

医用生体計測  
磁気共鳴イメージング: 2回目

数理工学物質科学研究科  
電子・理工学専攻 巨瀬 勝美

2013-7-8

前回の復習

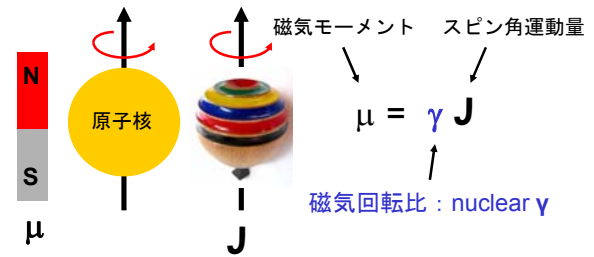
- ONMRとMRI: (強い) 静磁場と高周波(磁場)を必要とする
- ONMRとMRIの歴史: 1952年と2003年にノーベル賞(他に2回)
- 数学的準備: フーリエ変換(信号の中に、どのような周波数成分が、どれだけ含まれているか(スペクトル)を求める方法)
- 物理学的準備:
  - 力学: 重力場におけるコマの運動
  - 電磁気学: HとBの関係: 磁場の関係する現象では、H(印加磁場)の概念が極めて重要である(Bに対するオマケではない!)
  - 磁性体: 反磁性体, 常磁性体, 強磁性体など

水に含まれるプロトンスピンは、 $\gamma = 4 \times 10^{-9}$ の常磁性体である。静磁場を加えた時に生成される核磁化を、共鳴的手法で検出するのがNMRである。

今回の講義内容

1. スピン角運動量と磁気モーメント
2. 核スピン系と核磁化
3. ラーモア(Larmor)歳差運動
4. 回転座標系と回転磁場
5. NMR信号(FID)と $T_2^*$ ,  $T_1$ 緩和
6. スピンエコーと $T_2$ 緩和

スピン角運動量と磁気モーメント



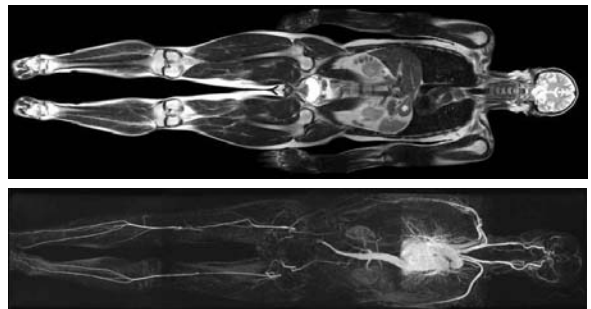
Jを持つ原子核は、同時に $\mu$ を持ち、 $\mu = \gamma J$ という関係式がなりたつ。 $\gamma$ は、磁気回転比という原子核に固有の定数である。

MRIで使われる原子核種

核種	スピン量子数	共鳴周波数(MHz/T)	天然存在比(%)
$^1\text{H}$	1/2	42.6	99.985
$^{19}\text{F}$	1/2	40.1	100
$^3\text{He}$	1/2	32.4	-
$^{31}\text{P}$	1/2	17.2	100
$^{129}\text{Xe}$	1/2	11.8	26.44
$^{23}\text{Na}$	3/2	11.3	100
$^{13}\text{C}$	1/2	10.7	1.108
$^2\text{H}$	1	6.54	0.015
$^{17}\text{O}$	5/2	5.77	0.037

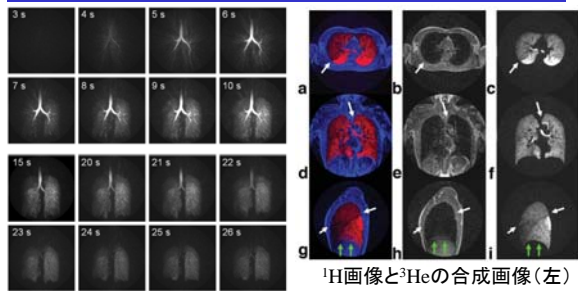
イメージングとして、実用的なレベルで使用されるのは、 $^1\text{H}$ のみ

