

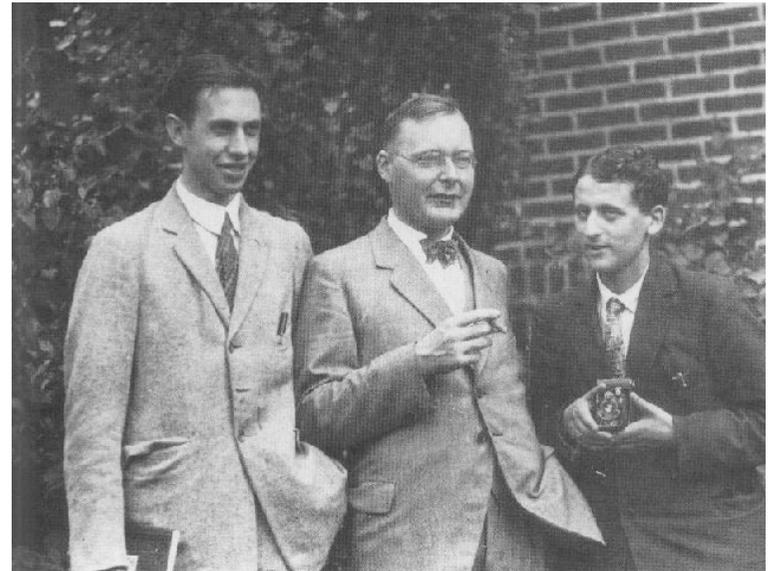
^{129}Xe ガスの核偏極方法

有本靖 KEK

日付 2010年8月22日 サマーチャレンジ

スピン

ウーレンベック



↑
クラマース

↑
ハウトスミット

- * クラマース、ウーレンベックとハウトスミットにより提唱
- * 量子化された角運動量
 - * 自転に相当
 - * 磁気モーメントの起源

スピン提唱者達

原子のスピン

- * 核スピン
 - * 構成する陽子、中性子によるスピン
- * 原子(電子)スピン
 - * 構成する電子によるスピン

偏極度とは

- * 系全体のスピンの向きがどの程度揃っているかを表わす量

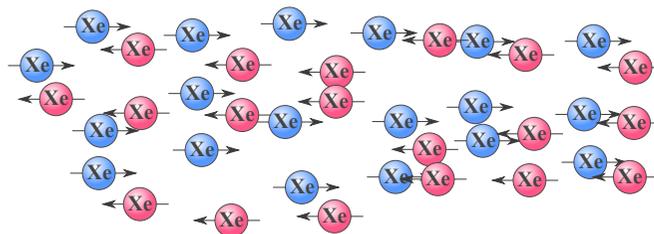
$$P = \frac{N^+ - N^-}{N^+ + N^-}$$

