

総合スピ科学の 意義と将来展望

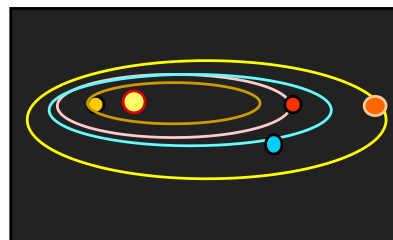
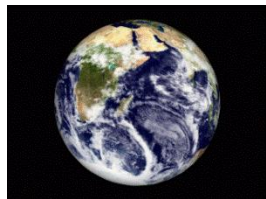
岩田高広

山形大学 理学部 物理学科



はじめに スピンについて

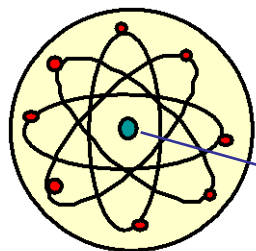
自然は回転によって 安定な姿を保っている



回転の根源を突き詰めると 素粒子の「スピン」にたどり着く

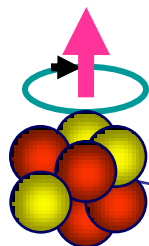


原子核 + 電子



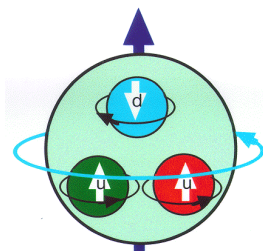
原子

陽子 + 中性子



原子核

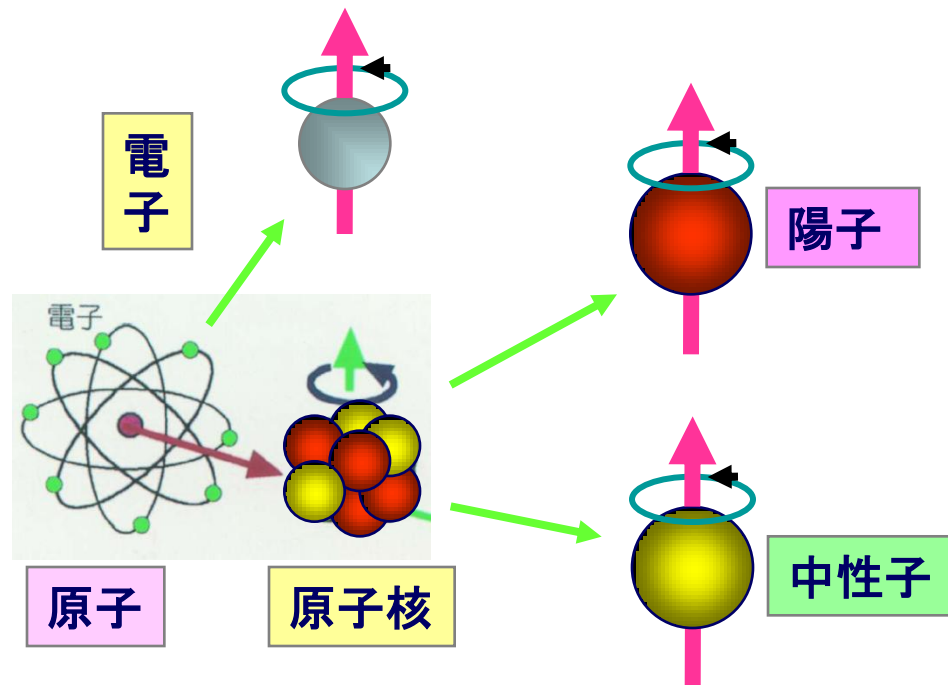
原子、原子核の大きさはスピンにより保たれる
(パウリの排他原理)



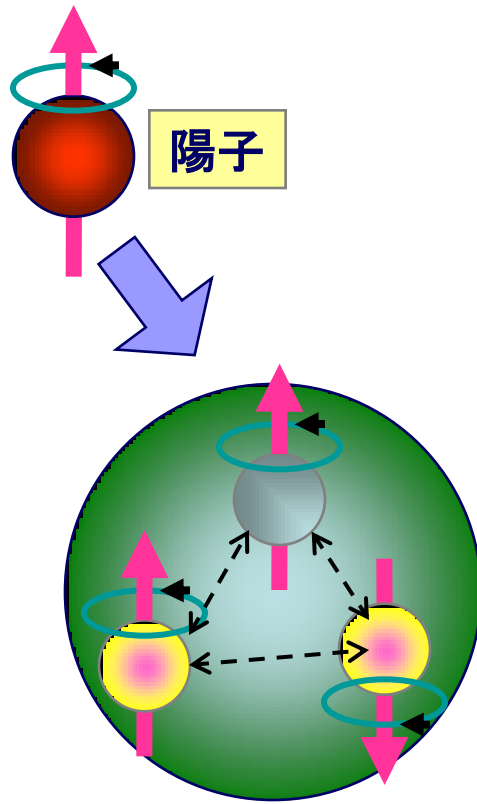
陽子

物質(原子)を構成する素粒子： 電子、陽子、中性子

すべて自転の性質(スピン)を持つ



現代の素粒子理論(標準モデル)



物質を構成する基本粒子

クォーク

レプトン(電子やニュートリノ)

