

物質科学概論 (2013/10/21)
“はたらく素粒子原子”

教養学部統合自然科学科／広域科学専攻 相関基礎科学系

松田恭幸 (matsuday@phys.c.u-tokyo.ac.jp)

自己紹介

- ▶ 松田恭幸(まつだやすゆき): 准教授: 北海道出身
- ▶ 2008.4 から駒場に勤めています
 - ▶ 京大院→理化学研究所(98.4~08.3)→東大教養学部
- ▶ 教養学部統合自然科学科 所属
- ▶ 総合文化研究科 相関基礎科学系 所属
- ▶ 物理をやっている実験系の研究者です
 - ▶ 自然界の基本的な法則とその対称性に興味があります
 - ▶ ホームページ: <http://radphys4.c.u-tokyo.ac.jp/~matsuday>
 - ▶ 居室は16号館222A号室です
- ▶ おしゃべり好きです
 - ▶ 物理の話も好きですが、基本的に何でも雑談が大好きです
 - ▶ ぜひ居室に遊びにきてください



私たちの研究室

「加速器で作られる様々な粒子とその束縛系を使って、
自然界の謎に挑む」

▶ メンバー

- ▶ 松田(AP)、鳥居(A)、黒田(A)
- ▶ 大塚(D2)、田中(D2)
- ▶ 高木(M2)、田島(M2)、長濱(M2)、水谷(M2)
- ▶ 石川(M1)、樋口(M1)

- ▶ 週1の輪読＋週1の論文紹介
- ▶ 各自の研究



私たちの研究室

「加速器で作られる様々な粒子とその束縛系を使って、
自然界の謎に挑む」

- ▶ 一緒に研究している仲間たち
 - ▶ 理化学研究所 山崎原子物理研究室
 - ▶ 広島大学理学部 ビーム物理研究室
 - ▶ 東京理科大学理学部 長嶋研究室
 - ▶ 東京大学理学部 早野研究室
 - ▶ その他 いろいろ
- ▶ 研究している場所
 - ▶ CERN (スイスジュネーブ郊外)
 - ▶ 反水素の合成と、その分光による CPT 対称性の破れの研究
 - ▶ J-PARC (茨城県東海村)
 - ▶ ミュオニウムの分光による標準理論の検証



私たちの研究室

「加速器で作られる様々な粒子とその束縛系を使って、
自然界の謎に挑む」

- ▶ 私は物質基礎科学コースに所属していますが、私の研究室の分野はいわゆる「物性物理」や「化学」ではありません。むしろ「素粒子実験」に近い研究室です。
 - ▶ 「素粒子実験」というと CERN LHC 実験のような大規模（数百人 × 十数年）のものが代表的ですが、私たちは比較的比較的小規模（数人 × 数年）の実験を志向しています。
 - ▶ 実験に用いるテクニックには様々な分野と共通性があります（原子トラップ、RF、プラズマ、レーザー...）
 - ▶ 「何か」に尖がって、楽しく研究をしたいと思っています。
-



はたらく素粒子原子

今日のタイトルは、今年のも物質科学概論のテーマが“物質のはたらく姿”だったので、シャレで付けてみました。

- ▶ 物性物理や化学の分野では、「役に立つ」新素材、新規物質の開発というのが強力なモチベーションになります。その中で物質(とそれを作る原子、電子、イオン)がどのように「はたらく」か、というのはまさにメインテーマです。
 - ▶ 素粒子物理の分野では、基本的に物質を作る根源的な粒子(クォーク&レプトン)の振る舞いが問題になります。原子や電子、イオンは素粒子と比べて大きすぎるのですが、これらの振る舞いを調べるときも、原子が役に立つことがあります。今日はこうした原子の「はたらき」を紹介
 - ▶ します。
-

自己紹介

- ▶ 松田恭幸(まつだやすゆき): 准教授: 北海道出身
- ▶ 2008.4 から駒場に勤めています
 - ▶ 京大院→理化学研究所(98.4~08.3)→東大教養学部
- ▶ 教養学部統合自然科学科 所属
- ▶ 総合文化研究科 相関基礎科学系 所属
- ▶ 物理をやっている実験系の研究者です
 - ▶ 自然界の基本的な法則とその対称性に 관심이あります
 - ▶ ホームページ: <http://radphys4.c.u-tokyo.ac.jp/~matsuday>
 - ▶ 居室は16号館222A号室です
- ▶ おしゃべり好きです
 - ▶ 物理の話も好きですが、基本的に何でも雑談が大好きです
 - ▶ ぜひ居室に遊びにきてください



対称性のお話

- ▶ 最初の自己紹介で「自然の基本的な法則とその対称性に
関心があります」とお話ししました
- ▶ 対称性とはなんでしょう？
 - ▶ ある二つの状態が、ある観点から同じであると考えられるとき、
その二つの状態を結ぶ変換に対して対称性があると言います