$^1\text{H}$ のMR画像



全身の断層像。全身の三次元データより作成。下は血管系の最大値投影(MIP)像。(Philips社HPより)

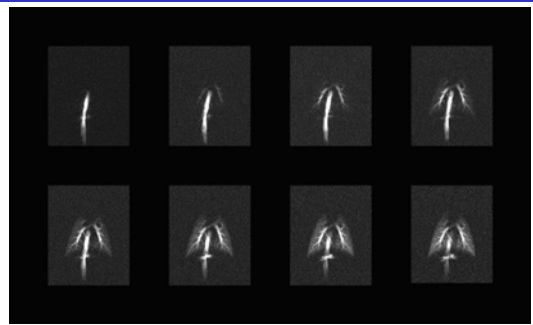
### hyperpolarized $^3\text{He}$ のMR画像



$^1\text{H}$ 画像と $^3\text{He}$ の合成画像(左)

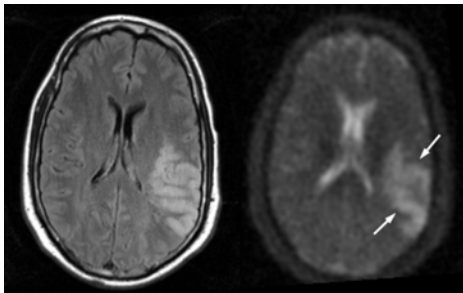
超偏極 $^3\text{He}$ ガス吸入における時間分解最大値投影(MIP)像. 1~9秒までは吸入期. 10~21秒は呼吸停止期. 22~25秒は呼気期.  
J. H. Holmes et al. Magn. Reson. Med. 59:1062-1071(2008).

### hyperpolarized $^{13}\text{C}$ のMR画像



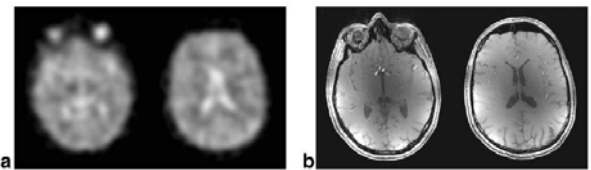
大腿静脈より1ml/sで静注後に1秒毎に撮像(Yorkshire pig).  
M. Ishii et al. Magn. Reson. Med. 57:459-463 (2007).

### $^{23}\text{Na}$ のMR画像



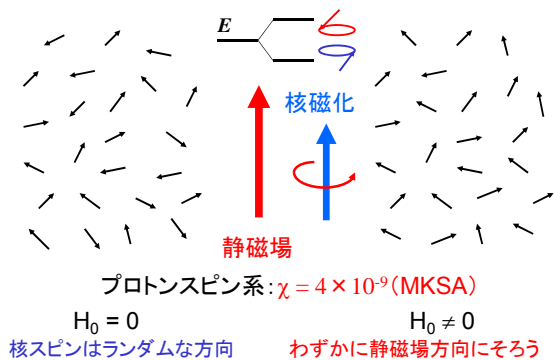
1.5Tにおける $^1\text{H}$ -FLAIR像 4.7Tにおける $^{23}\text{Na}$ 像(発作24時間後)  
R. Bammer, ISMRM2008 weekend course

### $^{17}\text{O}$ のMR画像

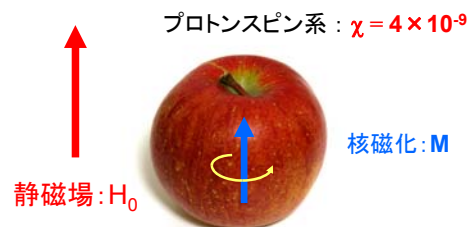


7TにおけるNatural abundanceの $^{17}\text{O}$ 像(左)と $^1\text{H}$ (右)  
共鳴周波数は40.8MHzと300MHz  
Hoffmann et al. MRM, 2011.