結合に関与する粒子

電磁相互作用: 光子

クォーク間力: グルーオン

弱い相互作用: ウィークボゾン

これらはすべてスピンをもつ

スピンは素粒子の根源的な性質

陽子は3つのクォークで構成

クォークはグルーオンによって結合

陽子スピンの起源の謎

従来の説： クォークスピンの合成

陽子の構成要素： クォーク と グルーオン

クォーク も グルーオンも スピンを持つ

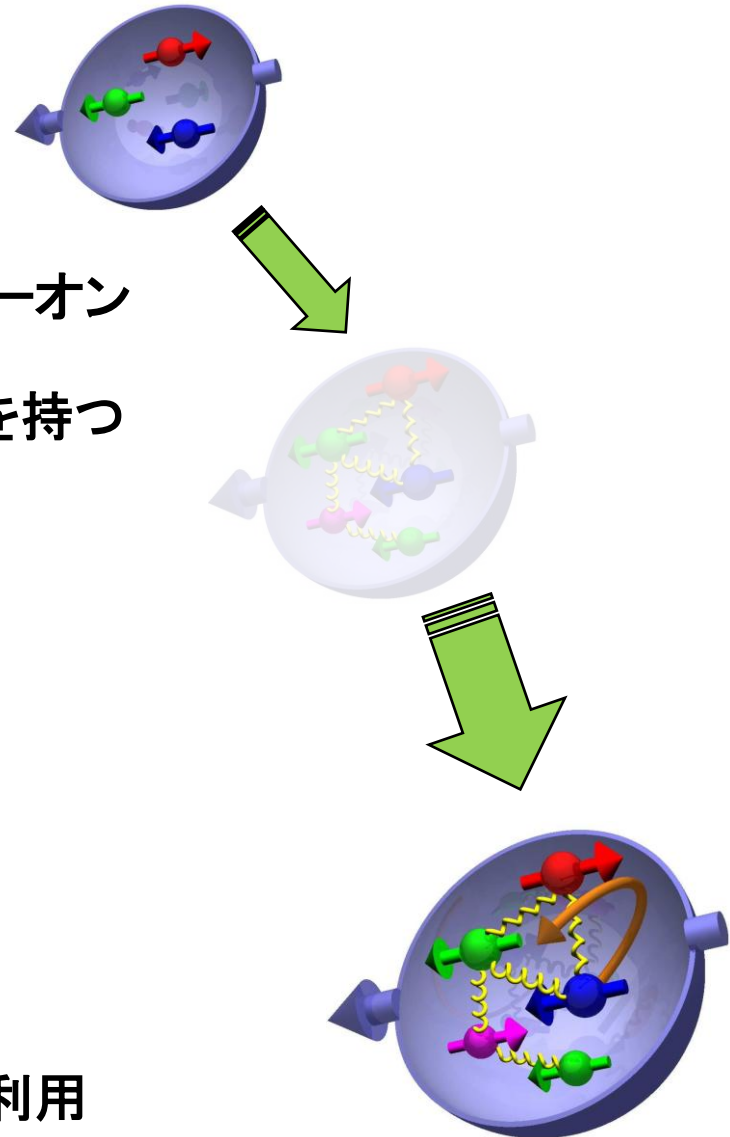
グルーオンスピンの寄与は？

軌道回転の 寄与は？

陽子スピンの起源は、いまだに謎

国際共同実験で探求中

さまざまなスピン技術を実験で利用



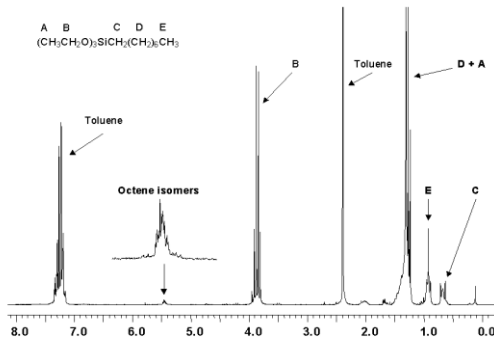
スピンの応用

スピンの応用

陽子スピン → MRI、NMR

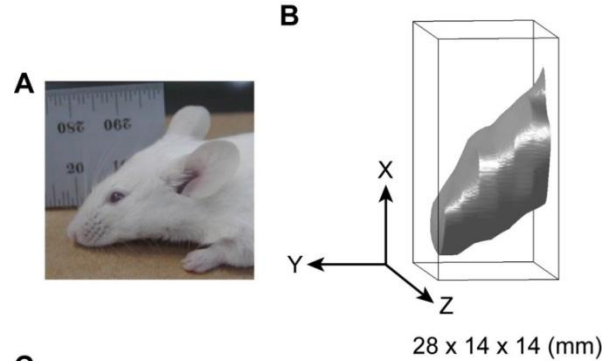
MRIによる脳の
断層撮影イメージ

原子核スピン → NMR

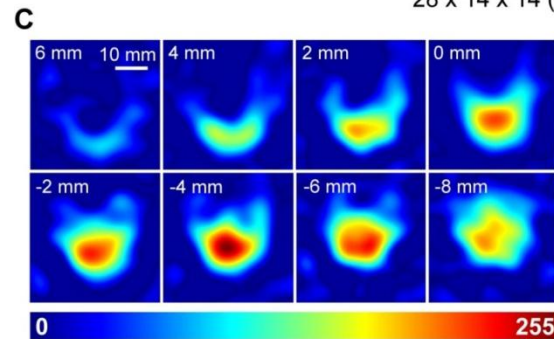


NMR(核磁気共鳴)による微量分
析(原子核スピン)

電子スピン → ESR



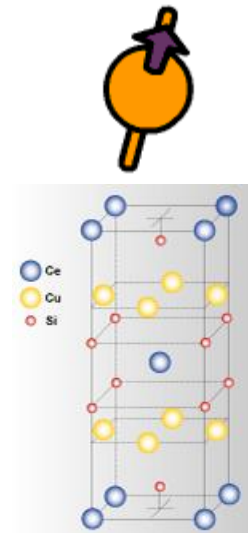
工学部平田拓
先生の研究
(ESRイメージング)



ミューオンスピン → μSR

局所磁場構造の検出

高温超伝導体など
物性研究



総合スピ科学

スピン：異なる学問分野をつなぐキーワード

スピンが関与するよく似た現象は、はさまざまな学問分野で現れる

例：

素粒子原子核物理学： 素粒子散乱のスピン非対称度



電子工学；スピンホール効果

高エネルギー物理学： 高エネルギーでの電子・電子散乱



生物学： コガネ虫の殻での光反射

素粒子散乱のスピンの非対称度

素粒子原子核散乱のスピンの非対称度

$$A = \frac{N_L - N_R}{N_L + N_R}$$

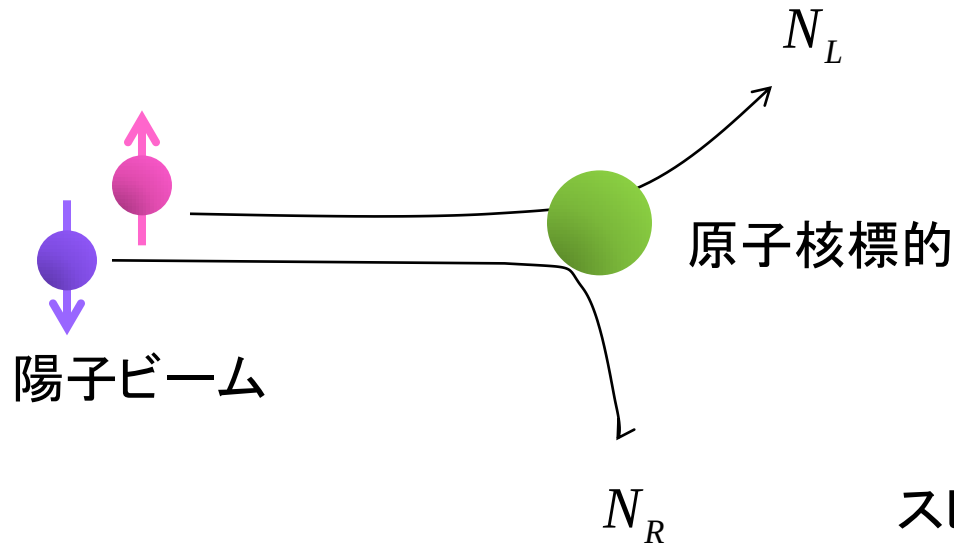
通常のビームでは

$$A = 0$$

スピンのそろったビームでは

$$A \neq 0$$

となることがある

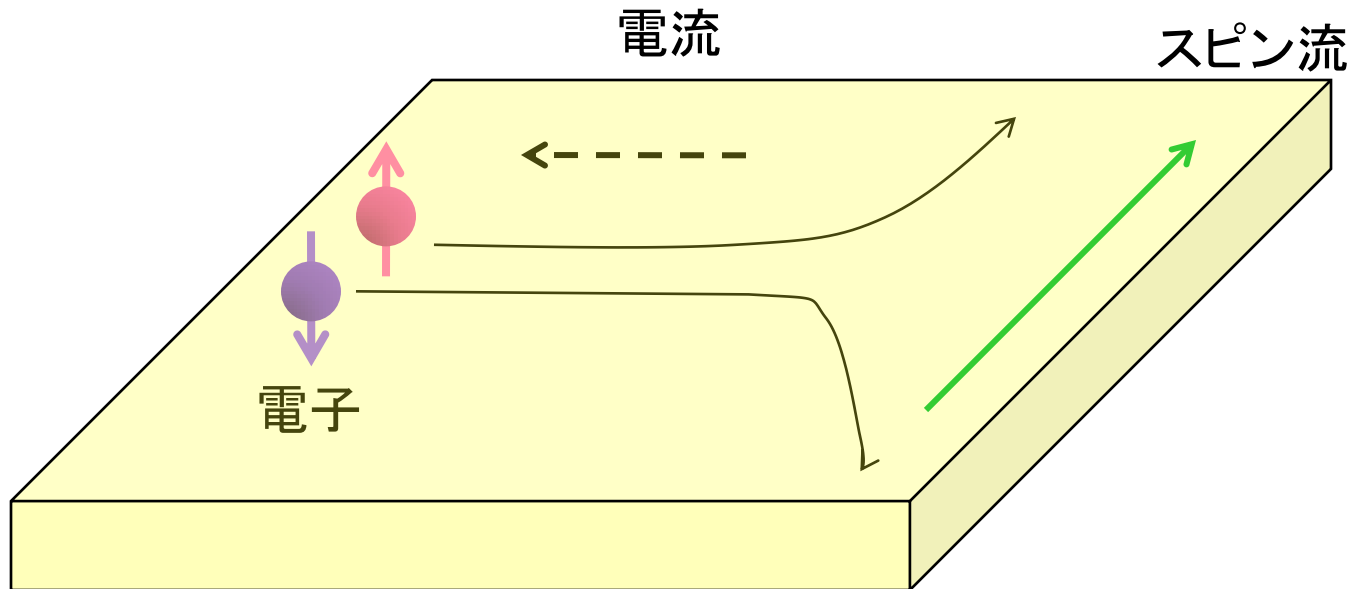


スピン軌道ポテンシャルによる効果

$$V_{LS} \propto \vec{L} \cdot \vec{S}$$

スピンホール効果

スピンに依存したホール電流(スピン流)