対称性の例

- ▶ 雪の結晶の形は 60度回転させても対称



対称性の例

- ▶ 下のタイルの模様は周期的な平行移動に対して対称



対称性の例

- ▶ 下のタイルの模様は周期的な平行移動に対して対称



対称性の例

- ▶ 下のタイルの模様は 60度の回転に対しても対称



対称性の例

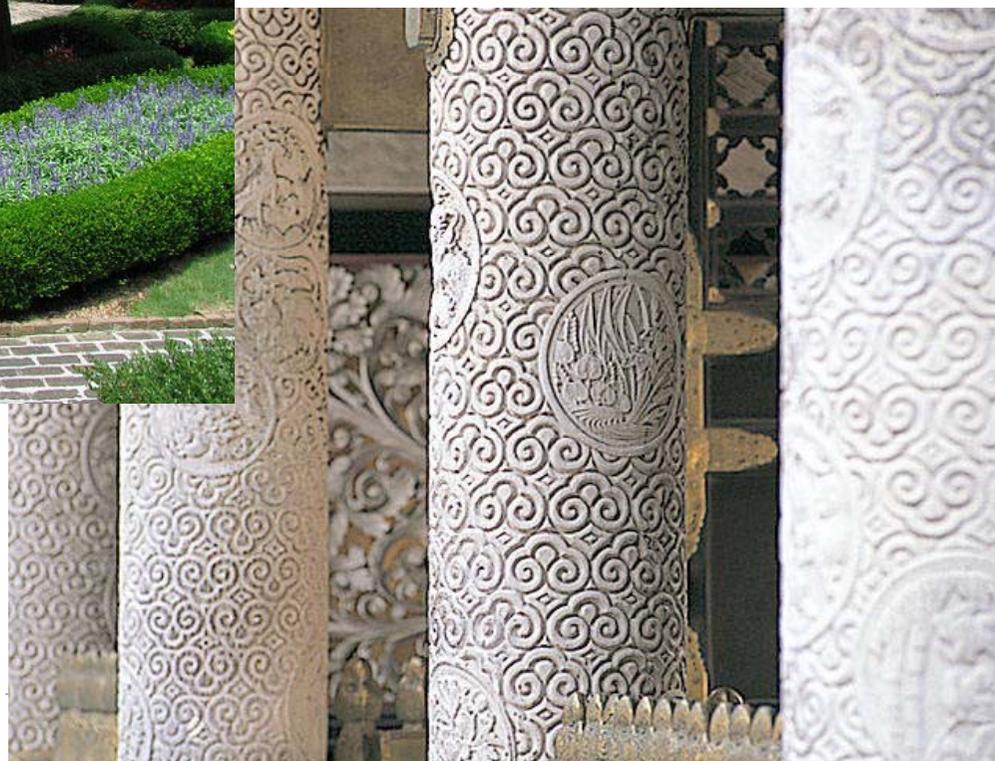
- ▶ 下のタイルの模様は 60度の回転に対しても対称



余談：対称性と美



Fort Raleigh National Historic Site
(North Carolina, USA)



日光東照宮 陽明門

基礎物理における対称性の例

▶ 電磁気学

- ▶ 電場と磁場の対称性
- ▶ 磁気単極子が存在しない＝対称性の破れ
 - ▶ なぜ磁気単極子が存在しないのかは今も謎。解明したらノーベル賞
 - ▶ 「対称性とその破れ」は面白い物理のテーマの宝庫

Maxwell 方程式

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{1}{\epsilon_0} \rho_e$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J}_e + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$$

磁気単極子があったら...こうだった？

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{1}{\epsilon_0} \rho_e$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = \mu_0 \rho_m$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\mu_0 \mathbf{J}_m - \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J}_e + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$$



パリティ対称性

- ▶ パリティ(P)変換は座標を全て反転させることです

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \xrightarrow{P} \begin{pmatrix} -x \\ -y \\ -z \end{pmatrix}$$

- ▶ ニュートンの運動方程式

$$\mathbf{F} = m \frac{d^2 \mathbf{r}}{dt^2} \xrightarrow{P} -\mathbf{F} = m \frac{d^2(-\mathbf{r})}{dt^2}$$

パリティ変換しても成り立っている

力学の基本方程式はパリティ変換に対して対称です



パリティ対称性

▶ 万有引力の法則

$$\mathbf{F} = -\frac{GMm}{r^2} \frac{\mathbf{r}}{r} \xrightarrow{P} -\mathbf{F} = -\frac{GMm}{r^2} \frac{-\mathbf{r}}{r}$$