N^+ :スピンの向きが量子化軸に平行な粒子の数

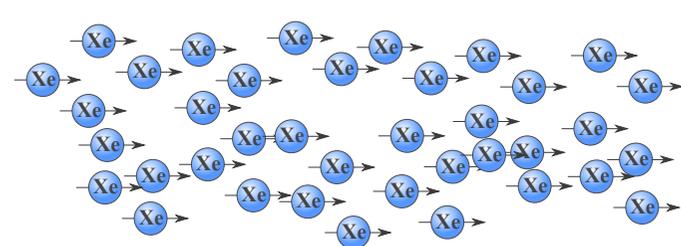
N^- :スピンの向きが量子化軸に反平行な粒子の数

- * $P=0$ ならば無偏極となる。 $P=1$ の場合すべての粒子のスピンの向きが揃っている。

Unpolarized gas



Polarized gas



キセノン原子

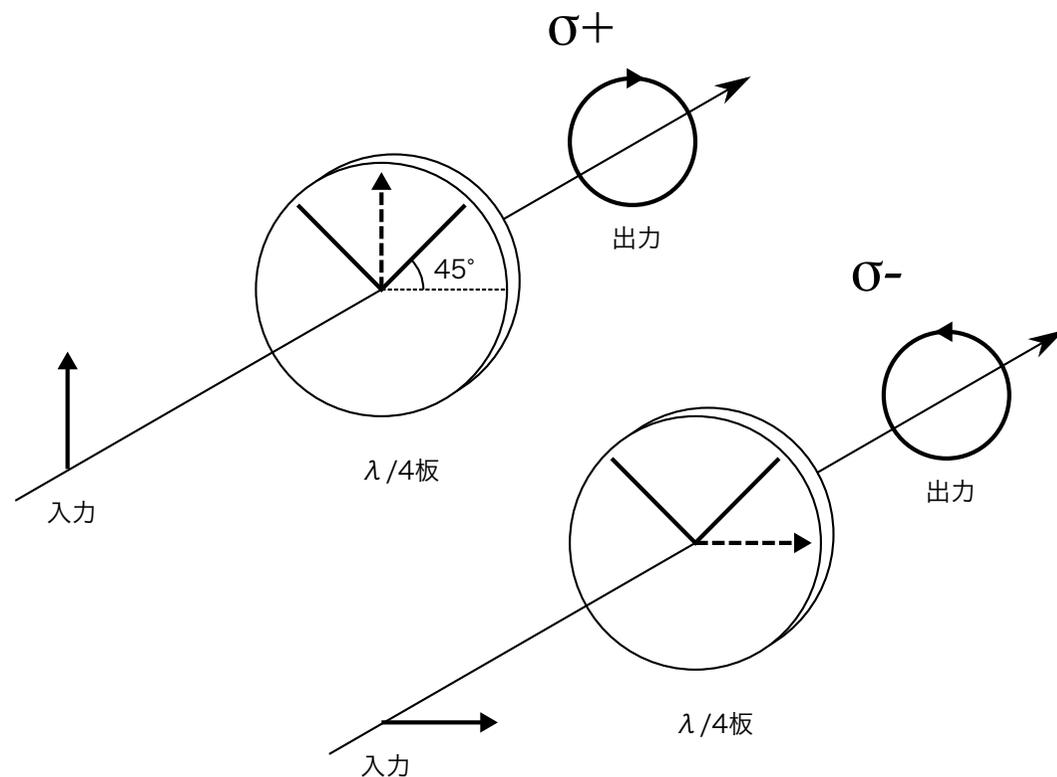
- ✧ 元素記号： ^{129}Xe
- ✧ 希ガス
- ✧ 核スピン $1/2$
- ✧ 磁気回転比： $\frac{\gamma}{2\pi} = -11.777 \quad [\text{MHz} \cdot \text{T}^{-1}]$
 - ✧ 磁気モーメント： $\mu = \gamma \hbar I$