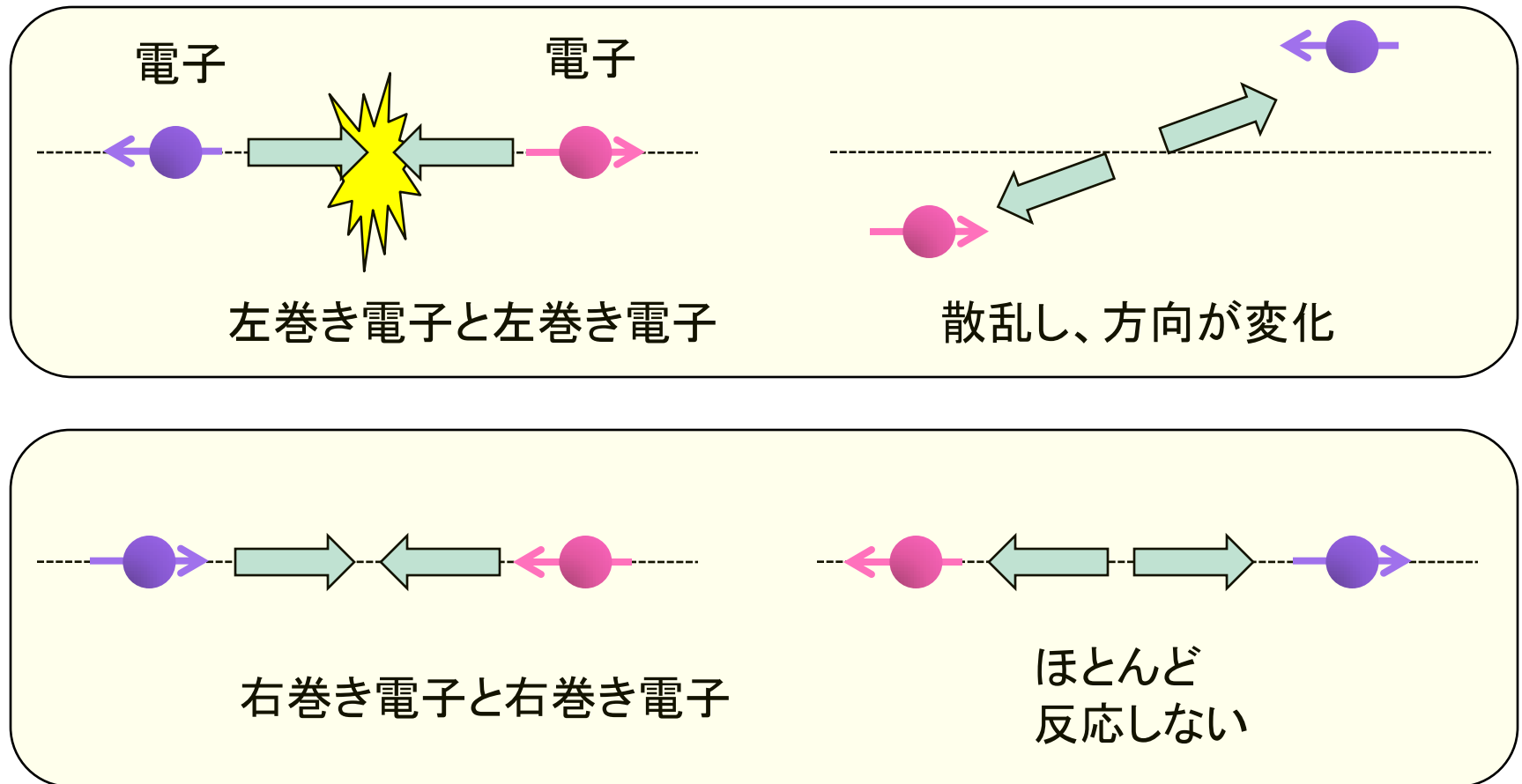


スピン軌道ポテンシャルによる効果

$$V_{LS} \propto \vec{L} \cdot \vec{S}$$

スピントロニクスへの応用

高エネルギーでの電子・電子散乱



高エネルギー($E > 1\text{TeV}$)では、弱い相互作用によって、左巻き粒子のみが反応

特定のスピンの方向を持つ粒子が反応

コガネ虫の殻での光反射



右円偏光板

左円偏光板

<http://www.op.titech.ac.jp/lab/Take-Ishi/html/ki/hg/et/sb/goldbug/old/goldbug.html>

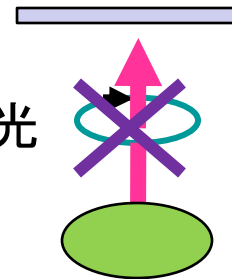
円偏光

(光子スピンの特定方向を向いている状態)

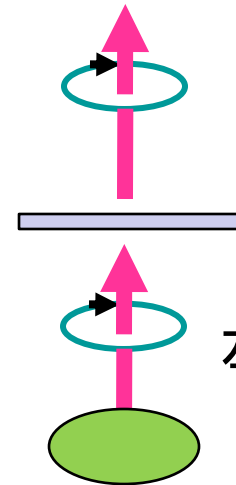
コガネ虫の殻は左円偏光だけを反射

反応が光子のスピン状態に依存

右円偏光



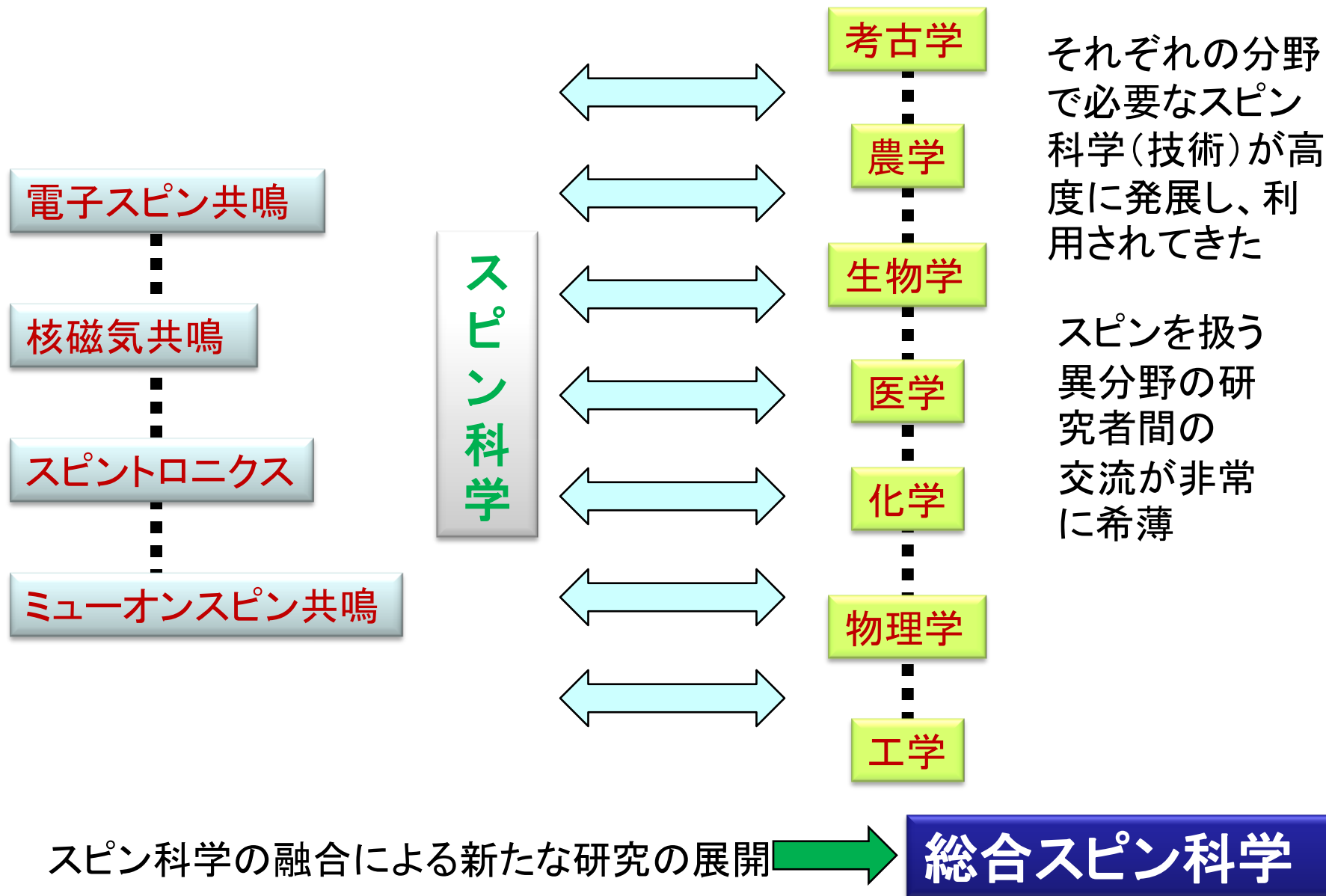
左円偏光



コガネ虫の表面は螺旋状の構造を持つ

生体タンパク質のL/D非対称性との関連 ?