パリティ変換しても成り立っている

(古典的な)重力の理論はパリティ変換に対して対称です

▶ クーロンの法則

$$\mathbf{F} = k \frac{Q_1 Q_2}{r^2} \frac{\mathbf{r}}{r} \xrightarrow{P} -\mathbf{F} = k \frac{Q_1 Q_2}{r^2} \frac{-\mathbf{r}}{r}$$

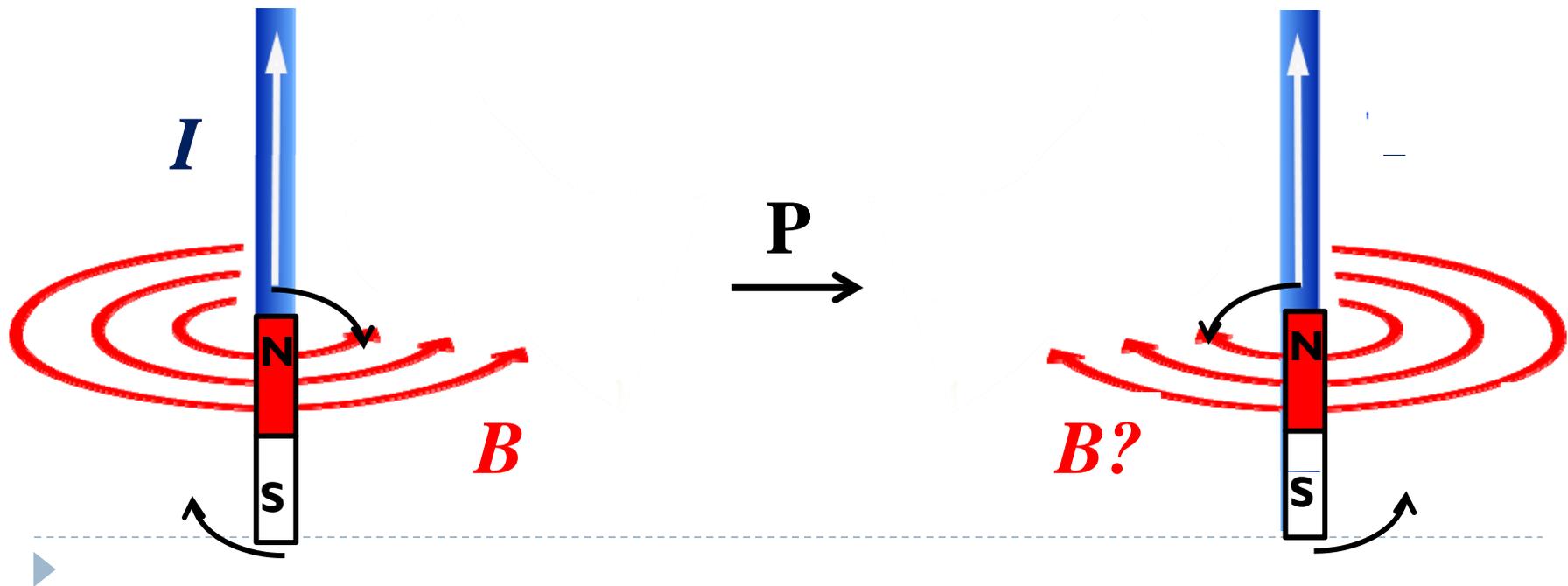
パリティ変換しても成り立っています



パリティ対称性

▶ 「アンペールの右ねじの法則」

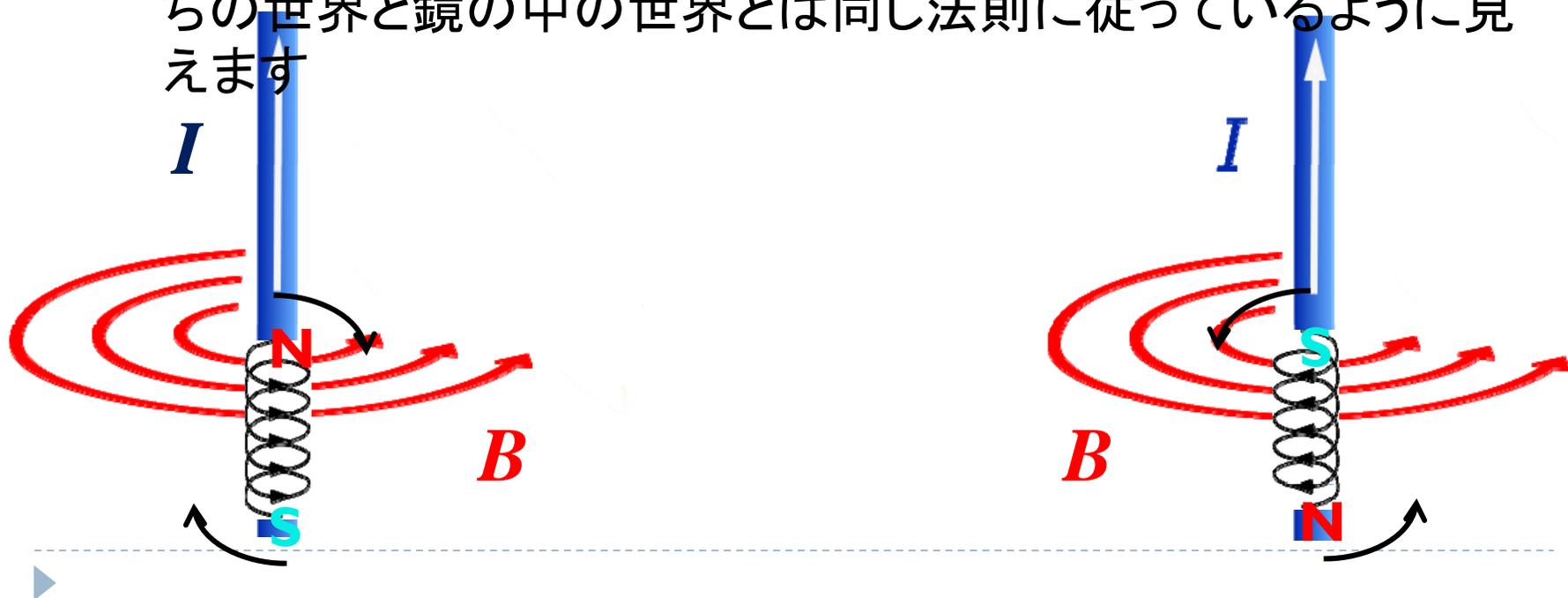
- ▶ 電流を右ねじの進む方向に直進させると、磁場は右ねじの回転方向に生じる
- ▶ 鏡の中の世界では成り立たない？



パリティ対称性

▶ 「アンペールの右ねじの法則」

- ▶ 磁場は微小電流の流れによって生じます。
- ▶ 鏡の中の世界では円電流が逆向きに流れるので、磁石のN極とS極も入れ替わってしまいます。
