



## PRINCIPIOS FISICOS DE NMR

MUCHOS ATOMOS EN LA NATURALEZA TIENEN UN MOMENTO MAGNÉTICO. Cuando están sujetos a un campo magnético, tales núcleos tienden a alinear sus momentos magnéticos paralelos al campo, correspondiendo al estado más bajo de la energía: el núcleo se dice estar polarizado. Cuanto más alto es el campo magnético, más pueden ser polarizados los núcleos y más alta es la magnetización de la muestra. La magnetización macroscópica se puede efectuar por campos electromagnéticos con radiofrecuencias específicas (RF). Transfiriendo energía con tales campos sobre la muestra, la magnetización puede girar su orientación alineada a una orientación específica. La magnetización orientada re genera una señal propia de RF, que puede ser detectada. Para la mayoría de los núcleos, estas señales son demasiado pequeñas para ser detectadas. El hidrógeno es una excepción debido a que su momento magnético es grande y es muy abundante, en agua y petróleo. Así, la magnitud de la señal es una relación de la porosidad llena de líquido en la formación.

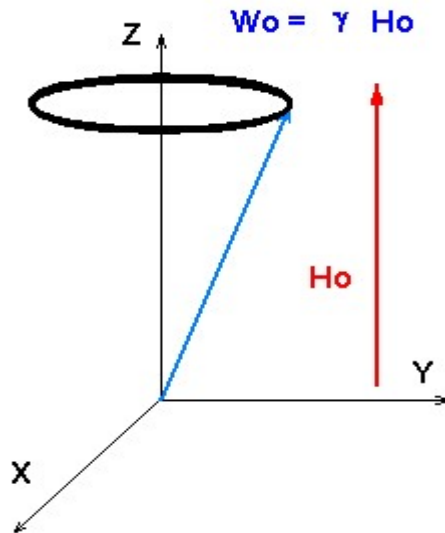
Los altos campos magnéticos creados por las herramientas NMR resultan en un alto cociente de la señal / interferencia y permiten el uso de una técnica de medida llamada PULSE ECHO NMR. Con el eco del pulso NMR el decaimiento de la magnetización se puede medir eficientemente sobre un tiempo relativamente largo, típicamente en el orden de 0.1 s. Este decaimiento (relajación) es causado por la interacción de los átomos del hidrógeno en el líquido que está inmerso, tal como otros átomos de hidrógeno o materiales paramagnéticos, tienen un carácter exponencial. En agua pura, el entorno consiste solamente en otros átomos del hidrógeno y la relajación se puede describir por un solo tiempo de relajación, 3 segundos.

La situación cambia drásticamente cuando los líquidos están confinados en un medio poroso. Los tiempos característicos de relajación son mucho más cortos (típicamente del orden de una fracción segundo), puesto que la interacción entre el líquido y la pared del poro introduce medios adicionales en la relajación. Midiendo la relajación, la información acerca de los tamaños del poro es obtenida y se relacionan con la permeabilidad de la formación. Si, aparte de un campo magnético, también está presente un gradiente del campo magnético, el coeficiente de difusión de un líquido se puede medir con NMR como un incremento en el tiempo de la relajación. El coeficiente de difusión se relaciona directamente con la viscosidad del fluido.

## SPIN NUCLEAR EN UN CAMPO MAGNÉTICO.

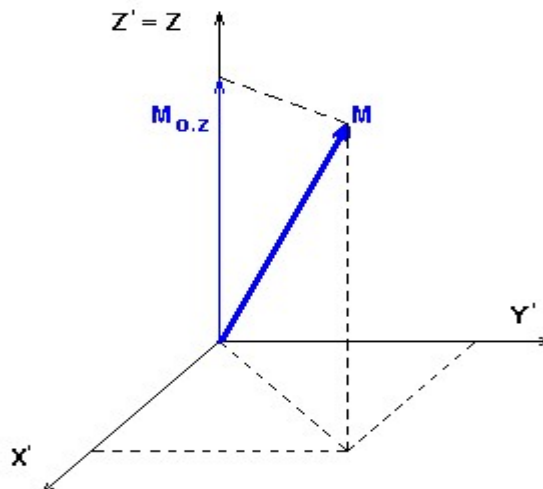
### ENTORNO DE LABORATORIO

Cualquier núcleo con un número impar de protones o de neutrones tiene un SPIN nuclear. Un spin nuclear implica un momento magnético  $\mu$ , que actúa recíprocamente con los campos magnéticos de una manera similar como con la gravedad. En un campo magnético  $H_0$ ,  $\mu$  nunca se alinea completamente con  $H_0$ . El spin nuclear por lo tanto gira alrededor de  $H_0$  con una frecuencia definida  $\omega_0$ , lo cual está dado por  $\omega_0 = \gamma H_0$ . Aquí,  $\gamma$  es el cociente giromagnético, el cual es característico de un núcleo en particular. La fórmula demuestra la equivalencia entre la fuerza  $H_0$  del campo magnético, y la frecuencia de giro (resonancia) del núcleo.



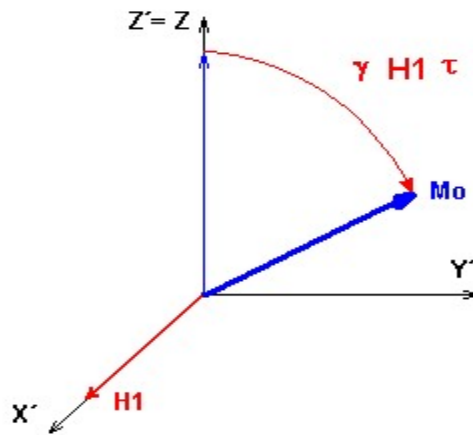
### ENTORNO DE ROTACIÓN

Para entender el principio pulso-eco de NMR, es útil considerar un marco de referencia que esté rotando alrededor del eje Z con la frecuencia  $\omega_0$ . En tal marco, el spin nuclear se observa con dos componentes fijados: uno a lo largo del eje Z y otro en el plano XY. Considerando el resto de los núcleos en el mismo campo magnético, rotando con la misma frecuencia pero con diversas fases, la magnetización en el plano de XY desaparece si se hace un promedio. El resto es una magnetización total  $M_0$  paralela al campo y con una magnitud que es determinada por la distribución de Boltzmann,  $\exp(\mu H_0/kT)$ , en donde k es la constante de Boltzmann y T (K) denota la temperatura.



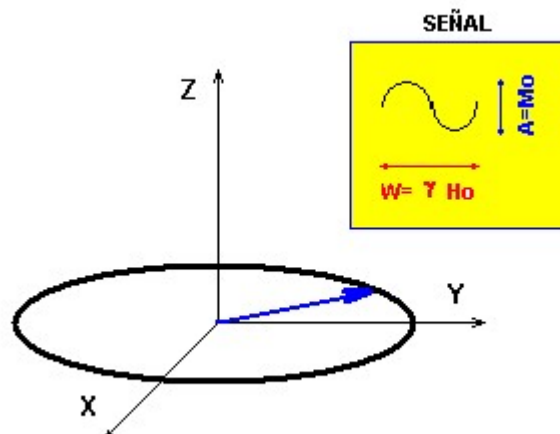
## ENTORNO DE ROTACIÓN

En el entorno de rotación, la magnetización total está en el entorno y no involucra al campo magnético. Si un pulso magnético  $H_1$  se aplica con una orientación fija, a lo largo del eje  $x'$ , y una duración  $\tau$ , la magnetización total puede rotar con precisión otra vez lejos de su dirección original a lo largo del eje de  $Z$ . Un pulso magnético con una orientación fija en un marco de rotación, se puede representar como un pulso magnético que varía (sinusoidalmente) con la frecuencia  $\omega_0$  en un marco fijo. Cuidadosamente eligiendo la amplitud y la longitud del pulso, la rotación a lo largo de cualquier ángulo puede ser lograda. En el pulso-eco de NMR, se utilizan generalmente los pulsos de 90 y 180 grados.