スピン科学の融合



総合スピ科学の将来

- 電子スピン共鳴イメージングの高性能化
- 超偏極MRI
- スピン偏極核融合
- スピントロニクス
- 量子スピン情報
- 核スピン量子コンピューティング
- スピン偏極中性子による構造解析
- 偏光(X線)による宇宙の構造研究
- 素粒子のスピン構造の探究
- 生体タンパク質のカイラリティの問題
-
-

ほとんどが
萌芽的段階

次世代の国家的
重点研究項目か？

学際的
境界領域の創出

宇宙物理学の
新分野の開拓

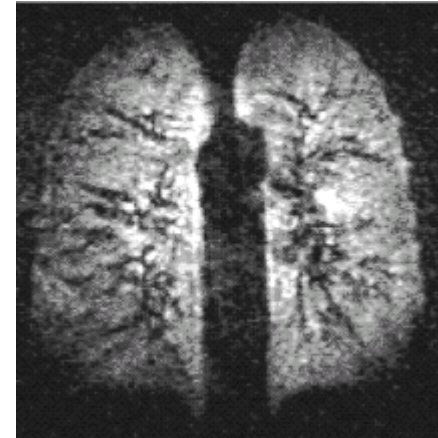
スピンを
武器にした新たな
研究戦略

生命の起源

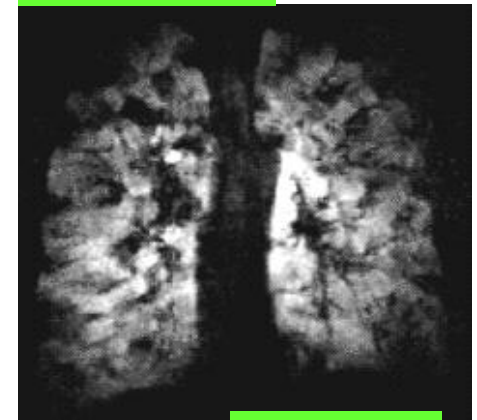
超偏極MRI

超偏極MRIとは

- ・ 従来のMRI
 - ・ 生体内の水素核スピン
 - ・ 室温での微少偏極; $P_{ol.} \approx 10^{-5} \rightarrow$ 微小信号
 - ・ 水分を含む静止した器官のみ撮影可
- ・ 超偏極MRI
- ・ 超偏極(偏極度 $> 10\%$)した偏極核を利用
 - ^3He 、 ^{129}Xe ^{13}C 、 ^{15}N など
 - ・ コントラスト向上、脂質、空洞も撮影可能
 - ・ 大きな信号 $\rightarrow$ 感度の向上
 - ・ $\rightarrow$ 短い時間でのデータ取得
 - ・ $\rightarrow$ 動的イメージングの可能性
 - ・ 肺、心臓、血管のMRI



非喫煙者



喫煙者

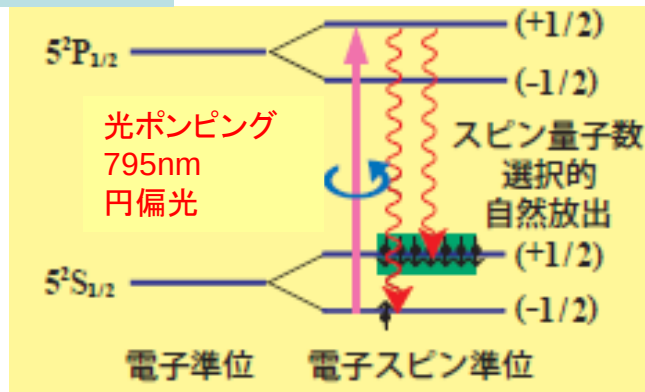
超偏極 ^3He ガスMRIによる
肺のイメージ(マインツ大学
グループ)

超偏極MRIの現状

■ 光ポンピング法による希ガス($^3\text{He}/^{129}\text{Xe}$)の超偏極

・ 超偏極MRIの主流

Rb原子D₁



偏極プロセス

希ガス＋アルカリ原子の蒸気

円偏光 → アルカリ原子 → 電子スピン偏極

電子スピン偏極 → 希ガス原子核の偏極

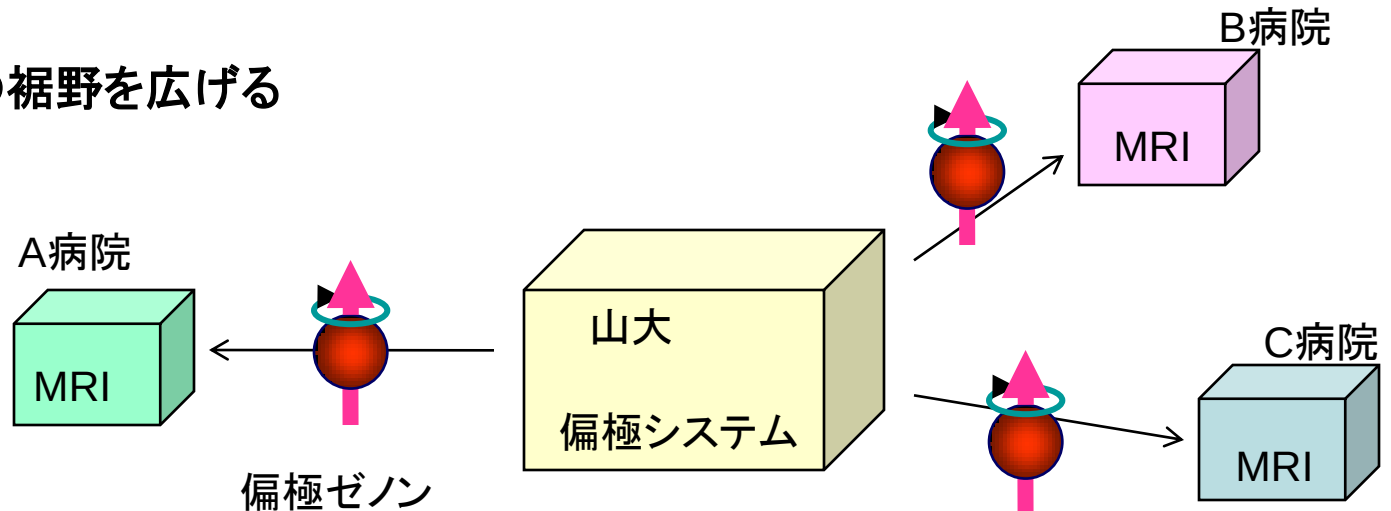
- ・ 比較的簡便に希ガスの超偏極が得られるが、
 - ・ アルカリ蒸気の除去の問題
 - ・ 大量の偏極ガスの生成には不向き
 - ・ その他の核(^{13}C 、 ^{15}N などを含む化合物)の偏極に制限

能動核偏極による超偏極MRI

- ・ 能動核偏極
 - ・ 固体(液体)に対する唯一の現実的な偏極法
 - ・ 能動核偏極による超偏極MRIの試み
 - ・ ^{13}C 、 ^{15}N を含む化合物を固体状で偏極 → 液化・ガス化して生体に注入
 - ・ 世界的にも開発は始まったばかり
 - ・ 固体状で ^{129}Xe を偏極 → ガス化して生体に注入
 - ・ 液体に対して可能か？ 可能ならば
 - ・ 液体状で ^3He を偏極 → ガス化して生体に注入
 - ・ メリット
 - ・ 大量の偏極物質が得られる
 - ・ さまざまな化合物、核種を用いた超偏極MRI
 - ・ 偏極物質のデリバリーの可能性(超偏極ゼノンデリバリー)
- まだ、
行われていない

超偏極ゼノンデリバリー

- 超偏極生成システムは大がかりで特殊(光ポンピング/能動核偏極)
- 凝縮状態(個体)で大量の偏極Xeを生成
 - 融点:161.37K 沸点:166.05K
- 液体窒素温度(個体状)で偏極を保ち、周辺医療機関へデリバリーできないか？
 - ・ 偏極緩和時間？ —> バルクの個体ゼノンの場合 3h @77K
- 超偏極MRIの裾野を広げる

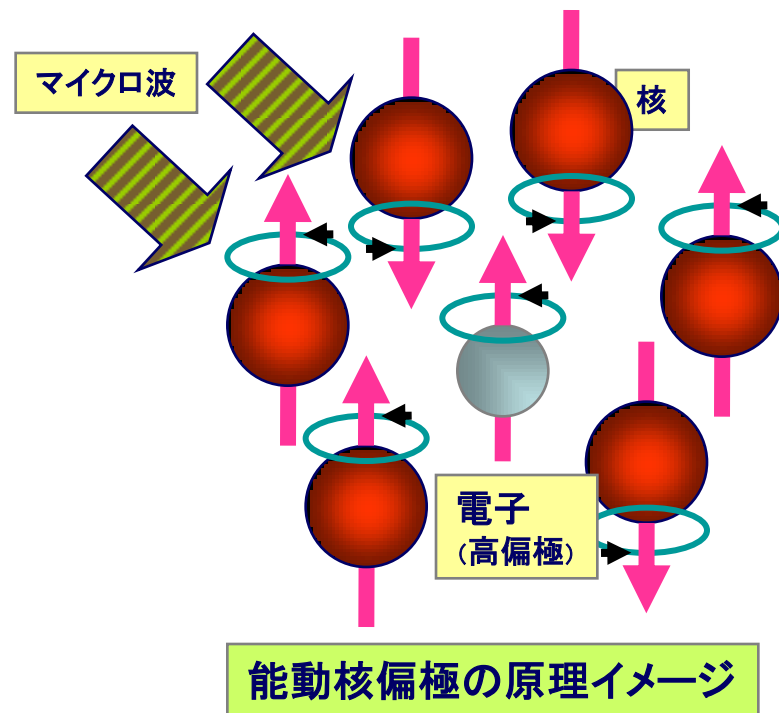


凝縮状希ガスに対する 能動核偏極

凝縮状希ガスに対する能動核偏極

■ 能動核偏極法

- ・ 高磁場、極低温での電子スピンの高偏極
- ・ マイクロ波を利用し、核スピン偏極に移行
- ・ キーポイントは、不対電子の埋め込み
- ・ 通常は、
 - ・ フリーラディカルを溶解
 - ・ 放射線によるカラーセンターの生成
- ・ 希ガスにはどちらも不可能