### 核磁化の生成(古典的な見方)

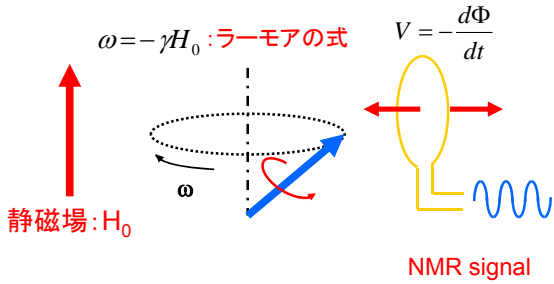


### 核磁化の検出?



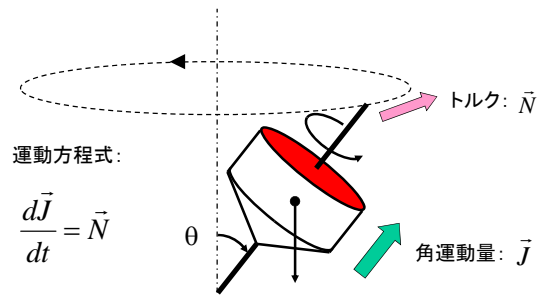
核磁化は極めて小さいので、どのようにすれば、検出できるだろうか? → 歳差運動を利用する!

### 核磁化の歳差運動



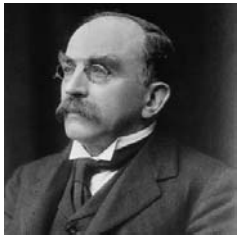
静磁場 $H_0$ の中で、何らかの方法で、核磁化を静磁場方向から傾けると、核磁化は、静磁場の周りに、静磁場強度に比例した周波数で歳差運動する。核磁化は、周囲に振動する磁場を生み出すので、コイルで誘導電圧を検出することができる。

### コマの歳差運動

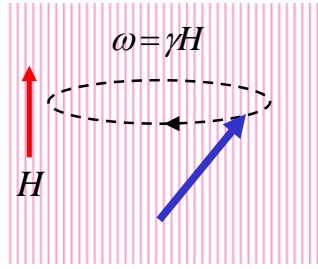


重力場の中で回転するコマは、鉛直軸の周りに歳差運動する

### Joseph Larmor

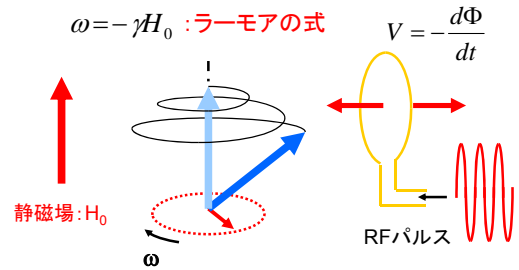


Joseph Larmor



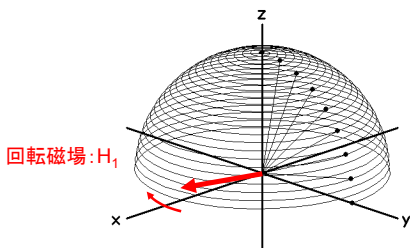
アイルランドの物理学者（寺沢寛一氏の師匠）。ラーモア歳差運動：磁場の中で、磁気モーメントを持ったスピンは、磁場の周りに、磁場の強さに比例した周波数で歳差運動を行う。