Xe原子核偏極方法

- * レーザー光を偏極させる。
- * 偏極したレーザー光をRb原子に当ててRb原子を偏極させる。
- * Rb原子の偏極をXe核に移行する。

レーザー光の偏極

- ❖ 直線偏光したレーザー光を1/4波長板に入射すると円偏光したレーザー光が得られる。



矢印は光の振動面を表わしている

Rb原子の偏極

- ❖ 磁場のない場合のRb原子のエネルギー準位：

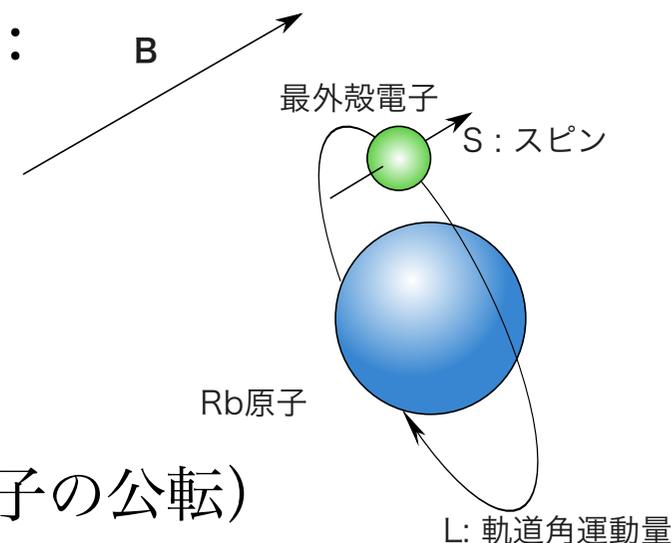
全軌道角運動量で決まる

- ❖ 全軌道角運動量：

スピン（電子の自転） + 軌道角運動量（電子の公転）

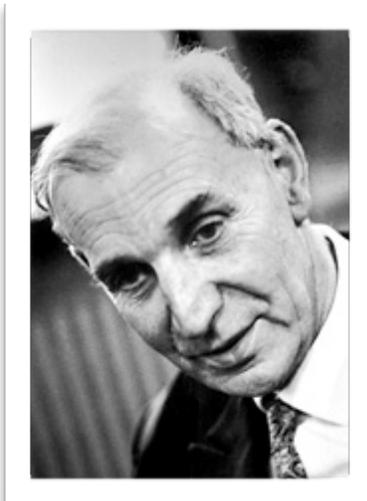
$$\mathbf{J} = \mathbf{S} + \mathbf{L}$$

- ❖ 量子化軸成分： $m_J = m_S + m_L$



光ポンピング法

- ❖ 1950年にA. Kastlerによって発明
- ❖ この功績によりKastlerは1966年にノーベル物理学賞受賞
- ❖ 様々な分野で利用されている。



QUELQUES SUGGESTIONS CONCERNANT LA PRODUCTION OPTIQUE ET LA DÉTECTION OPTIQUE
D'UNE INÉGALITÉ DE POPULATION
DES NIVEAUX DE QUANTIFICATION SPATIALE DES ATOMES.
APPLICATION A L'EXPÉRIENCE DE STERN ET GERLACH ET A LA RÉSONANCE MAGNÉTIQUE (1)

Par ALFRED KASTLER.

Laboratoire de Physique de l'École Normale Supérieure, Paris.

Sommaire — 1° En éclairant les atomes d'un gaz ou d'un faisceau atomique par des radiations de résonance orientées (faisceau lumineux ayant une direction déterminée) et convenablement polarisées, il est possible — lorsque ces atomes au niveau fondamental sont paramagnétiques (nombres quantiques $J \neq 0$ ou $F \neq 0$) — d'obtenir un peuplement inégal des divers sous-niveaux m qui caractérisent la quantification spatiale ou magnétique du niveau fondamental. Une évaluation grossière montre qu'avec les moyens d'irradiation actuels, cette dissymétrie de population peut devenir fort importante. Il résulte de l'examen des probabilités de passage des transitions Zeeman π et σ que l'illumination en lumière naturelle ou en lumière polarisée rectilignement permet de concentrer les atomes suivant les cas, soit vers les sous-niveaux m du milieu ($m = 0$), soit, au contraire, vers les sous-niveaux extérieurs ($|m|$ maximum). L'emploi de lumière polarisée circulairement permet de créer une dissymétrie de population entre les niveaux m négatifs et les niveaux m positifs, le sens de cette dissymétrie pouvant être inverse en inversant le sens de polarisation circulaire de la lumière incidente. Cette création de dissymétrie peut s'obtenir soit en l'absence de champ extérieur, soit en présence d'un champ magnétique ou d'un champ électrique. En présence d'un champ extérieur les divers sous-niveaux m (dans le cas d'un champ magnétique) ou $|m|$ (dans le cas d'un champ électrique) sont énergétiquement distincts, et la création d'une dissymétrie de population par le procédé optique correspond à une augmentation ou à une diminution de la « température de spin ».

2° Une dissymétrie de population des sous-niveaux m de l'état fondamental peut être détectée optiquement par l'examen de l'intensité et de la polarisation des radiations de résonance optique. L'emploi de récepteurs photoélectriques et l'utilisation d'une technique de modulation permettent une détection commode et sensible.

3° L'examen optique des diverses branches en lesquelles se divise un pinceau atomique dans l'expérience de Stern et Gerlach permet le contrôle du niveau quantique m des atomes de chacune de ces branches. Cette méthode optique permet d'étendre l'analyse magnétique des atomes dans l'expérience de Stern et Gerlach à l'étude des niveaux excités métastables.

