$ problemi di interferenza. Per questo si usa il gel tra trasduttore e pelle e le ecografie di polmoni e apparato digerente non sono eseguibili.

Parametri importanti:

1. Risoluzione assiale o longitudinale: è la capacità di distinguere due oggetti lungo la direzione di propagazione dell'onda.

Non possono essere risolti oggetti con dimensione inferiore alla lunghezza d'onda: per frequenze 1-15 MHz varia tra 1.5-0.1 mm.

Anche la lunghezza dell'impulso limita la risoluzione assiale: impulsi di lunga durata impediscono di rivelare interfacce molto vicine.

2. Risoluzione laterale: capacità di distinguere oggetti giacenti su una linea ortogonale alla direzione di propagazione. Dipende dalle dimensioni trasverse del fascio: dipende dalle dimensioni del trasduttore, dalla focalizzazione del fascio.

3. Attenuazione (cf. quanto detto prima).

Per tessuti molli è ca. $1 \text{ dB/cm} \times (\text{frequenza in MHz})$

4. Divergenza: il fascio non si può più considerare come formato da raggi paralleli oltre una distanza $x_{\max}$

RISONANZA MAGNETICA NUCLEARE

- Una spira percorsa da corrente produce un campo magnetico:
- La stessa spira subisce l'effetto di un campo magnetico esterno: si comporta come una piccola calamita. L'effetto del campo esterno è di “orientare” la spira: la spira si mette perpendicolare al campo.

Si definisce il momento di dipolo magnetico della spira:

$$\mu = Ai$$

direzione e verso si trovano con la mano dx. Il campo magnetico tende a orientare μ parallelo a B .

- Considero un protone: gira su sè stesso (si dice che ha “spin”, o momento angolare intrinseco).

[Ricordo: un oggetto di massa m che gira su una circonferenza di raggio r con velocità v ha momento angolare mvr ; direzione e verso con la regola della mano dx; il protone ha momento angolare di spin $S = 1/2(h/2\pi)$]

Se gira su sè stesso $\Rightarrow$ carica che ruota $\Rightarrow$ corrente $\Rightarrow$ momento di dipolo magnetico.

$$\mu_p = 2.79 \frac{e}{m_p} S$$

(S in unità di $h/2\pi$)

In un campo esterno il protone tende ad allinearsi al campo: il suo momento di dipolo magnetico μ tende a essere parallelo a B)

Questo è vero solo in media: μ precessa intorno a B (come una trottola).

La frequenza di precessione (“frequenza di Larmor”) è:

$$f_p = 0.44 \frac{e}{m} B$$

Per $B = 1.4 \text{ T} \rightarrow f_p = 6 \times 10^7 \text{ Hz}$ (radio).

Applico un campo magnetico oscillante (ossia mando un'onda elettromagnetica) perpendicolare a B .

Se la frequenza di oscillazione del campo magnetico è uguale alla frequenza di precessione può avere effetto su μ : può fare “capovolgere” il protone (“spin flip”).

Per questa operazione è necessaria energia, che viene fornita dall'onda elettromagnetica incidente. A seconda della quantità di protoni viene assorbita più o meno energia.

Detto altrimenti: c'è una differenza energetica tra il caso in cui μ è parallelo a B e quello in cui μ è ANTI-parallelo a B .

$$\Delta E = hf_p$$

Posso passare da spin paralleli a spin anti paralleli (spin flip) mandando fotoni (radio) con frequenza pari alla frequenza di Larmor – che dipende dal tipo di nucleo (f_p dipende dal tipo di nucleo: è diversa per protoni, deuterio, ^{13}C , ^{14}N ...