### 横磁化の生成とNMR信号：回転磁場の印加



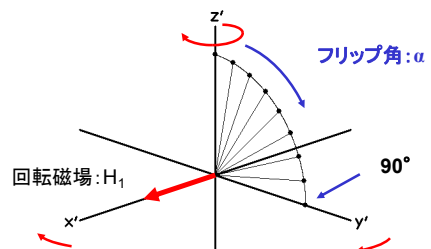
歳差運動の周波数と同じ周波数の回転磁場を切ると、核磁化は、自由に磁場を加えると、トルクを受けて核磁化が倒れる。回転磁場を切ると、核磁化は、自由に歳差運動して、周囲に変動する磁場を生成し、コイルにNMR信号を誘起する。

### 実験室系で見た核磁化の動き



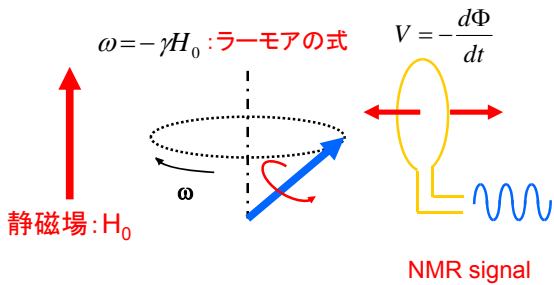
歳差運動しながらxy面へと倒れていく

### 回転座標系で見た核磁化の動き



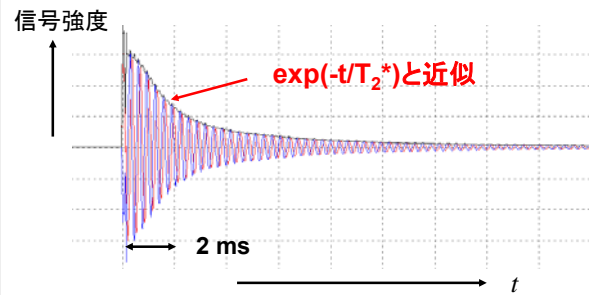
ラーモア歳差運動の周波数で回転する座標系で核磁化を観察すると、z'軸からy'軸の方へ倒れていく単純な運動となる。これは、回転座標系で静止した回転磁場の周りの歳差運動である。

### 核磁化の歳差運動



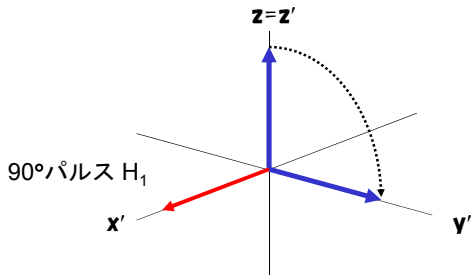
静磁場  $H_0$  の中で、何らかの方法で、核磁化を静磁場方向から傾けると、核磁化は、静磁場の周りに、静磁場強度に比例した周波数で歳差運動する。核磁化は、周囲に振動する磁場を生み出すので、コイルで誘導電圧を検出することができる。

### Free Induction Decay (FID) : 自由誘導減衰



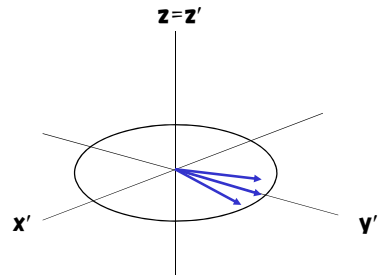
NMR信号は、静磁場の不均一性のため、時間的に減衰するのでこれを、Free induction decay (FID) と呼ぶ。

### FIDにおける信号減衰のメカニズム (1)



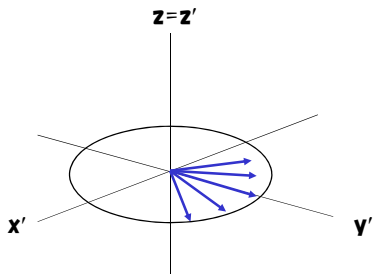
回転座標系の  $x'$  軸に、高周波磁場  $H_1$  を加えると、核磁化は、 $y'$  軸へと倒れる。