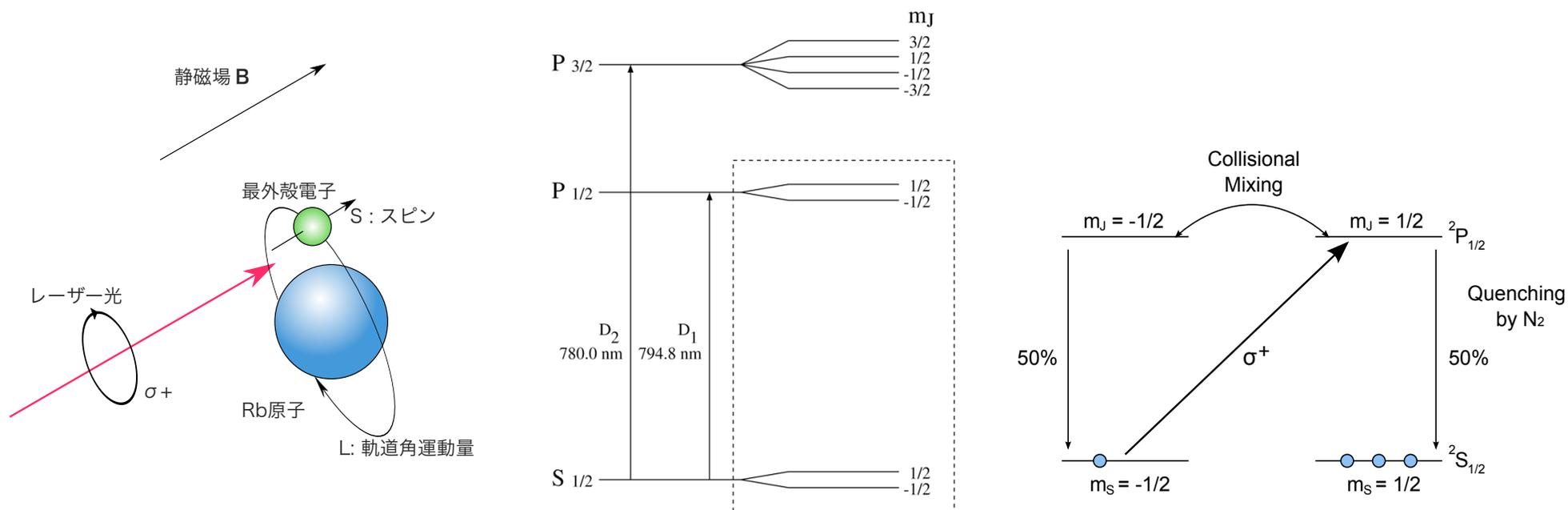
4° Dans les expériences de résonance magnétique, les transitions induites par le champ magnétique oscillant de radiofréquence tendent à détruire l'inégalité de population des niveaux m . L'étude de la résonance magnétique des atomes d'un faisceau atomique peut donc se faire en remplaçant les champs magnétiques non uniformes du dispositif de Rabi, l'un par un producteur optique de dissymétrie qui précède le dispositif de résonance magnétique, l'autre par un détecteur optique de dissymétrie à la sortie du résonateur. La méthode optique permet d'étendre l'étude de la résonance magnétique à des niveaux métastables. Cette méthode permet d'étudier les transitions entre niveaux hyperfins dans un champ nul, les effets Zeeman hyperfins dans des champs faibles et les effets Paschen-Back hyperfins dans des champs forts. Grâce à la connexion entre l'effet Zeeman hyperfin et l'effet Paschen-Back hyperfin on peut ainsi analyser optiquement la résonance nucléaire pure dans des champs qui découpent les vecteurs \vec{J} et \vec{I} . Enfin, l'étude de l'effet Stark d'un niveau atomique par la méthode de résonance peut également se faire optiquement. Le procédé d'étude optique d'un faisceau atomique permet l'emploi de faisceaux larges et à contours assez mal définis. L'appareillage à réaliser pour cette étude est donc simple et peu coûteux.

5° La sensibilité de la détection du phénomène de résonance magnétique par les procédés radio-électriques d'induction ou d'absorption est limitée par la faible valeur du facteur $\frac{h\nu}{kT}$ qui régit la dissymétrie naturelle de population des niveaux m . Ceci nécessite l'utilisation de matière sous forte concentration à l'état de solide, de liquide ou de gaz comprimé. En créant par irradiation de la cuve de résonance magnétique une dissymétrie artificielle des niveaux m on peut rendre les gaz ou vapeurs sous faible pression accessibles à ces procédés de détection. Il est intéressant également d'étudier l'action que peut avoir une irradiation sur l'intensité de la résonance magnétique de cristaux contenant des ions paramagnétiques absorbants et fluorescents.