- ▶ 磁石が反対に動いても磁場の向きは同じ。つまり、結局私たちの世界と鏡の中の世界とは同じ法則に従っているように見えます



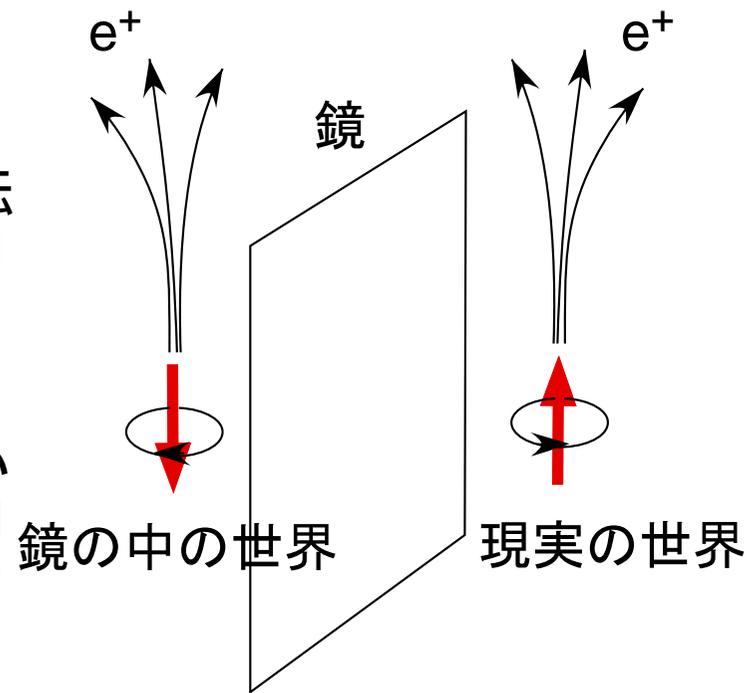
自然法則とパリティ変換

- ▶ 自然界には様々な力がありますが、基本的な力としては「重力」「電磁力」「強い力」「弱い力」の4つの力しかないと現在は考えられています
- ▶ ニュートンの運動方程式はパリティ変換に対して対称
- ▶ 重力(万有引力の法則)はパリティ変換に対して対称
- ▶ 電磁力の法則(クーロンの法則、アンペールの右ねじの法則)はパリティ変換に対して対称
 - ▶ マクスウェル方程式はパリティ変換に対して対称なので、すべての電磁力の法則はパリティ変換に対して対称です
- ▶ このように、パリティ変換しても自然現象を区別できないことを「パリティ変換に対して対称である」(P対称性)といいます
- ▶ 全ての法則はパリティ変換に対して対称であると信じられていました