## ENTORNO DE LABORATORIO

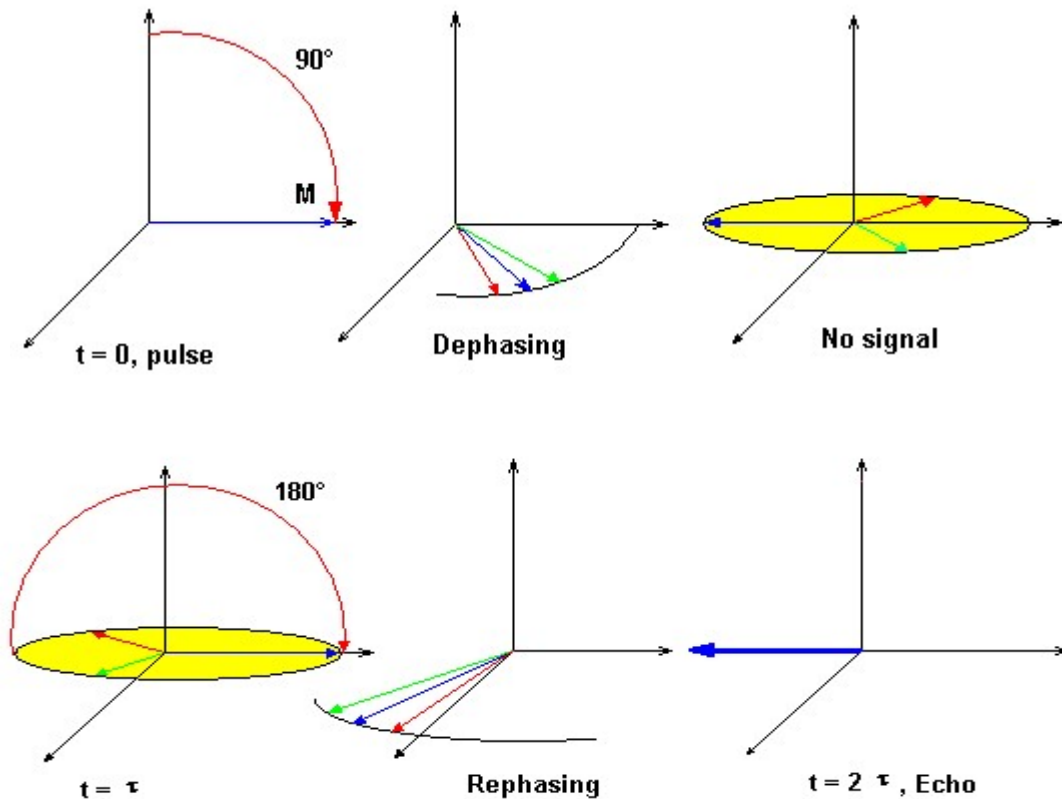
Regresando al marco del laboratorio, después de un pulso de 90 grados, la magnetización total se observa rotando alrededor del eje  $Z$ . El campo magnético que rota induce un campo electromagnético, el cual se puede detectar con una simple bobina como señal eléctrica variable. La magnitud de la señal es proporcional a la magnetización total y la frecuencia  $\omega_0$  igual a la frecuencia de la resonancia.



## RELAJACIÓN Y MEDICIÓN

La disminución observada en la magnetización se define como RELAJACIÓN. Dos tipos de relajación son significantes en el perfilaje NMR: longitudinal y transversal.

### SECUENCIA PULSO-ECO DE CARR-PURCELL



### RELAJACIÓN LONGITUDINAL

Se refiere al retorno de la magnetización total a su estado del equilibrio, paralelo a la dirección del campo magnético externo. Esto sucede con la transferencia de la energía al spin de un núcleo individual y sus alrededores. En agua pura, este proceso es algo lento con un tiempo de relajación de aproximadamente 3 segundos. La relajación esta dada por un solo exponencial:  $\exp(-t / T)$ .

En contraste, si el líquido está en un poro, las impurezas magnéticas en la superficie del poro proporcionan un mecanismo adicional de la relajación. El líquido en un poro relaja más rápidamente, pero todavía relaja como un simple exponencial:

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{T(\text{agua})} + \rho \frac{S}{V}$$

Donde,  $\rho$  representa la relajatividad y  $S/V$  la relación superficie-volumen del poro. Para la mayoría de las areniscas  $\rho$  es bastante constante y  $S/V$  es una medida del diámetro eficaz del poro; por lo tanto el tiempo NMR de relajación se puede relacionar con el tamaño del poro. En la práctica, un rango del tamaño de poro está presente en la muestra y por lo tanto se observa un rango de tiempos de relajación.

El tiempo de relajación longitudinal de una muestra se conoce como  $T_1$ . Aunque un experimento  $T_1$  es la medida mas directa de la distribución del tamaño del poro de una muestra, tiene la desventaja que toma un tiempo largo, el cual lo hace generalmente impráctico en una perforación.

Un método más rápido es aplicar decaimientos de pulso de  $90^\circ$  de magnetización en el plano de X-Y. Esto se llama la RELAJACIÓN TRANSVERSAL.

## RELAJACIÓN TRANSVERSAL

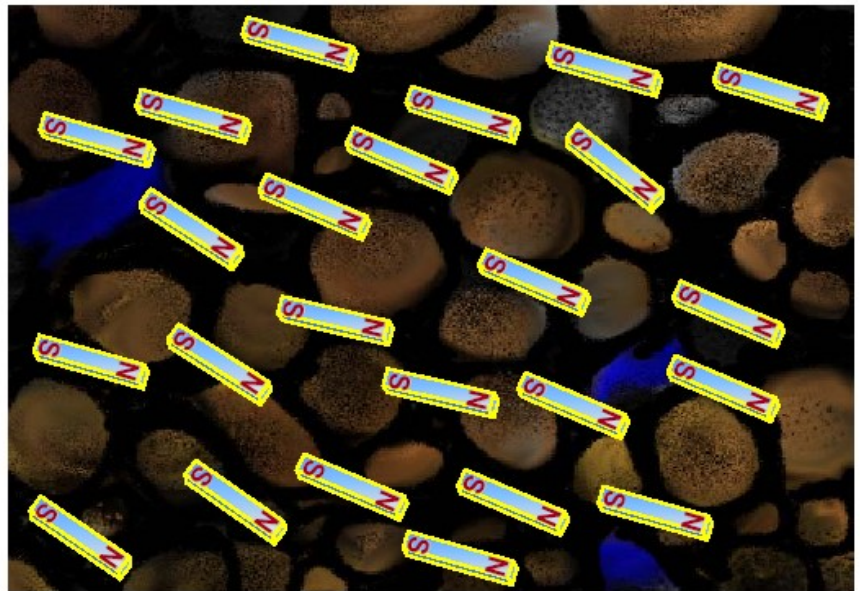
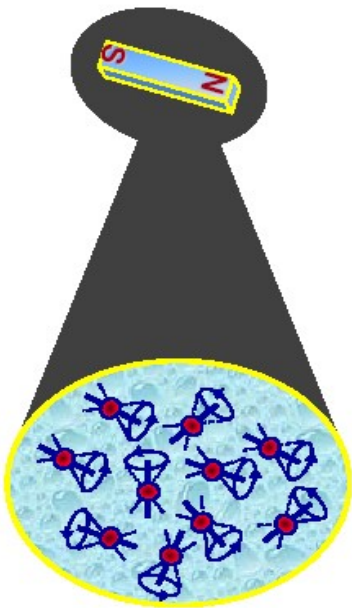
Denominada como T2. Para la mayoría de las areniscas, el T2 resulta ser aproximadamente 1.5 veces más corto que el T1 pero contiene información casi igual. La diferencia entre el T2 y el T1 es causada por eterogeneidades magnéticas pequeñas en la muestra de roca, debido a las diferencias de susceptibilidad magnética entre la matriz de la roca y el tamaño del poro (para líquidos puros, T1 iguala el T2).

Esto puede ser entendido considerando la situación después de un pulso de 90°, los spines nucleares giran en el plano perpendicular al campo magnético. Debido a las eterogeneidades, algunos spines nucleares giran más rápidamente que otros, lo que da lugar a un desfase en las disminuciones totales de la magnetización, la señal medida llega a ser más pequeña y se observa una relajación.

CARR-PURCELL ideó un método para reducir al mínimo este efecto por medio de una secuencia de PULSO-ECO. Después del pulso de 90°, los spines se defasan durante un tiempo t, después de lo cual se aplica un pulso de 180° que hace mover al spin de un tirón. Los spines nucleares que experimentaban un campo magnético más alto y que estaban "en el frente", tienen ahora que agarrar para arriba. Pero después de otro tiempo t, todos los spines serán coherentes nuevamente y un "eco" se observa con el tamaño de la magnetización original menos el número de spines que han relajado al equilibrio. La secuencia del pulso-eco se puede aplicar tan frecuentemente como sea necesario y la curva entera de relajación va a pasos de 2t y se puede medir en uno.