希ガス ($^3\text{He}/^{129}\text{Xe}$) への不対電子の埋め込み法

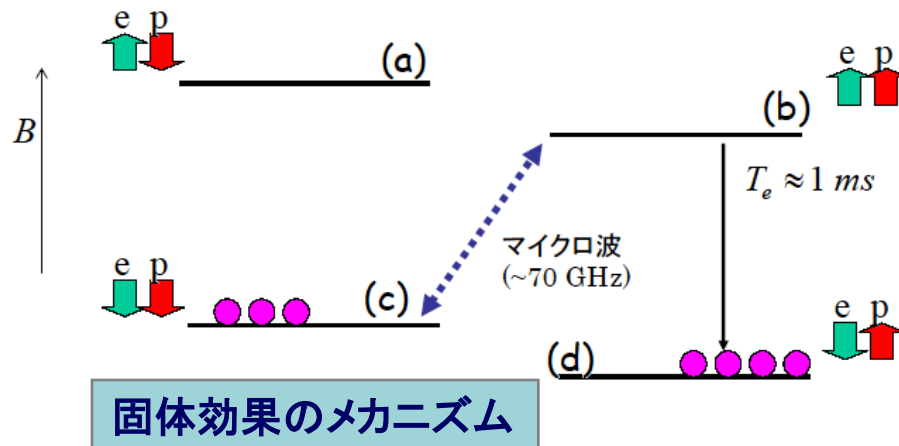
[1] 多孔質材料埋め込み法

[2] マトリックス分離法

[3] 超臨界溶解凝固法

まず、液体 ^3He 偏極を試す

... 液体偏極標的の開発

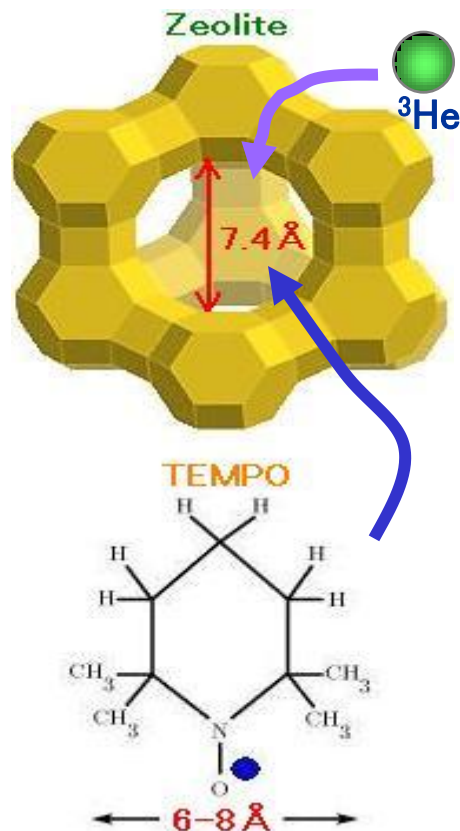


多孔質材料埋め込み法

NaY型ゼオライト

$\text{Na}_{56}\text{Al}_{56}\text{Si}_{139}\text{O}_{384}$

空孔率; 7.8%



フリーラディカル:
TEMPO

Zeolite
500°C、8 時間
加熱(脱水)

TEMPO

8 時間攪拌

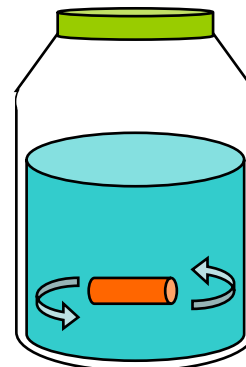
スピン濃度 : 10^{19}spins/cc

約85%の主空洞が空

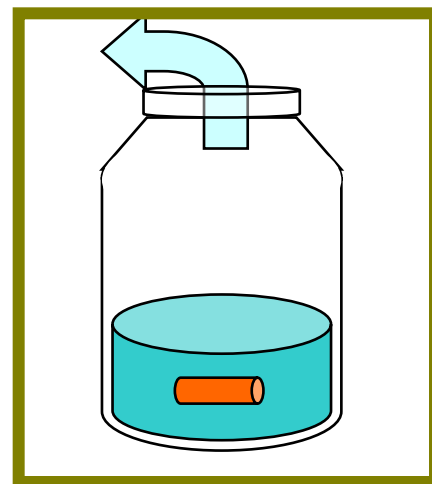
n-pentane

揮発性の液体

沸点 約36°C

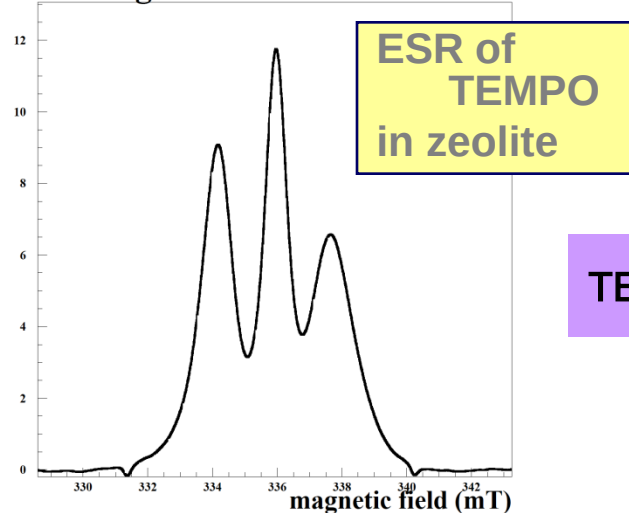


真空中でn-pentaneを
蒸発させる

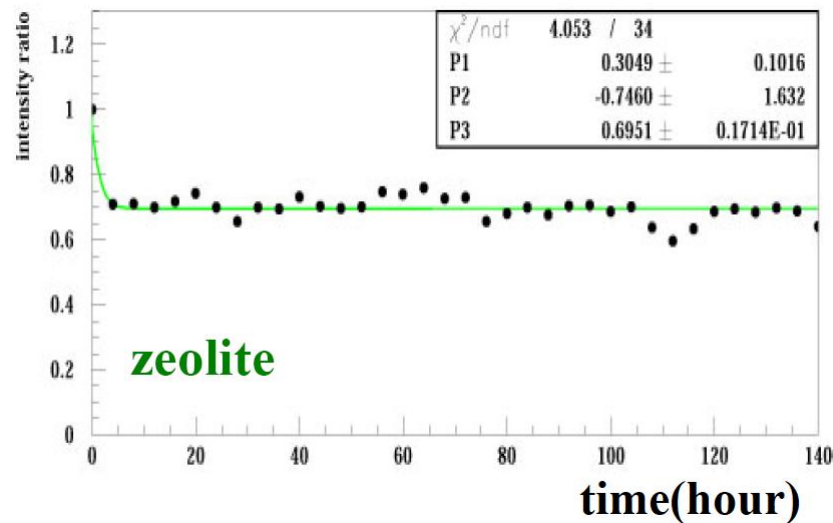


ゼオライト中のTEMPOの状態

ESR signal of TEMPO in zeolite



TEMPOは均一に分散、分離している



ゼオライト中のTEMPOの
ESR強度の時間変化
(室温、大気中)

TEMPOは
時間が経過しても
Zeolite中で、安
定に存在

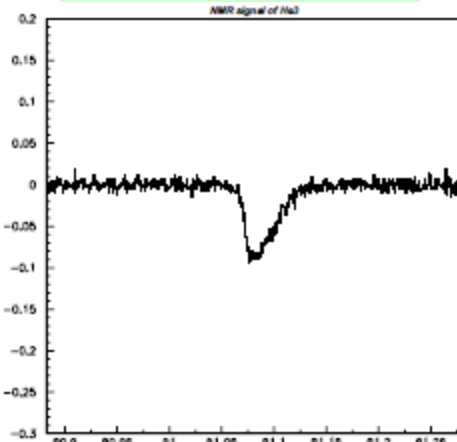
液体 ^3He 能動核偏極

能動核偏極による

液体 ^3He 偏極度の世界記録

熱平衡(0.9K/2.5T):