パリティの破れ

- ▶ 1956年、コロンビア大学の Garwin らは「弱い力」でP対称性が守られているかどうかを検証する実験を行いました。「弱い力」はミューオンを崩壊させ、陽電子を放出します。
- ▶ 今、自転しているミューオンがあるとします
- ▶ 鏡を置くと自転の向きは逆になります
- ▶ ミューオンは「弱い力」によって崩壊し、陽電子を放出します
- ▶ 例えば、陽電子の向きがミューオンの自転の向きに出やすいとしたら、鏡の中では自転の反対向きに出やすいように見えるはずです。つまり現実の世界と鏡の中の世界に差があることとなります
- ▶ つまり、「弱い力」でP対称性が保たれているならば、陽電子はミューオンの自転の向きとは無関係な方向に出てくるはずだということになります



パリティの破れ

- ▶ 1956年12月に行われた実験では、驚くべきことに、陽電子はミュオンの自転の向きの方角によく出てくる(=ミュオンの崩壊ではパリティが破れている)ことが分かりました。これは「自然界には右と左の違いがある」ことを示した最初の実験の一つです。

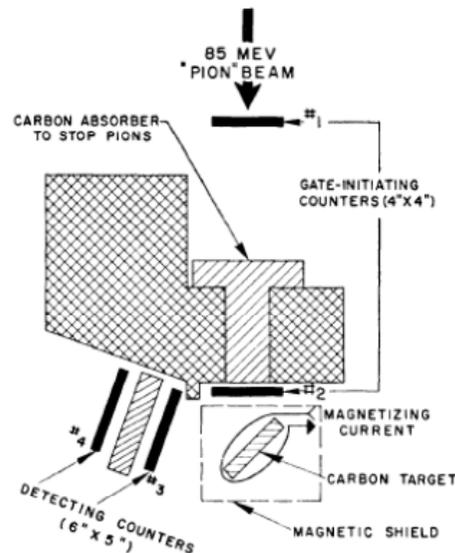


FIG. 1. Experimental arrangement. The magnetizing coil was close wound directly on the carbon to provide a uniform vertical field of 79 gauss per ampere.

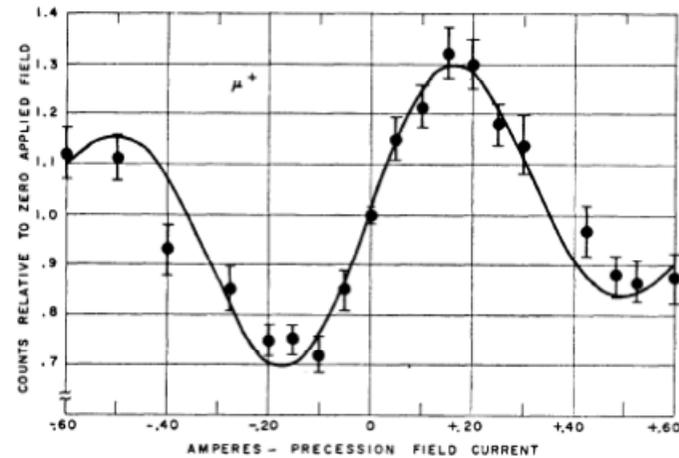
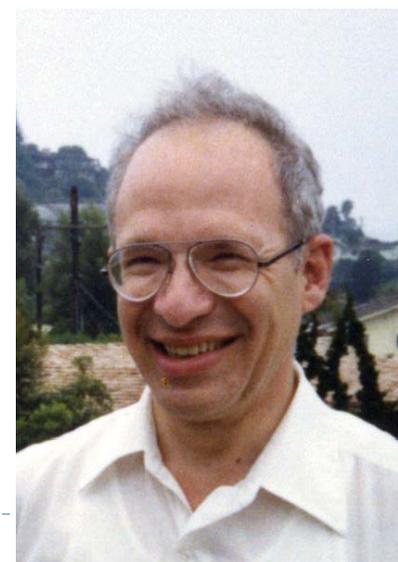
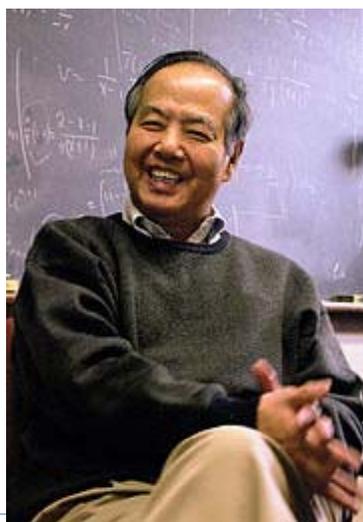


FIG. 2. Variation of gated 3-4 counting rate with magnetizing current. The solid curve is computed from an assumed electron angular distribution $1 - \frac{1}{2} \cos\theta$, with counter and gate-width resolution folded in.