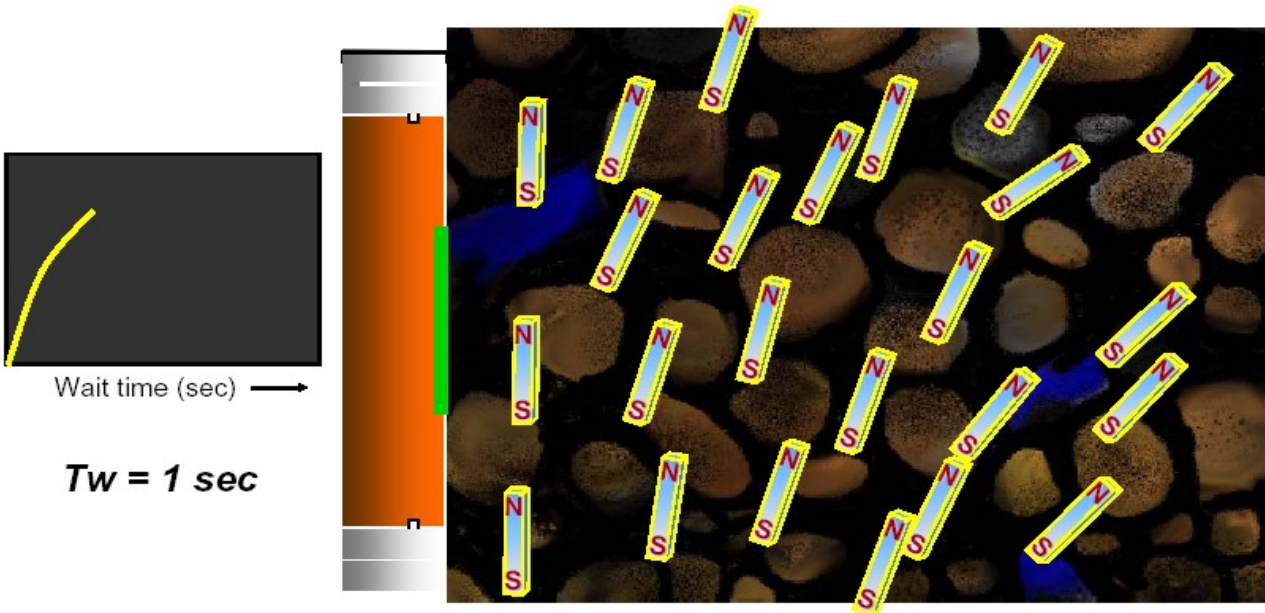
## Proton Alignment

**MRI devices measure hydrogen**  
- the building block of fluids



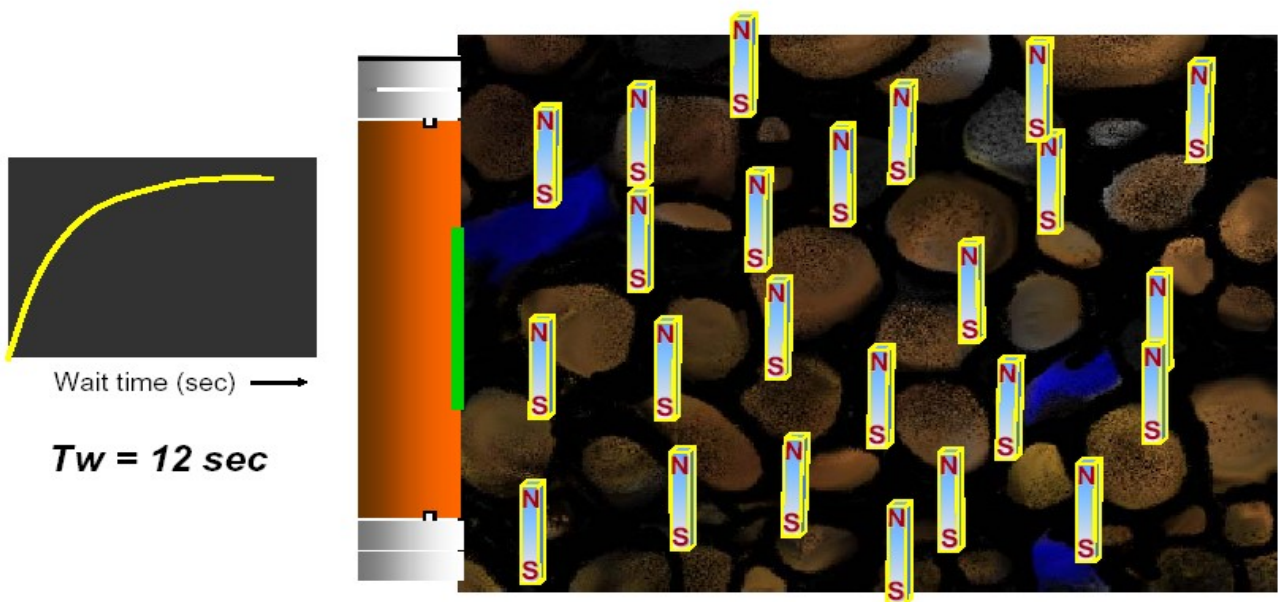
# Proton Alignment

An external magnetic field polarizes the hydrogen protons  
- the MAGNETIC



# Proton Alignment

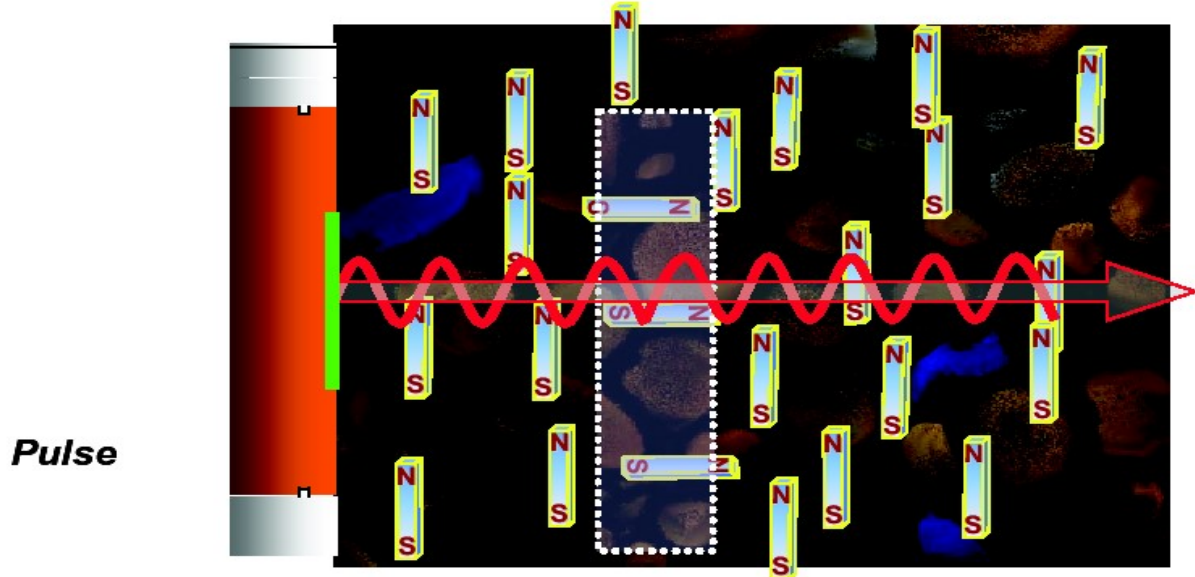
An external magnetic field polarizes the hydrogen protons  
- the MAGNETIC