### FIDにおける信号減衰のメカニズム (2)



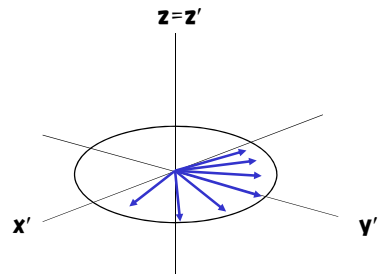
90°倒れた核磁化は、静磁場の不均一性のため、歳差運動の周波数が異なり、位相がばらばらになっていく。

### FIDにおける信号減衰のメカニズム (3)



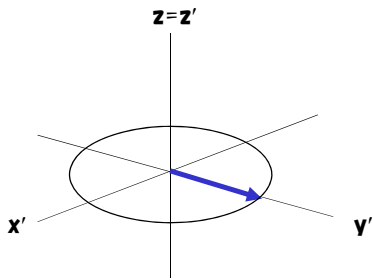
90°倒れた核磁化は、静磁場の不均一性のため、歳差運動の周波数が異なり、位相がばらばらになっていく。

### FIDにおける信号減衰のメカニズム (4)



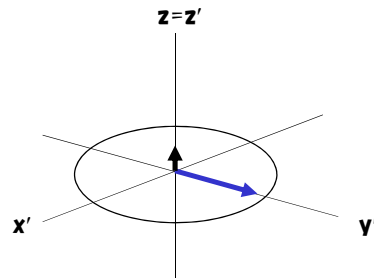
90°倒れた核磁化は、静磁場の不均一性のため、歳差運動の周波数が異なり、位相がばらばらになっていく。

### 横磁化の減衰と縦磁化の緩和 ( $T_1$ )



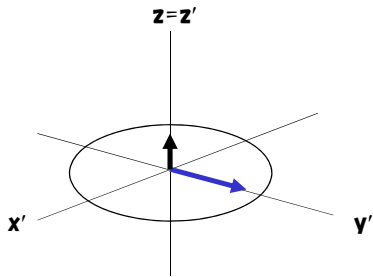
FIDにおいては、横磁化が減衰すると同時に、縦磁化は、静磁場方向に回復していく。この時の時定数を $T_1$ という。

### 横磁化の減衰と縦磁化の緩和 ( $T_1$ )



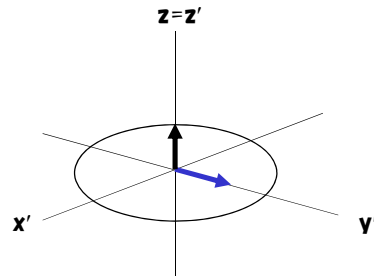
FIDにおいては、横磁化が減衰すると同時に、縦磁化は、静磁場方向に回復していく。この時の時定数を $T_1$ という。

### 横磁化の減衰と縦磁化の緩和 ( $T_1$ )



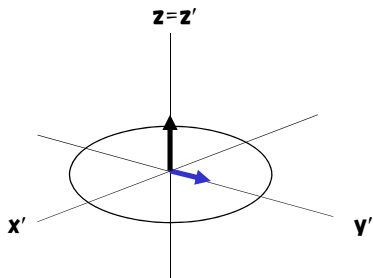
FIDにおいては、横磁化が減衰すると同時に、縦磁化は、静磁場方向に回復していく。この時の時定数を $T_1$ という。

### 横磁化の減衰と縦磁化の緩和 ( $T_1$ )



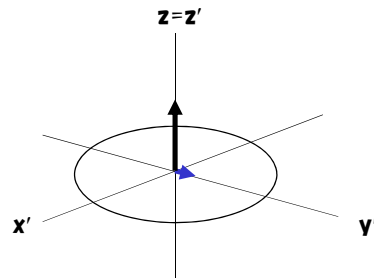
FIDにおいては、横磁化が減衰すると同時に、縦磁化は、静磁場方向に回復していく。この時の時定数を $T_1$ という。