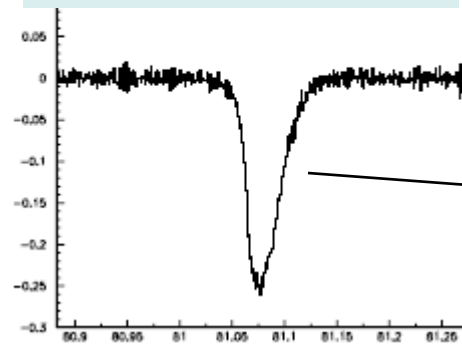
$P = 0.21\%$



CW-NMR spectra

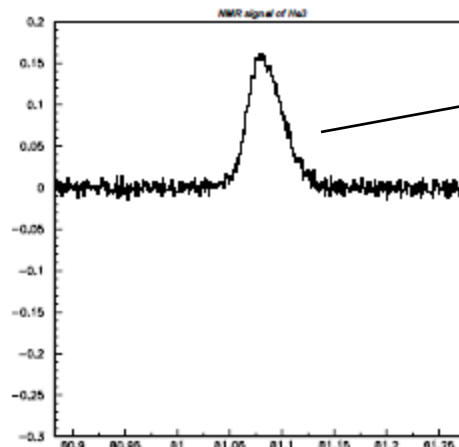
最大正偏極(0.9K/2.5T):

$P = +0.64\%$

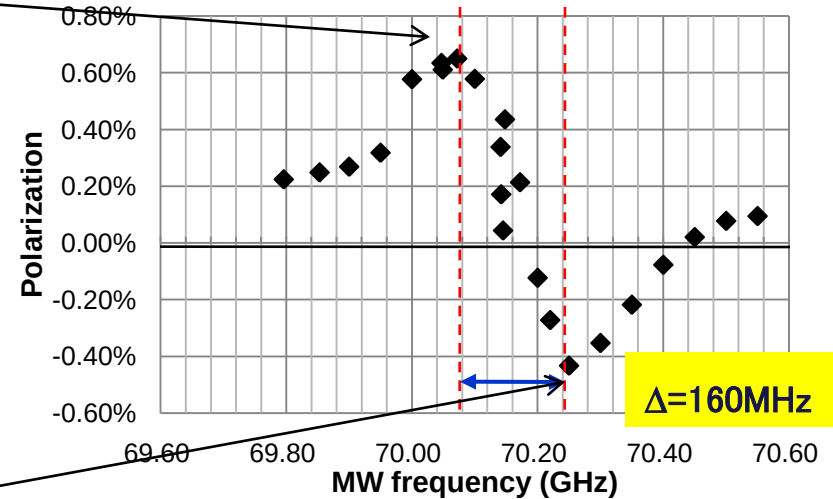


最大負偏極(0.9K/2.5T):

$P = -0.43\%$



MW frequency v.s. polarization



^3He NMR center freq.: $f_c = 81\text{MHz}$

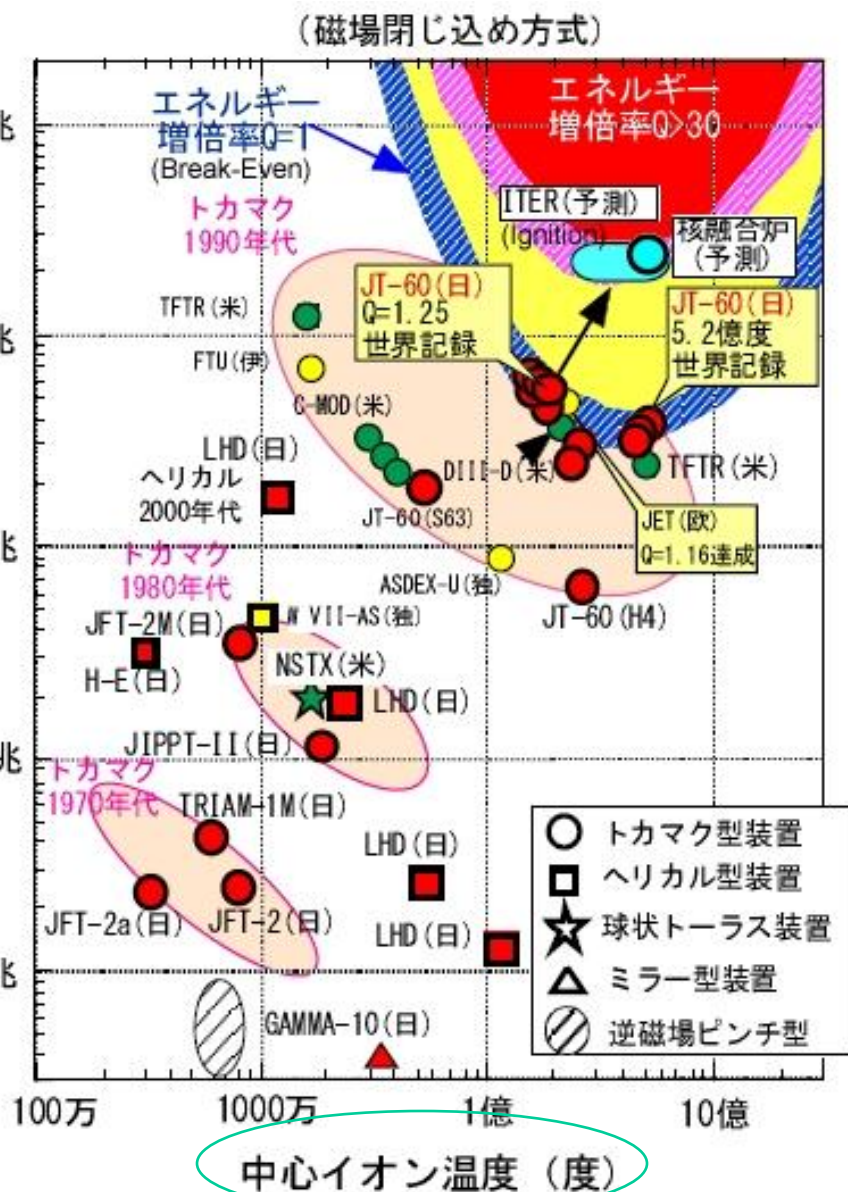
$$\Delta \approx 2 \times f_c$$

ゼオライト中の
液体 ^3He が固体体効果を示した！

スピン偏極核融合

核融合実用化へ道

閉じ込め時間 × 中心イオン密度 (秒・個／立方センチ)



通常の方法

磁場閉じ込め

環状トーラス, タンデムミラー等

慣性閉じ込め

レーザー閉じ込め等

力わざによる量的改善

現状: Ignitionまでファクター: 5-10

ITERで最初の自動点火融合炉の実現を目指す

アドヴァンスド・フュージョン

反応確率の向上による質的改善

ミューオン触媒法

偏極融合法

(室温核融合)

偏極核融合のアイデア

NEWS

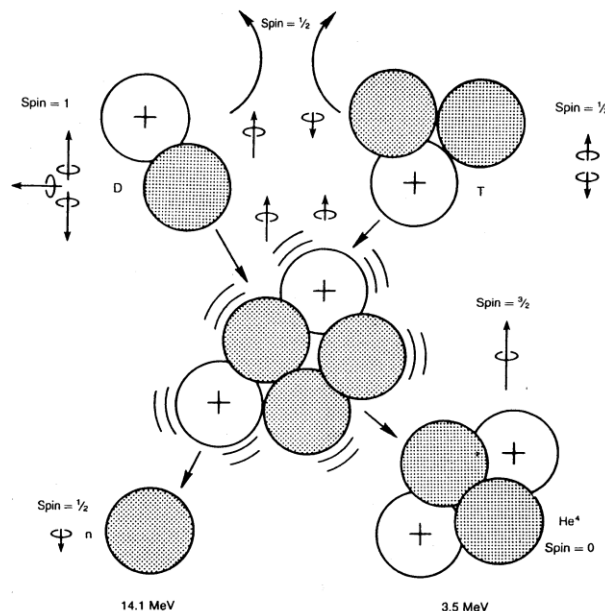
search & discovery

Polarized plasmas may prove useful for fusion reactors

A casual cocktail-party inquiry by Maurice Goldhaber (Brookhaven) has set in motion the detailed examination of a quite novel approach to fusion in magnetic-confinement reactors. Last winter Goldhaber asked Harold Furth, director of the Princeton Plasma Physics Laboratory, whether he had ever considered polarizing the nuclear spins in a magnetically confined reactor plasma. The answer was *no*, basically because naive considerations lead one to expect that such a polarized hot plasma would much too quickly become thermally depolarized.