# Proton Alignment

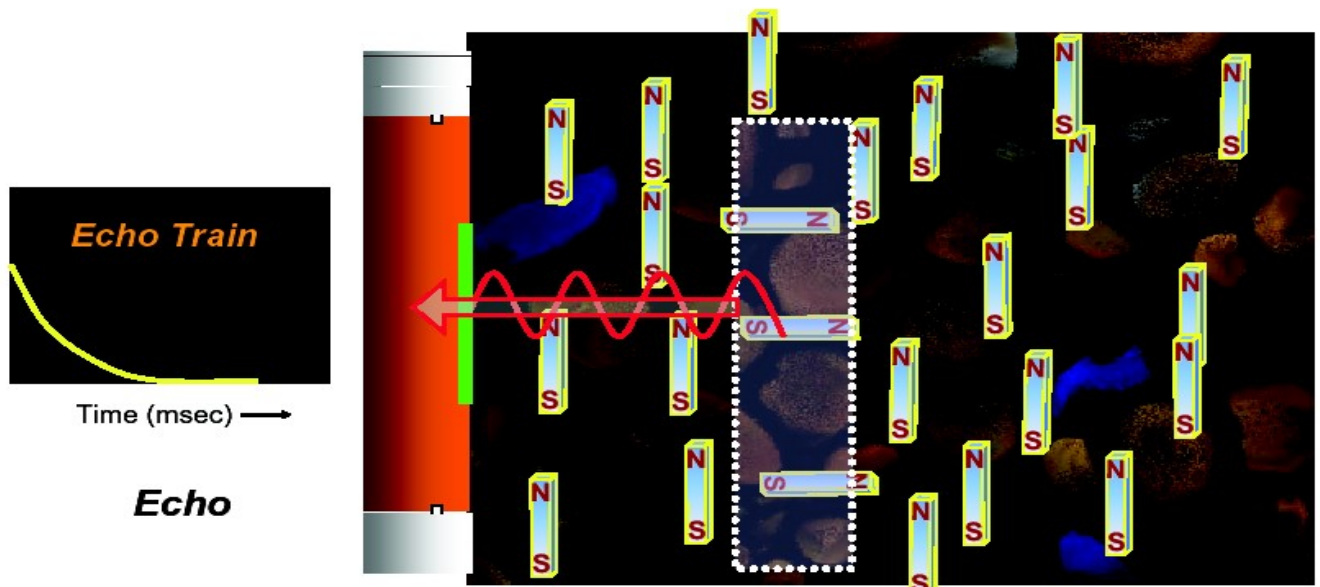


Precise Frequency / Calibrated duration radio frequency pulse flips the polarized hydrogen protons in a specific slice



## Another radio pulse spins the protons in lock step - the RESONANCE Proton Alignment

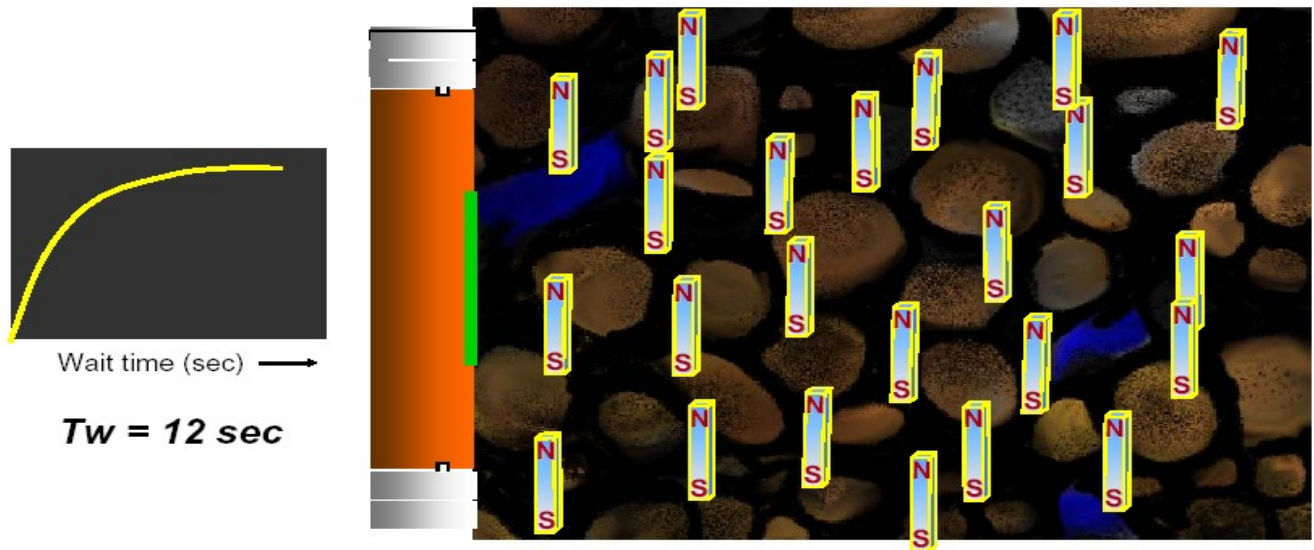
The spinning protons create a 'spin echo' of the same frequency



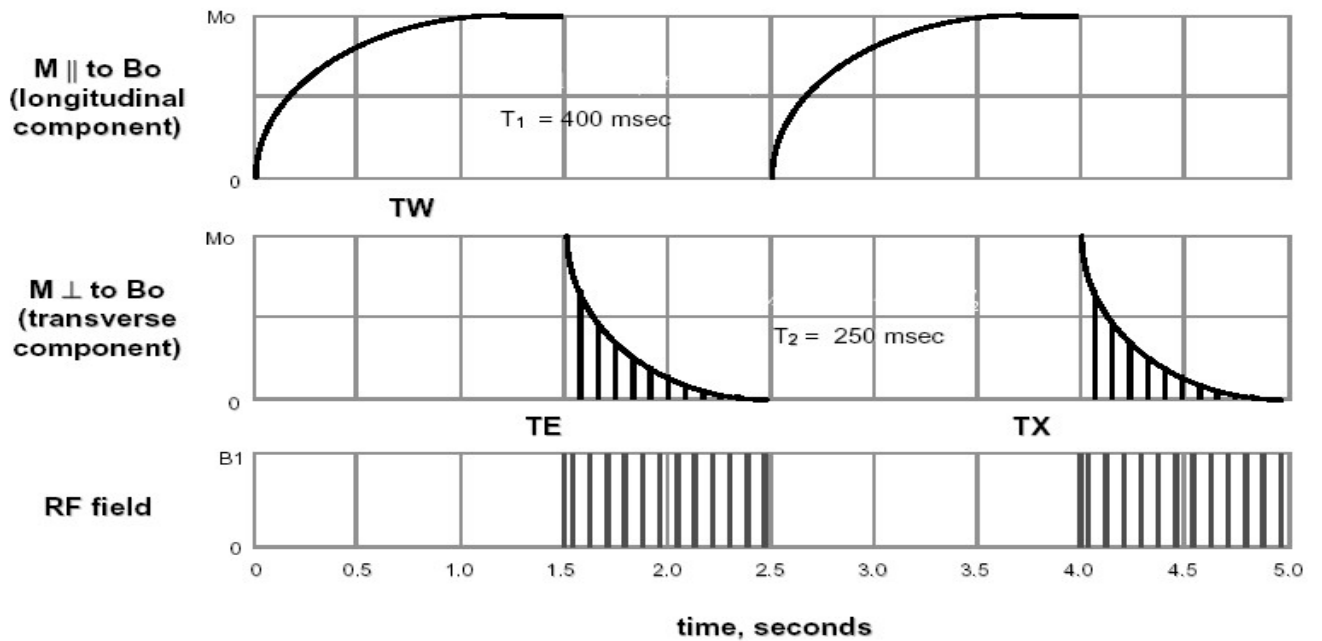
The echo amplitude is recorded  
another radio pulse spins the protons  
some protons are out of step, another - lower amplitude echo is recorded  
the process is repeated until the echo amplitude is too low to measure