(1) Conférence faite devant la Société française de Physique, le mardi 30 mai 1950.

光ポンピング法

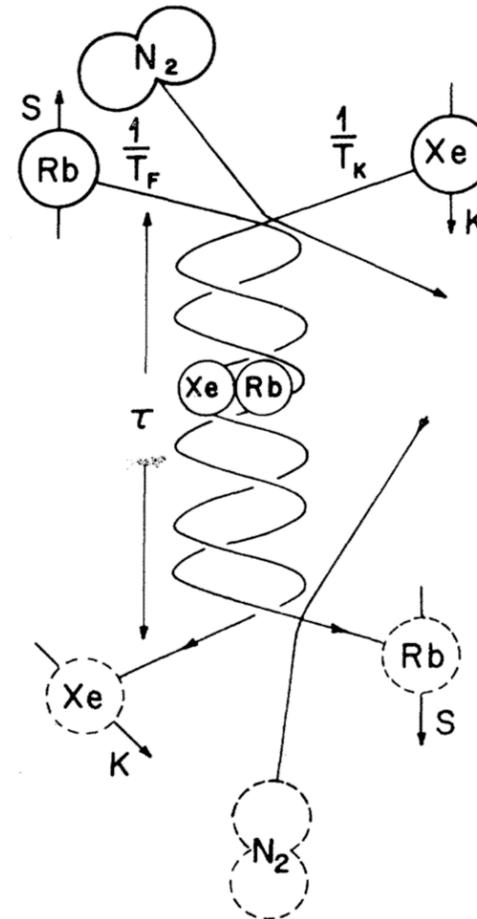
- ❖ 円偏光したレーザー光をRb原子に当てる。
 - ❖ 波長はD₁線 (λ=795 nm)合わせる
- ❖ S_{1/2}, m_s=-1/2電子のみがP_{1/2}, m_J=+1/2に励起される。
- ❖ S_{1/2}のm_J=-1/2, +1/2に落ちるが、m_J=-1/2の電子は再びレーザー光によって励起されるので次第にm_s=+1/2の状態の原子が増えていく。即ち偏極される。



核偏極

Rb原子からXe原子核への角運動量の移行

- * N_2 分子が通過することにより、XeとRb原子がvan der Waals分子を形成
- * SとNとKが結合する。
 - * S: Rb原子の電子スピン
 - * N: Rb+Xe分子の回転角運動量
 - * K: Xe原子の核スピン
- * N_2 分子がXe + Rb分子をかすめるとXeとRb原子はバラバラになる。
- * Sの一部がKに移行する。