R.L. Garwin et al. Phys. Rev. 105, 1415(1957) から

余談：1957年のノーベル物理学賞

- ▶ パリティの破れを理論的に予言したLee(李政道)とYang(楊振寧)が受賞
- ▶ 実験的に検証したWu(呉健雄)とGarwinは受賞を逃す
 - ▶ Wu は ^{60}Co の弱い力による崩壊で検証
 - ▶ Garwin はミューオンの弱い力による崩壊で検証



離散対称性

- ▶ パリティ(P)変換は座標を全て反転させるものでした

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \xrightarrow{P} \begin{pmatrix} -x \\ -y \\ -z \end{pmatrix}$$

- ▶ チャージ(C)変換は、電荷を全て反転させます
- ▶ タイム(T)変換は、時間を反転させます

$$t \xrightarrow{T} -t$$

- ▶ パリティの破れの発見の前は、全ての物理法則はこれらの変換に対して対称だと思われていましたが、「弱い力」はパリティを破ることが判明しました。
- ▶ では、これらの変換を組み合わせるとどうなるのでしょうか？



CP対称性の破れ

- ▶ 「弱い力」はC対称性を破ることはすぐに判明しました
- ▶ C変換とP変換を同時に行った場合には「弱い力」も対称になっているように見えたが...
- ▶ 1964年、Fitch と Cronin が「弱い力」によるK中間子の崩壊におけるCP対称性の破れを発見→ノーベル賞



The Nobel Prize in Physics 1980

"for the discovery of violations of fundamental symmetry principles in the decay of neutral K-mesons"



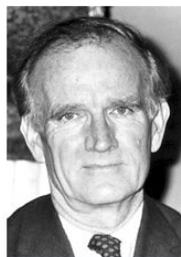
James Watson Cronin

1/2 of the prize

USA

University of Chicago
Chicago, IL, USA

b. 1931



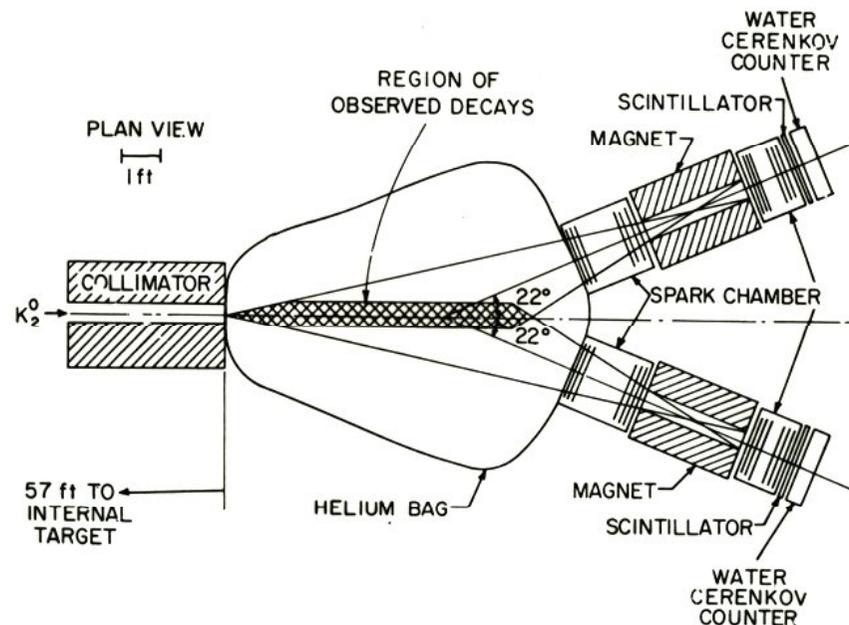
Val Logsdon Fitch

1/2 of the prize

USA

Princeton University
Princeton, NJ, USA

b. 1923



CP対称性の破れ

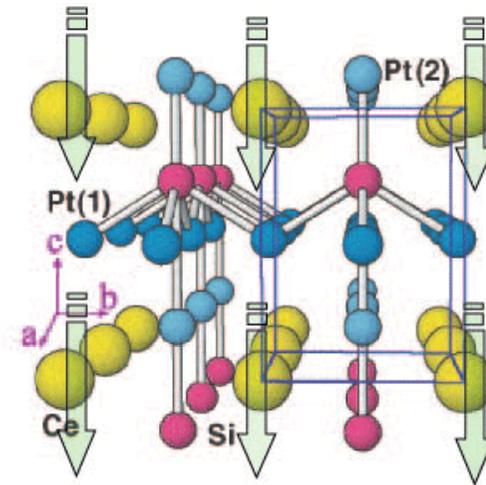
- ▶ 1964年 Fitch と Cronin が「弱い力」によるK中間子の崩壊におけるCP対称性の破れを発見
 - ▶ なぜ破れるのかは不明→理論屋さんへのchallenge
 - ▶ 他の粒子での CPの破れが見つからない→実験屋さんへのchallenge
- ▶ 1973年 小林と益川が1973年にクォーク(陽子や中間子を作る粒子)が6個あれば CPが破れることを示す
- ▶ 1980年 Fitch と Cronin がノーベル物理学賞受賞
- ▶ 1999年 KTeV実験(FNAL, USA)と NA48実験(CERN, Swiss)が違う種類の CPの破れを中性K中間子の崩壊で発見
- ▶ 2001年 BaBar実験(SLAC, USA)とBelle実験(KEK, Japan)がB中間子でのCPの破れを発見
- ▶ 2008年 小林と益川がノーベル物理学賞受賞