# Proton Alignment

wait for the protons to re-polarize, then repeat

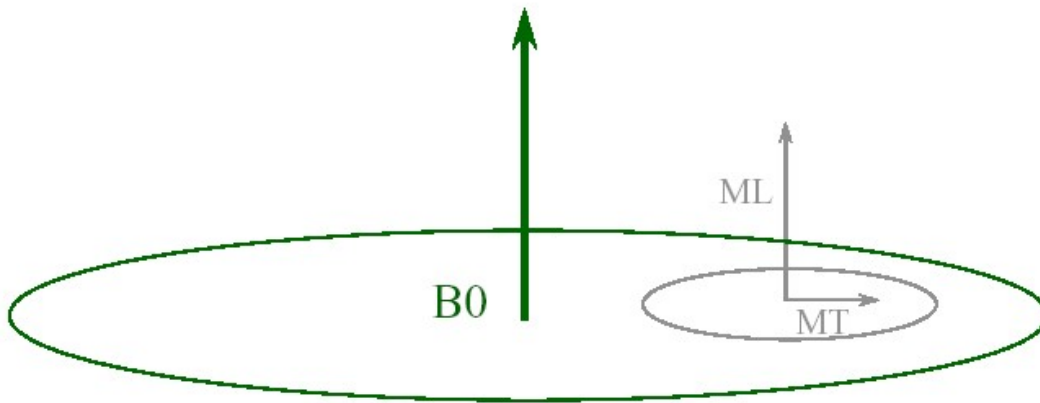


# MRI Experiment Timing





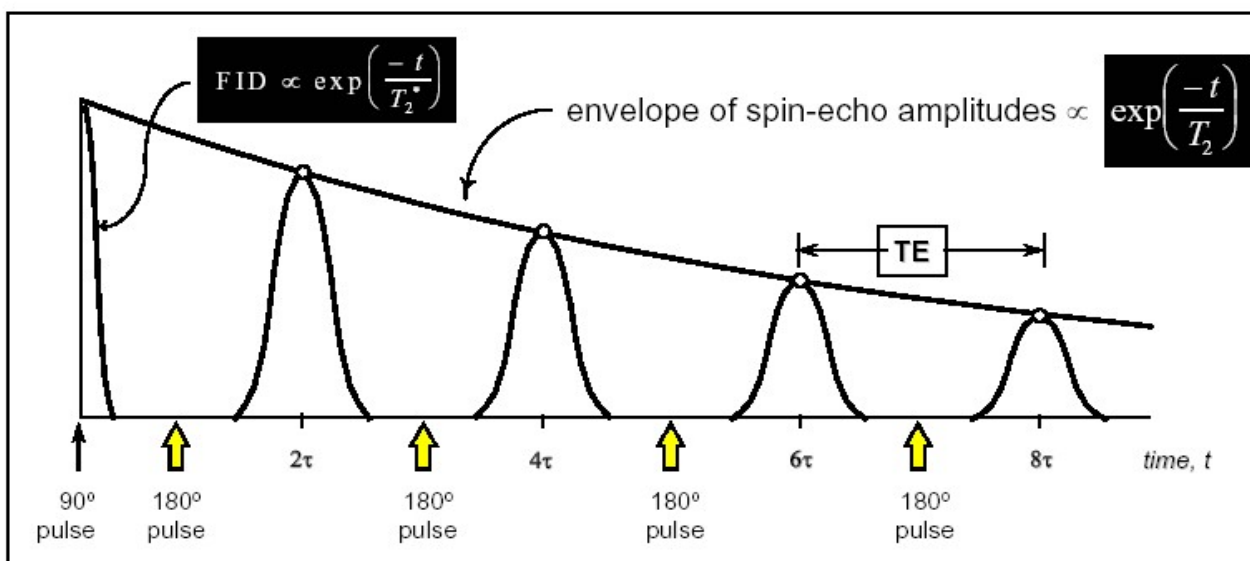
## T1 and T2



$T_1$  characterizes the rate at which longitudinal Polarization builds up

$T_2$  characterizes the rate at which transverse Relaxation decays

## Idealized CPMG Spin-Echo Train



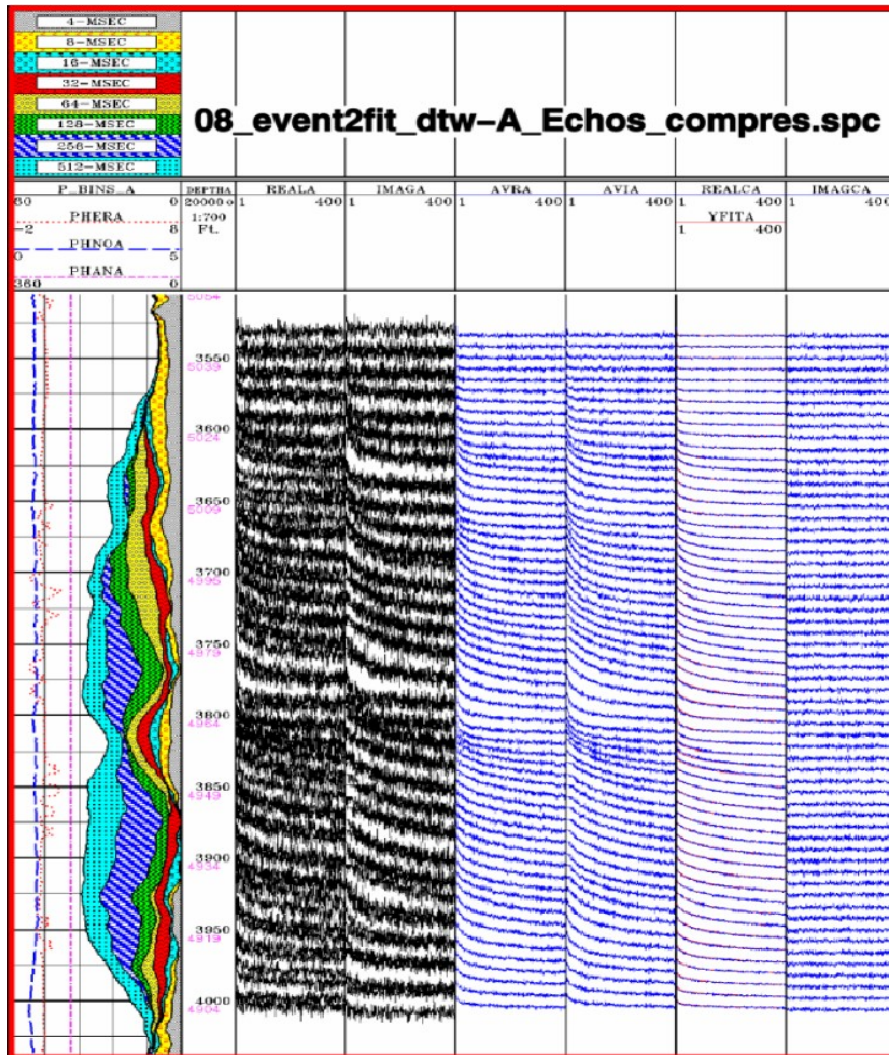
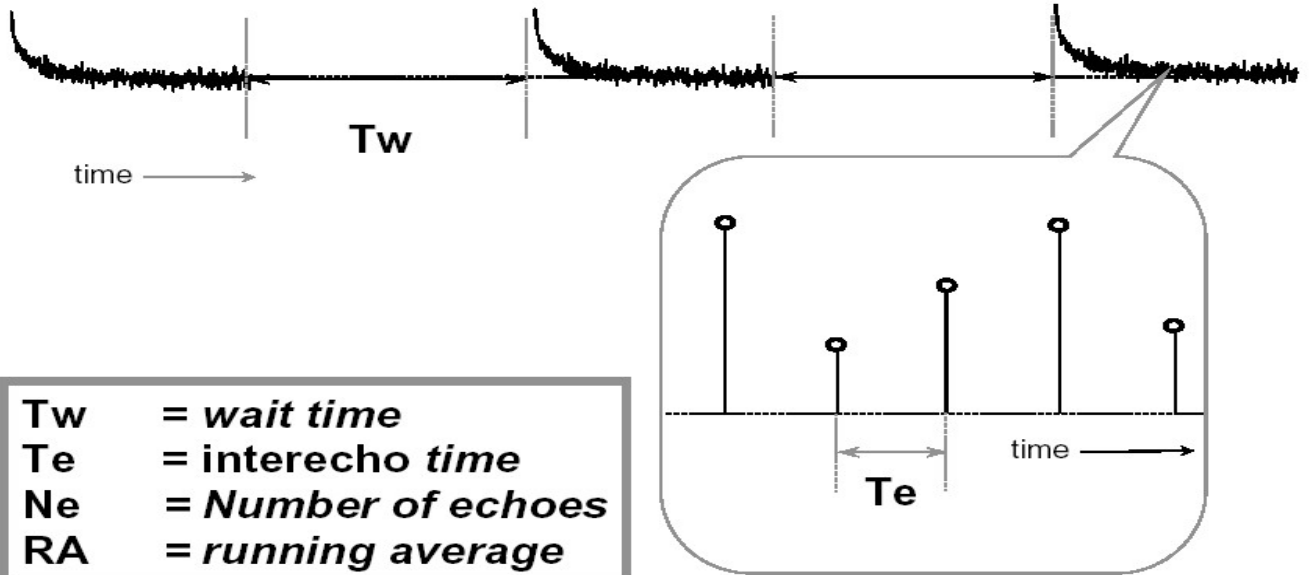
### Shortening inter-echo spacing (TE) ...