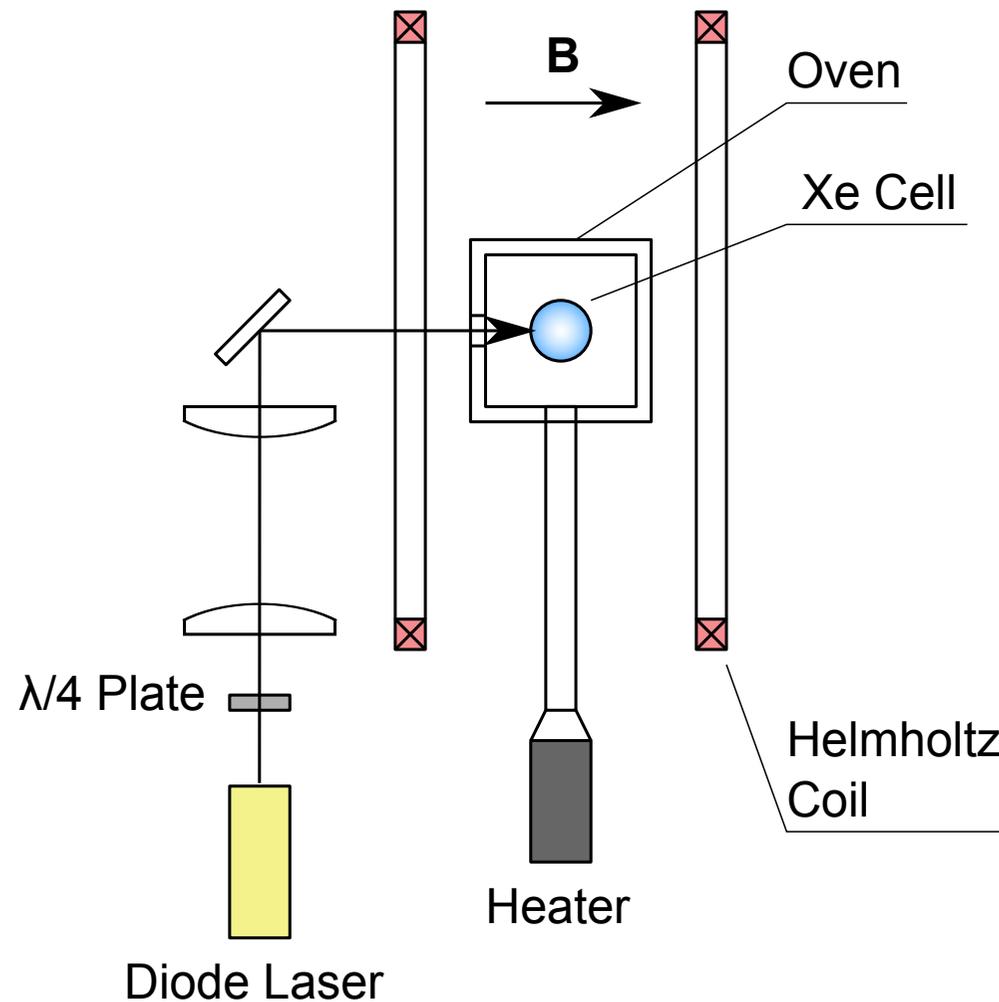


Xe原子の核偏極

Xe原子核偏極度の緩和

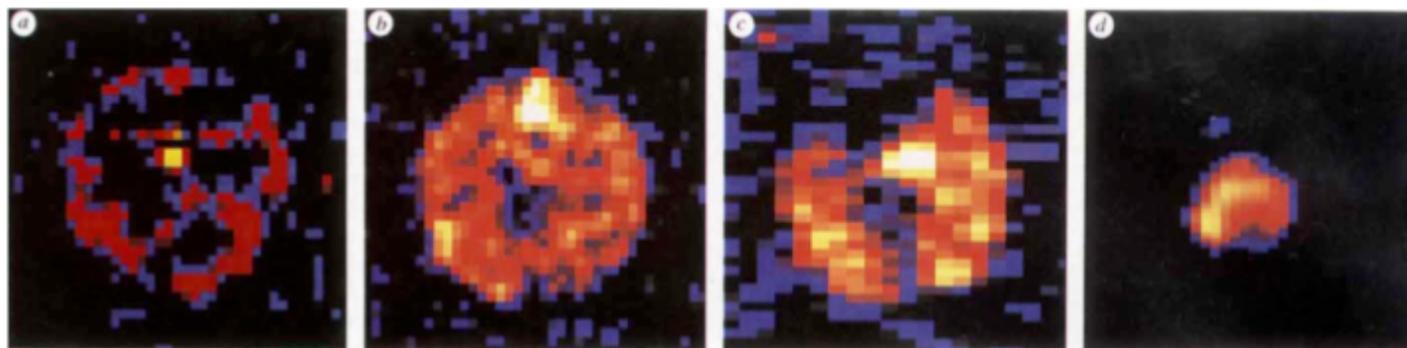
- * 光ポンピングをやめるとXe原子の核偏極度はしだいに小さくなっていく。このことを偏極度の緩和と言う。
- * 原因
 - * N₂原子、Rb原子との衝突
 - * ガラスセルの壁との衝突
 - * 不均一磁場
- * 緩和時間 ~15分程度

光ポンピング装置概略



Xe 核偏極ガスの応用例

肺のMRI



M. S. Albert *et. al*, Nature **370** (1994) 199.