自然界における「対称性とその破れ」は面白い物理の宝庫！



余談：空間反転対称性や時間反転対称性が破れている超伝導

- ▶ 先ほどまでのページで話していた P や CP や T の破れは「真空中」での現象です。
- ▶ 結晶の中には原子配置が空間反転対称性を破っているものがあり、こうした物質が超伝導を示すと、通常の超伝導とは異なる性質を示します。こうした系の研究はここ最近の物性物理でのトピックの一つです。



(from Bauer et al. PRL92,0207003)

図1：空間反転対称性の破れた結晶構造の例。

空間反転対称性の破れた超伝導としてはじめて発見された CePt₃Si の結晶構造。

c 軸方向に空間反転対称性が破れており、この方向に発生した電場勾配（矢印の向き）がスピン軌道相互作用を生む。

CPT 対称性

- ▶ CもPもTも一度に変換したとき(CPT変換をしたとき)、物理法則は不変であることは「数学的に」証明されています
 - ▶ 厳密に言えば「局所性とローレンツ不変性を持つ理論ならば」という条件がついています
- ▶ このことは、粒子と反粒子の質量や寿命、磁気モーメントなどの物理量が等しいことを意味します
- ▶ これまでに実験的には CPT 対称性の破れは見つかっていません



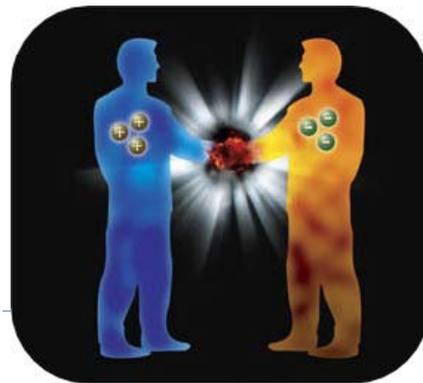
The Big Question: なぜ我々は存在するのか？

- ▶ 137億年前の「ビッグバン」のとき、粒子と反粒子は同じ数だけ生成されたと考えられています。にも関わらず、現在私たちがいる宇宙の中では

$$\eta_B = \frac{n_B - n_{\bar{B}}}{n_\gamma} = (6.1_{-0.2}^{+0.3}) \times 10^{-10}$$

と、粒子(物質)のほうが反粒子(反物質)より多いことが知られています。

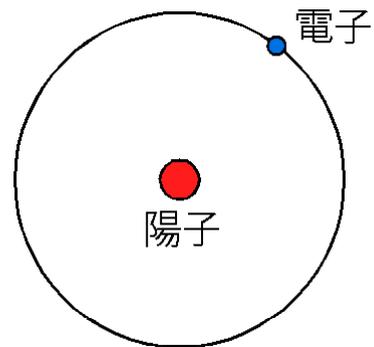
- ▶ この差があるおかげで、星々が誕生し、生命を育む星も生まれました。
- ▶ どうしてこのような差が生まれるのかは、今も物理学最大の謎の一つです。
- ▶ もしかしたら、粒子と反粒子の性質にわずかながらの違いがあるのでしょうか？
- ▶ **粒子と反粒子の性質を比較したい！**



水素と反水素

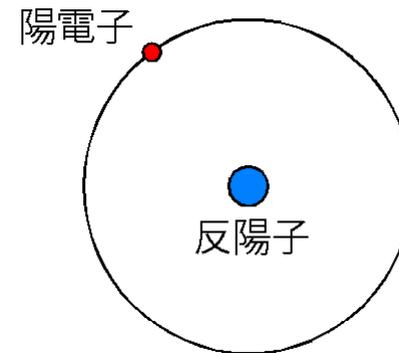
▶ 水素原子

- ▶ 陽子と電子が結び付いてできる一番単純な原子(物質)



▶ 反水素原子

- ▶ 反陽子と反電子(陽電子)が結び付いてできる一番単純な反原子(反物質)