- reduces diffusion-induced shortening of  $T_2$
- improves resolution of short  $T_2$  components

### Increasing number of echoes ...

- increases signal-to-noise (SNR)
- improves resolution of long  $T_2$  components

# Data Acquisition

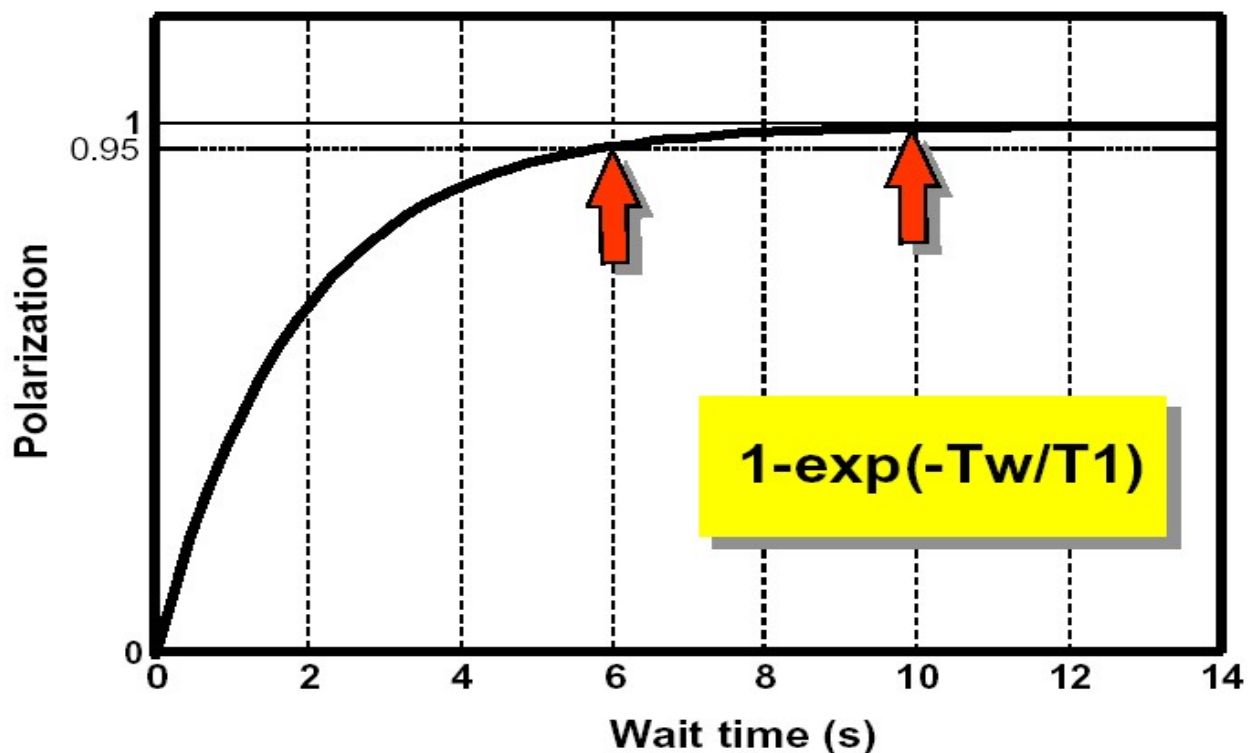


## Rule of Thumb for T1 build-up

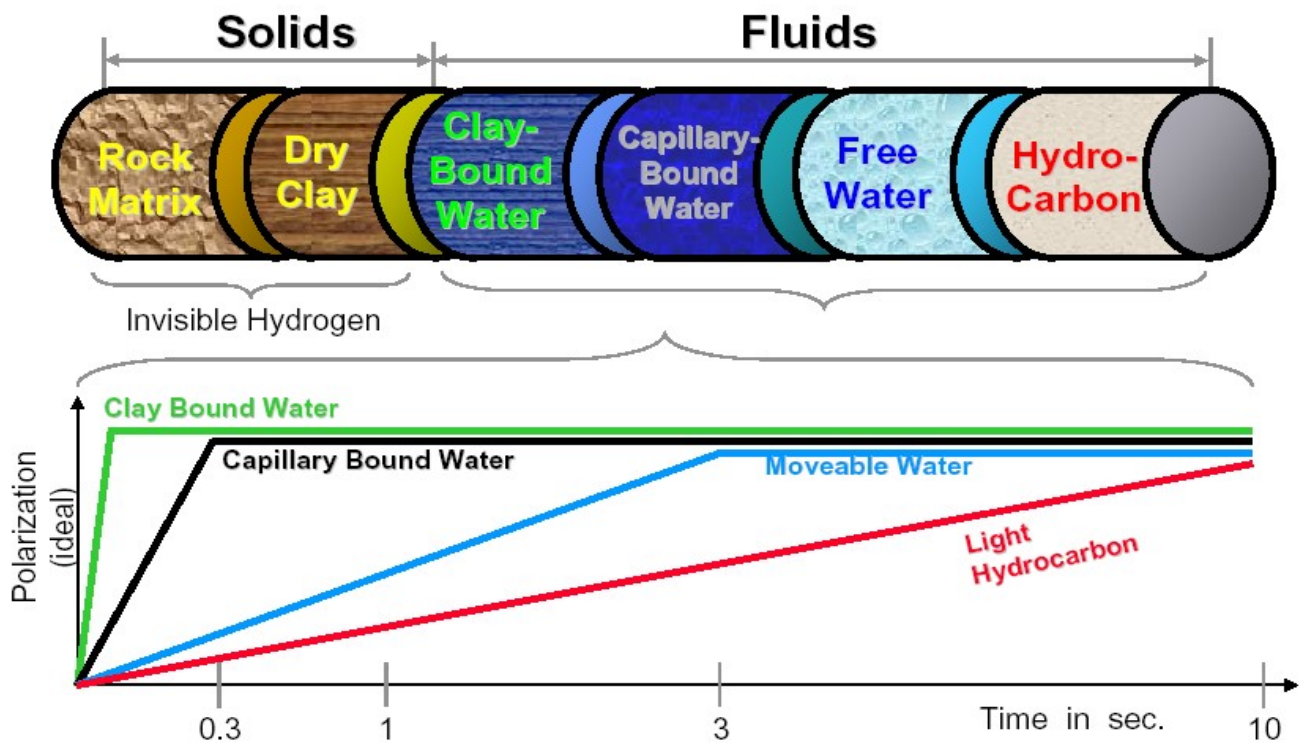
**3 T<sub>1</sub>** → **95 % Polarization**