### 横磁化の減衰と縦磁化の緩和 ( $T_1$ )



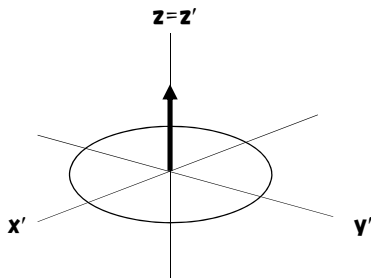
FIDにおいては、横磁化が減衰すると同時に、縦磁化は、静磁場方向に回復していく。この時の時定数を $T_1$ という。

### 横磁化の減衰と縦磁化の緩和 ( $T_1$ )



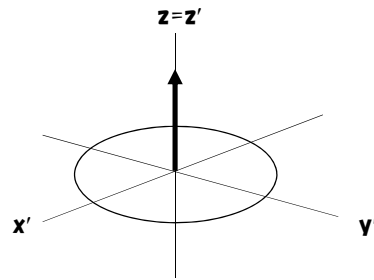
FIDにおいては、横磁化が減衰すると同時に、縦磁化は、静磁場方向に回復していく。この時の時定数を $T_1$ という。

### 横磁化の減衰と縦磁化の緩和 (T<sub>1</sub>)



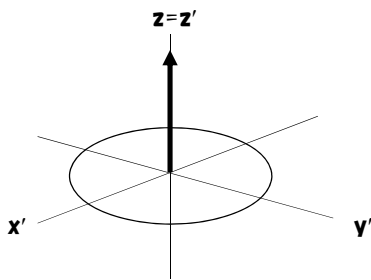
FIDにおいては、横磁化が減衰すると同時に、縦磁化は、静磁場方向に回復していく。この時の時定数をT<sub>1</sub>という。

### 横磁化の減衰と縦磁化の緩和 (T<sub>1</sub>)



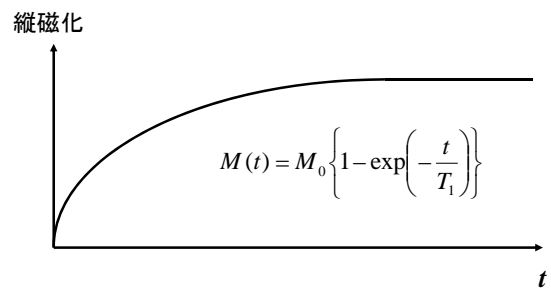
FIDにおいては、横磁化が減衰すると同時に、縦磁化は、静磁場方向に回復していく。この時の時定数をT<sub>1</sub>という。

### 横磁化の減衰と縦磁化の緩和 (T<sub>1</sub>)



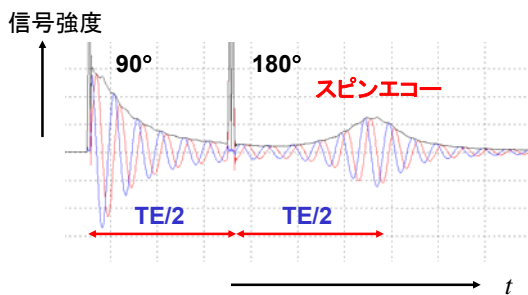
FIDにおいては、横磁化が減衰すると同時に、縦磁化は、静磁場方向に回復していく。この時の時定数をT<sub>1</sub>という。

### 縦磁化の緩和 (回復) : T<sub>1</sub>



FIDにおいては、横磁化が減衰すると同時に、縦磁化は、静磁場方向に回復していく。この時の時定数をT<sub>1</sub>という。

### スピネコー



TE/2後に180°パルスを加えると、180°パルスからTE/2後にスピネコーが発生する。

### スピネコーの発見



Erwin Hahn

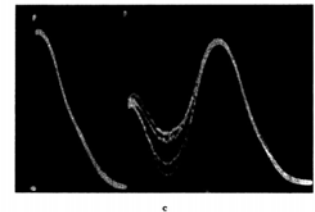
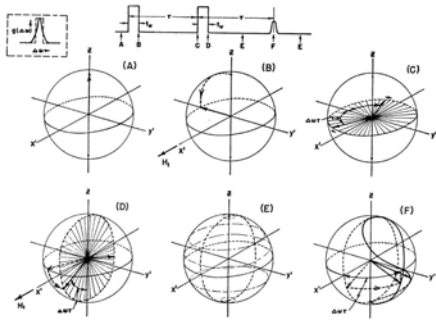