But the depolarization mechanisms in a reactor environment had never been examined in detail; and if one could keep a fusion plasma highly polarized long enough, several very desirable consequences could be exploited. Therefore Goldhaber and Furth, together with Russell Kulsrud and Ernest Valeo of Princeton, set out to calculate the depolarization rates that would result from various polarization schemes. In a recent Princeton Plasma Physics Laboratory Report,¹ discussed at the International Conference on Plasma Physics (Göteborg, Sweden, 9-15 June), Kulsrud and his coworkers reach the surprising conclusion that a polarized D-T, D-D or D-He³ plasma would maintain its polarization against collisions at better than 95% for about 100 seconds in a magnetic fusion reactor—five times the life expectancy of a plasma nucleus in a tokamak.

The benefits to be expected from the polarization of a D-T, D-D or D-He³ plasma—enhancement of desired fusion cross sections, suppression of unwanted reactions, and control of the direction of emergence of fusion products—would of course come to nothing if one were unable to supply the reactor with adequate inputs (amperes) of polarized nuclei at acceptable power cost. Happily, two recently developed techniques for producing polarized nuclei in profusion show promise in this regard. A group led by Will Happer (Princeton) has been investigating² the polarization of xenon nuclei by spin exchange



Deuterium-tritium fusion at reactor energies proceeds primarily through an intermediate spin- $\frac{1}{2}$ resonance of He³, 107 keV above the sum of the D and T masses. A deuteron-triton collision in a spin- $\frac{1}{2}$ state will contribute almost nothing to the fusion cross section. Thus if one could align all D and T spins parallel to the reactor's magnetic field, the fusion cross section would be enhanced by 50%. The emerging energetic alpha and neutron come off with an $\ell = 2$, $\sin^2\theta$ angular distribution that would be particularly useful in mirror machines. Open (shaded) circles are protons (neutrons). Each spin-S state has $2S + 1$ possible orientations.

with optically pumped rubidium. Richard Cline, Thomas Greytak and Daniel Kleppner at MIT have recently reported³ that their high-magnetic-field, cryogenic technique for stabilizing spin-polarized atomic hydrogen (PHYSICS TODAY, June 1980, page 18) can yield protons with 99% polarization. Both groups expect that their methods can be applied straightforwardly to produce amperes of highly polarized deuterons. The optical pumping technique, Happer told us, should also be directly applicable to He³, which, like

xenon, is a noble gas.

In most fusion reactions of light nuclei, some spin states contribute much more strongly to the cross section than others. For example, the most commonly considered reaction for fusion reactors, D + T → He⁴ + n, goes almost entirely through the spin- $\frac{1}{2}$ state. Because the deuteron and triton have spin 1 and $\frac{1}{2}$, respectively, and orbital angular momentum can be neglected at reactor energies, this implies that these two heavy hydrogen nuclei will fuse most frequently when their spins are aligned

R. M. Kulsrud, H. P. Furth,
E. J. Valeo and M. Goldhaber

Physics Today (August, 1982)

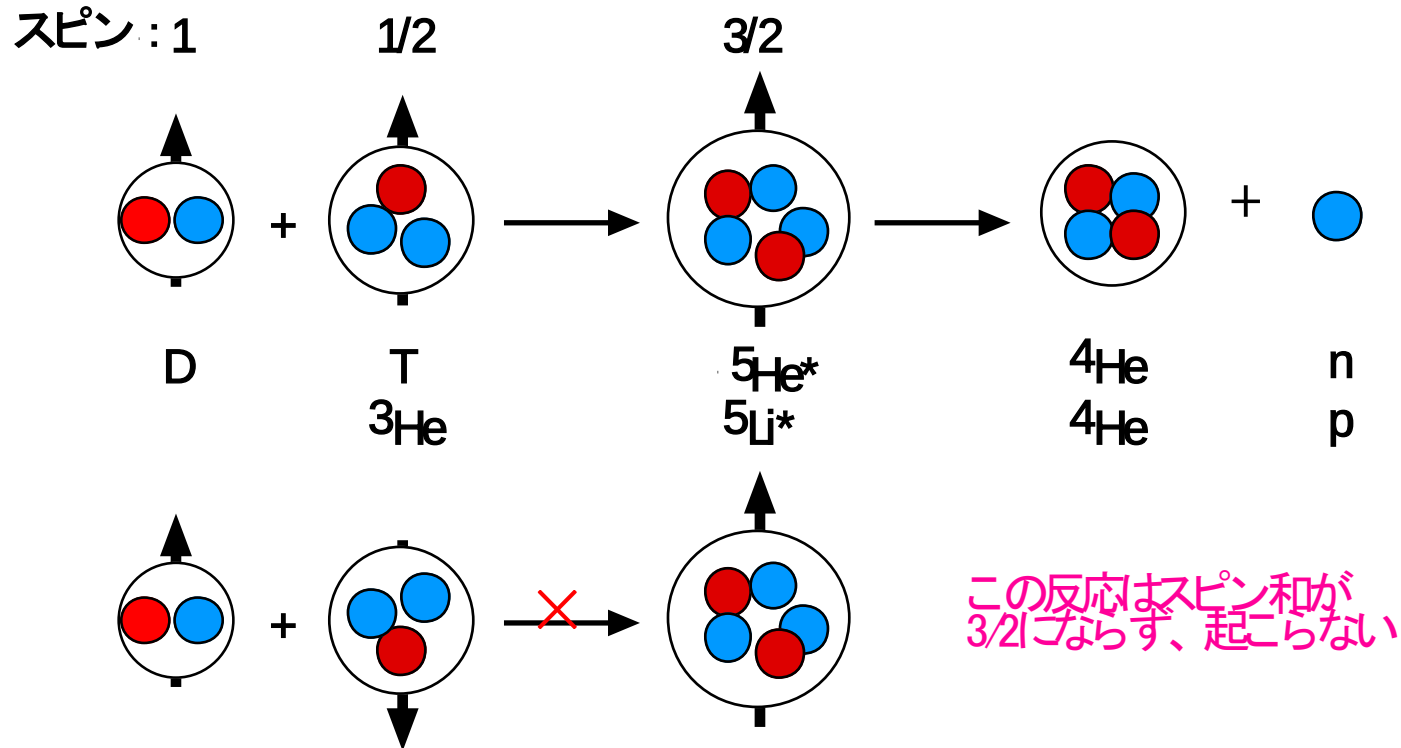
The benefits to be expected from the polarization of a D-T, D-D or D-He³ plasma—enhancement of desired fusion cross sections, suppression of unwanted reactions, and control of the direction of emergence of fusion products—would of course come to nothing if one were unable to supply the reactor with adequate inputs (amperes) of polarized nuclei at acceptable power cost. Happily, two recently developed techniques for producing polarized nuclei in profusion show promise in this regard.

原子核のスピンをそろえると
核融合確率が増加 !

核融合確率が増える理由

D-T (D- ^3He)の核反応の場合： $\sigma^{\uparrow\uparrow} = 1.5 \cdot \sigma_0$ (無偏極断面積)

中間状態(励起状態)