*Must use the correct Tw (wait time) to see full porosity*

**T1=2 s**



# NMR Relaxation Time Spectrum - T1

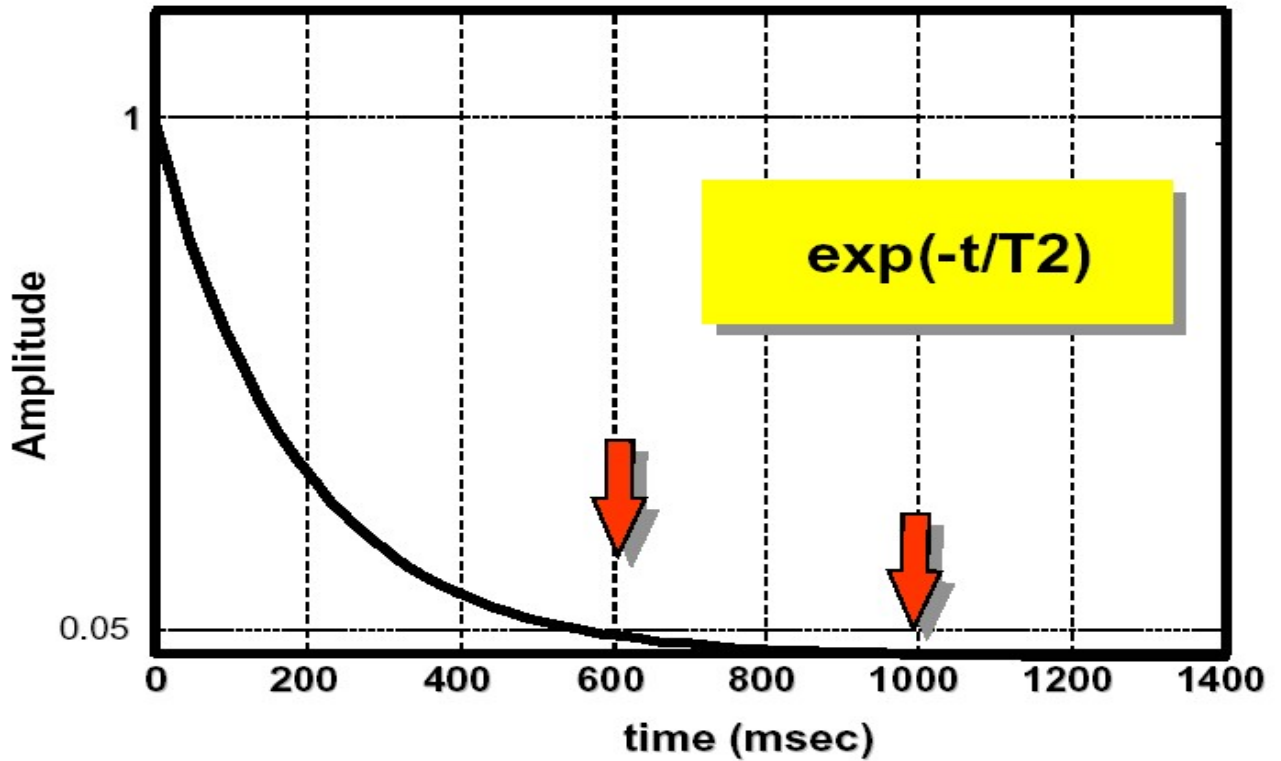


## Rule of Thumb for T2 decay

$$3 T_2 \rightarrow 95 \% \text{ Decay}$$

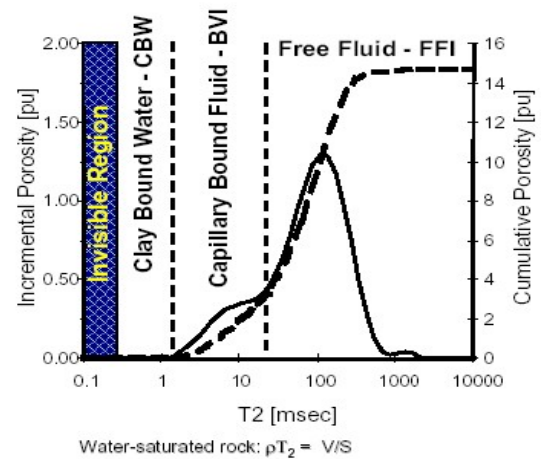
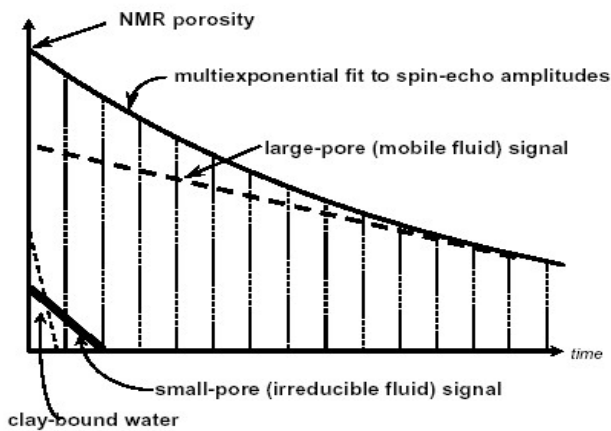
*Must use the correct  $T_e$  (interecho time) for adequate sampling*

**T2=200 msec**



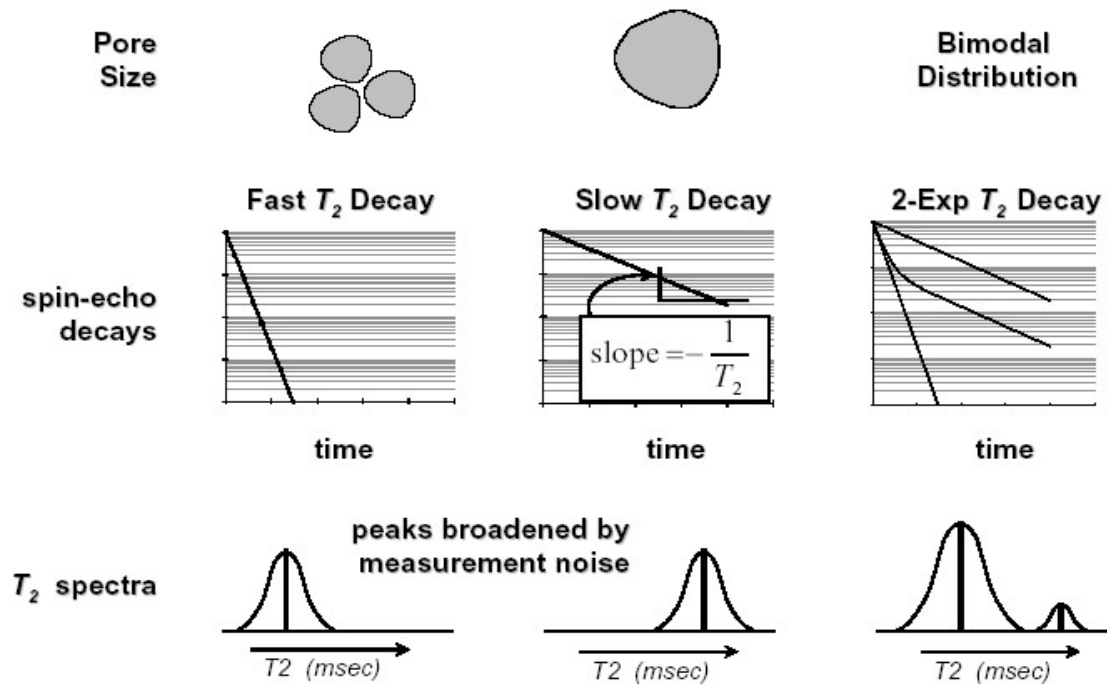
## Data Processing

Spin-echo data  $\xrightarrow{\text{MAP "Inversion" Processing}}$  T<sub>2</sub> Spectrum