FIG. 2. Oscillographic traces for proton echoes in glycerine. The two upper photographs indicate broad and narrow signals corresponding to H<sub>2</sub> fields of good and poor homogeneity. The pulses, scarcely visible, are separated by 0.0005 sec. The induction decay following the first pulse in the top trace has an initial dip due to receiver saturation. The bottom photograph shows random interference of the induction decay with the echo for several exposures. The two r-f pulses are phase incoherent relative to one another.

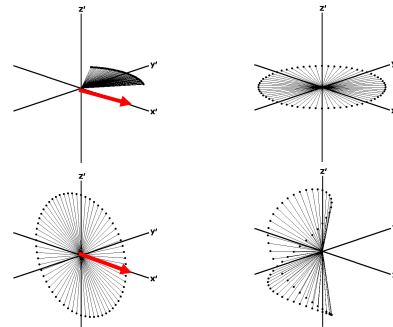
1950年、スピネコーを発見(29歳の時:指導教員はいなかった)

### スピネコーのメカニズム



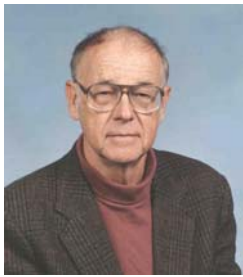
最初のスピネコーは、90°-90°によるものだった。

### スピネコーのメカニズム

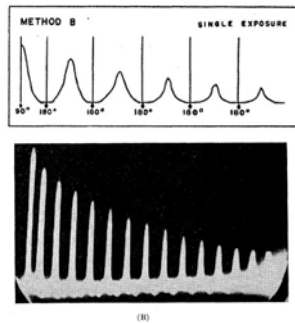


計算機シミュレーションによる核磁化分布

### 90°-180°によるスピネコー

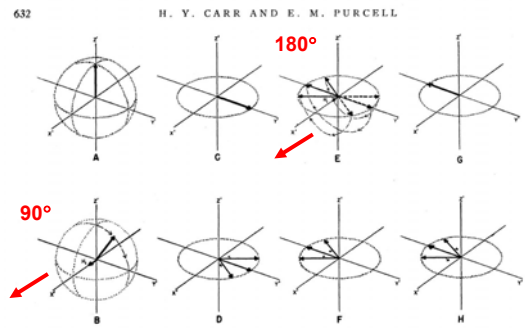


Carr and Purcell



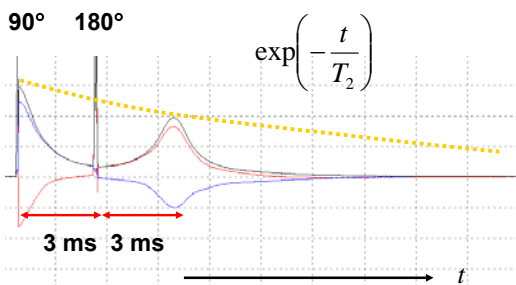
1954年, CarrとPurcellは90°-180°パルスによるスピネコーを提案

### 90°-180°によるスピネコー発生メカニズム



回転座標系のx'軸に、高周波磁場H<sub>1</sub>を2度印加する。

### スピネコーによるT<sub>2</sub>計測



TEを変えながらスピネコー信号強度を計測すると、静磁場不均一性に影響されないT<sub>2</sub>による緩和プロセスが計測できる。