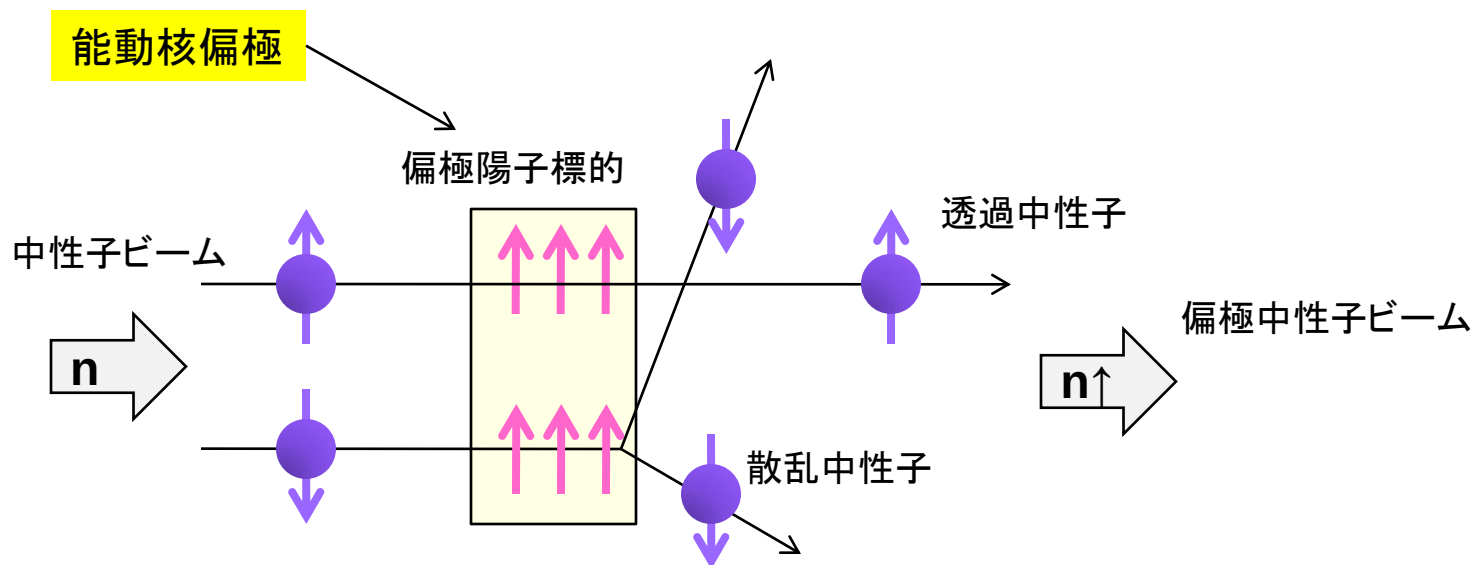


理論では核力による5体問題 → 理論計算は進んでいるが、、
実験的検証が必要

偏極中性子ビームに よる構造解析

偏極中性子ビーム

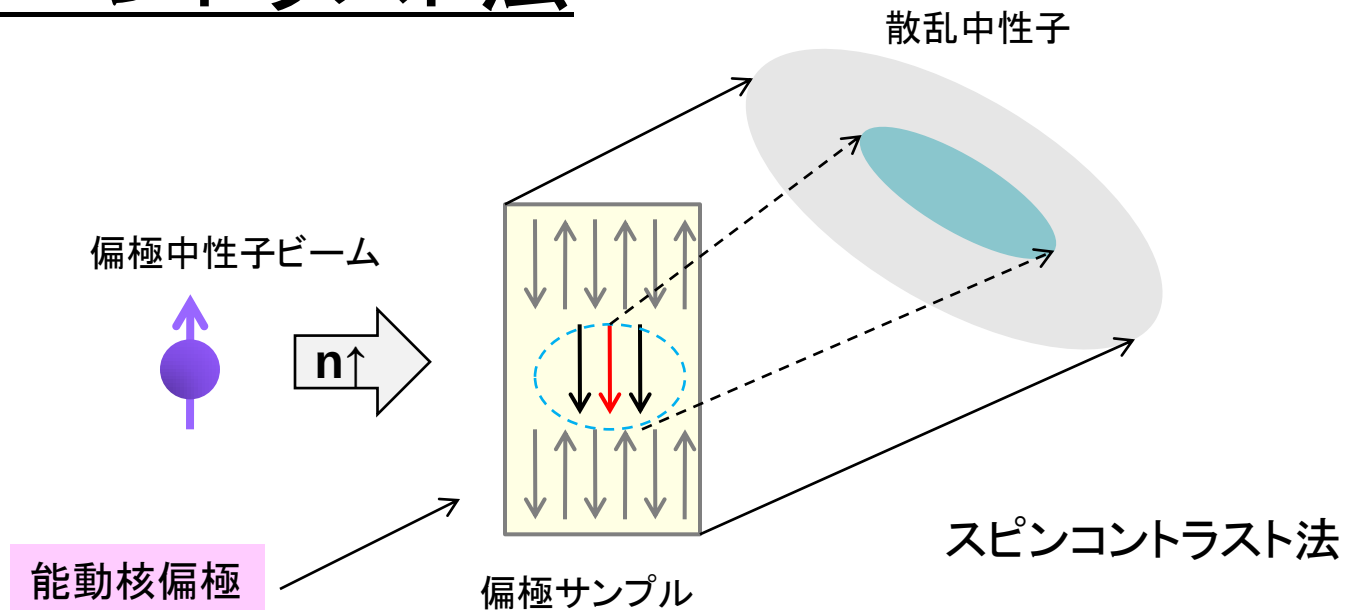
中性子ビームを偏極陽子標的を通過させると、偏極中性子ビームが得られる(中性子偏極フィルター)



$$\sigma(\downarrow\uparrow)/\sigma(\uparrow\uparrow) \approx 10$$

中性子エネルギー: 1meV~1MeV

スピンコントラスト法



偏極した部分 → コントラストの向上

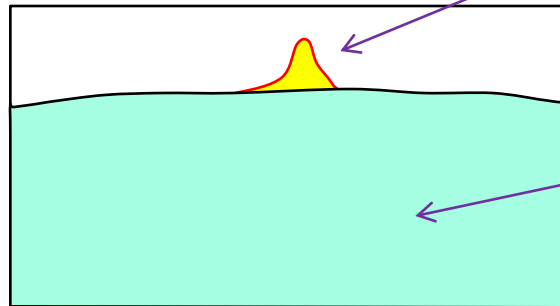
観測したい部分のみを偏極

さらに、基を選択し、偏極できないか？

-OHのHは偏極させるが、-CH₃はさせないなど

偏極試料でのS/Nの向上

生体高分子などの中性子回折



干渉性散乱(シグナル)
構造の情報を含む

非干渉性散乱
(バックグラウンド)

主にH原子による

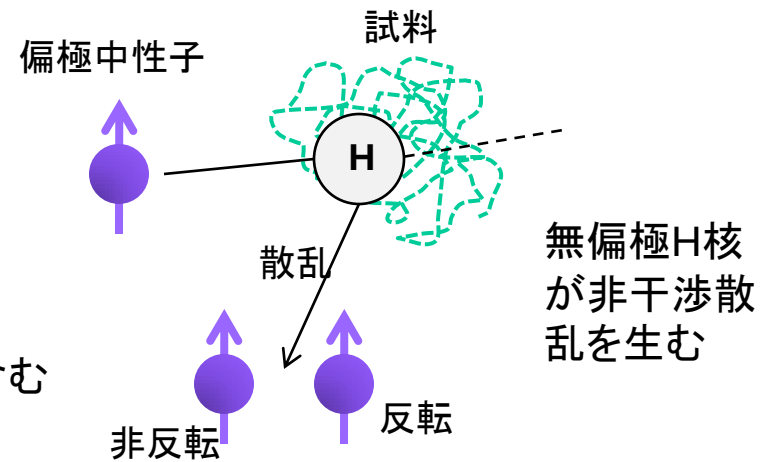
通常、HをDに置換してBGを抑制

—> 置換の不完全さ、位置依存性

D置換しなくても、
H核のスピンをそろえると

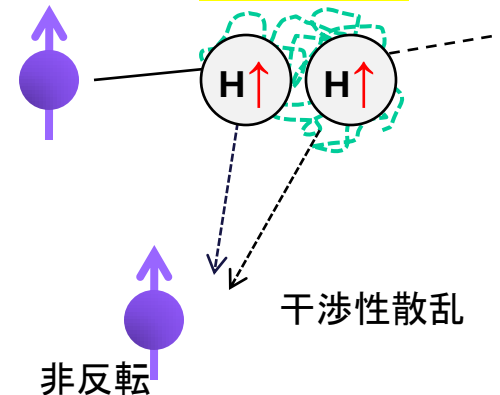
干渉性散乱をエンハンス
& 非干渉性散乱のサプレス

S/Nの向上に寄与



能動核偏極

H核偏極



総合スピ^oン科学研究所

総合スピ科学研究所

山形大学バーチャル研究所として2007年11月からスタート

目的

スピを扱う研究者の異分野交流

スピをキーワードとしたユニークな研究の芽

学内ネットワークの構築

共同研究の推進

学際研究(文理融合?)

新たな境界領域への挑戦

組織

理学部

岩田高広（核子スピン構造）
郡司修一（宇宙からの偏光X線観測）
亀田恭男（スピン偏極中性子散乱）
伊藤廣記（有機合成化学）
栗山恭直（有機合成化学）

理工学研究科(工学系)

平田 拓（電子スピン共鳴イメージング）
尾形健明（核磁気共鳴）
高橋 豊（スピントロニクス）
稲葉信幸（磁性デバイス）

学術情報基盤センター

吉田浩司（高エネルギー物理学）

医学部、農学部などからの参加も期待

将来ビジョン(検討中)

バーチャル研究所 → 総合スピ科学研究センター(概算要求)

1統括部門(専任1～2名)、5研究部門(兼担)

* 電子スピン研究部門

- ESR応用、スピントロニクス

* 核スピン研究部門

- MRI、NMR応用

* 中性子スピン研究部門

- 偏極中性子散乱

* 高エネルギースピン研究部門

- 核子スピン構造、偏極核融合研究?

* 光子スピン研究部門

- 偏光X線観測

さらに

外部資金の

組織的な獲得を目指す

まとめ

- スピンは素粒子の根源的で重要な性質
- 核子スピンの起源の謎の解明の重要性
- スピン技術の応用は広がっている
- スピンに関する現象は分野が違っても似ている
- 異なる分野で様々なスピン技術が利用されている
- 技術の融合により研究の新たな展開が期待
- 総合スピン科学の意義
- 萌芽的な研究開発状況
- 総合スピン科学研究所への期待