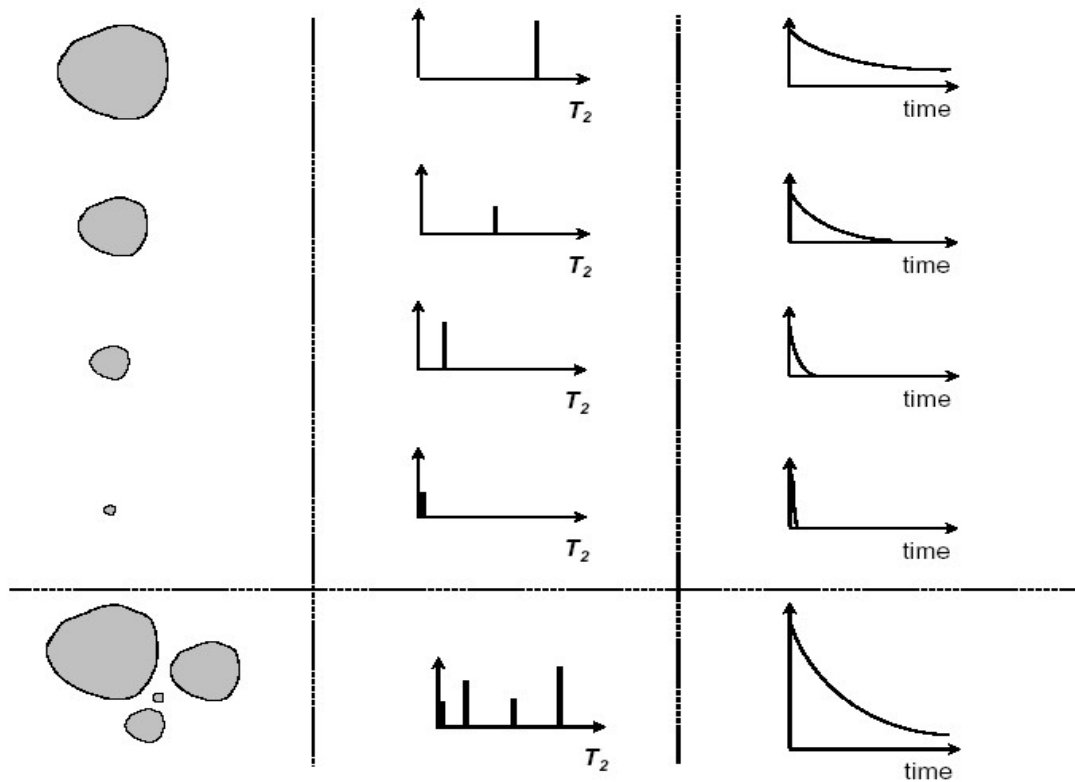


"Invisible Region" is a function of signal to noise and echo spacing

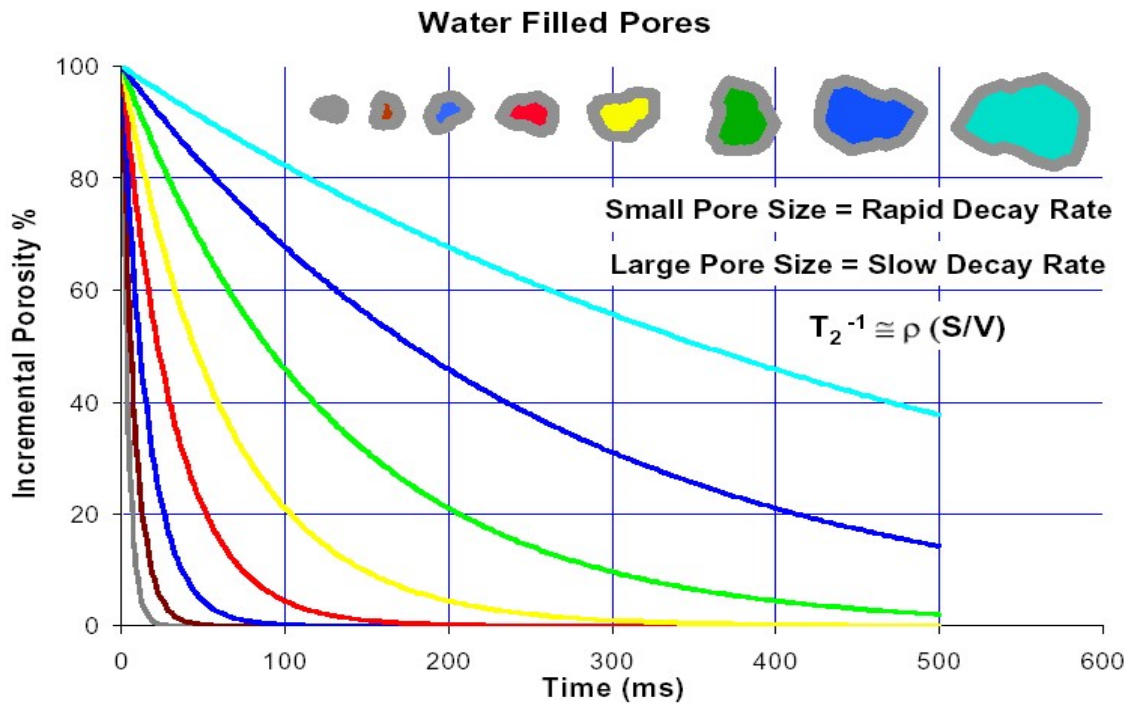
# NMR Relaxation and Pore Size



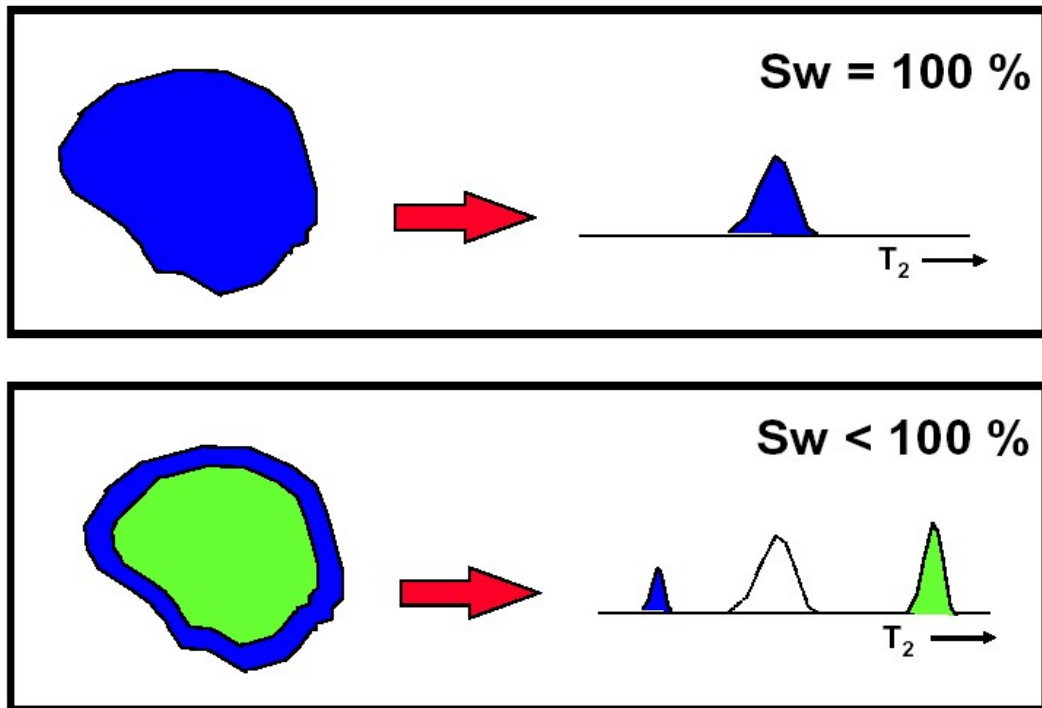
# Pore Size - T2 Relationship



# Pore Size - T2 Relationship



# Partially Saturated Water Wet Rock Behavior



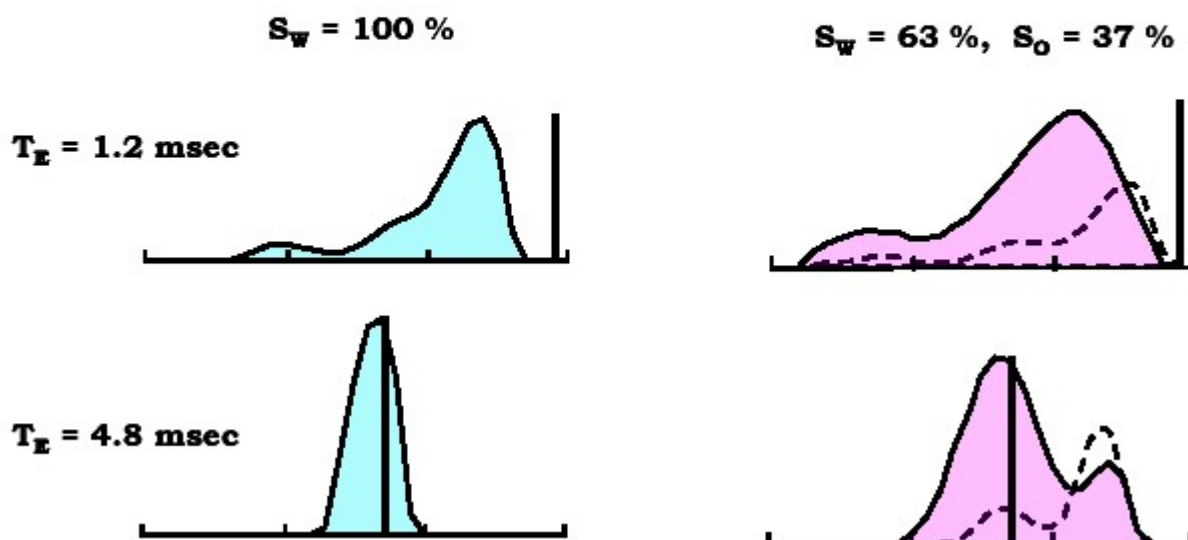
EFFECTO DEL TIPO DE FLUIDO SOBRE T1 Y T2

	<b>GAS</b>	<i>Light OIL</i>	<b>WATER</b>	<i>Heavy OIL</i>
$T_1$				
$T_2$				
<b>H.I.</b>	<b>0.2 - 0.5</b>	<b>0.8 - 0.95</b>	<b>1</b>	<b>0.8 - 1</b>





Porosity ~ 19 PU    Permeability ~ 340 md    Oil ~ 7.65 cP



DIFUSIÓN

(only for oil viscosity range of 1 - 50 cp)