性質に差があるのでしょうか？

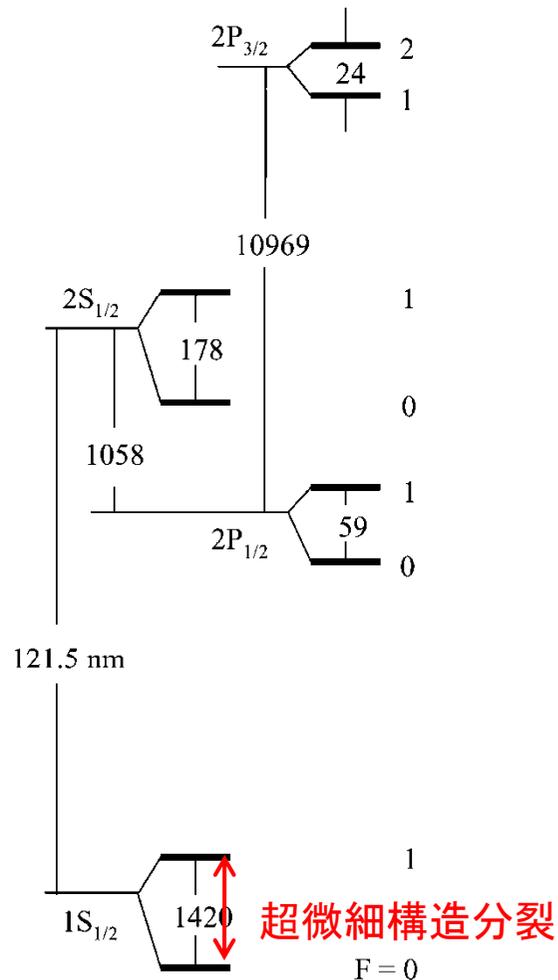


水素（様）原子の精密分光

- ▶ 水素様原子の精密分光は、これまでに物理学の発展の上で大きな役割を果たしてきました
 - ▶ ボーアの原子模型(←量子力学)
 - ▶ ディラック方程式(←相対論的量子論)
 - ▶ ラムシフト(←場の量子論)
 - ▶ 超微細構造(←スピン)
 - ▶ “水素を理解することは、物理学の全てを理解することである” (ヴィクター・ウェイスコプフ)
 - ▶ “反水素を理解することは、宇宙創成の謎を理解することである” (松田 恭幸)??



反水素の超微細構造分裂の測定

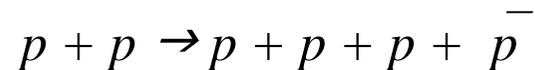


水素原子のエネルギー準位

- ▶ 水素原子を作っている陽子と電子は、ともに電荷とスピンを持っています(スピンを持つとは自転しているようなものです)。
- ▶ 電荷を持った粒子が自転しているので、陽子も電子も「磁気モーメント」を持ちます。
- ▶ 水素原子の基底状態(1S状態)は、この磁気モーメント同士の相互作用によってわずかに分裂しています
- ▶ $\nu_{\text{HF}}(\text{H}) = 1,420,405,751.7667 \pm 0.0009 \text{ Hz}$ (13桁の精度！)
- ▶ 反水素については誰も測っていません
(測定実験装置建設中)→もう少し詳しく説明します

反陽子の作り方

- ▶ さて、反水素や、それを作るために必要な反陽子は、そもそもどうやって作るのでしょうか？
- ▶ 有名なアインシュタインの式 $E=mc^2$ は質量がエネルギーに変わり得ること、エネルギーが質量に変わり得ることを表しています
- ▶ 陽子を加速し、大きな運動エネルギーを持った陽子を、止まっている陽子にぶつけ、反陽子を作ることができます

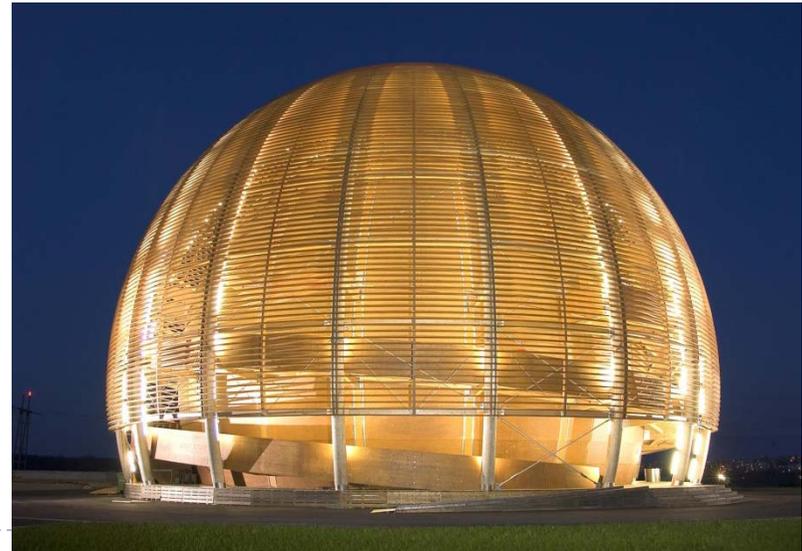
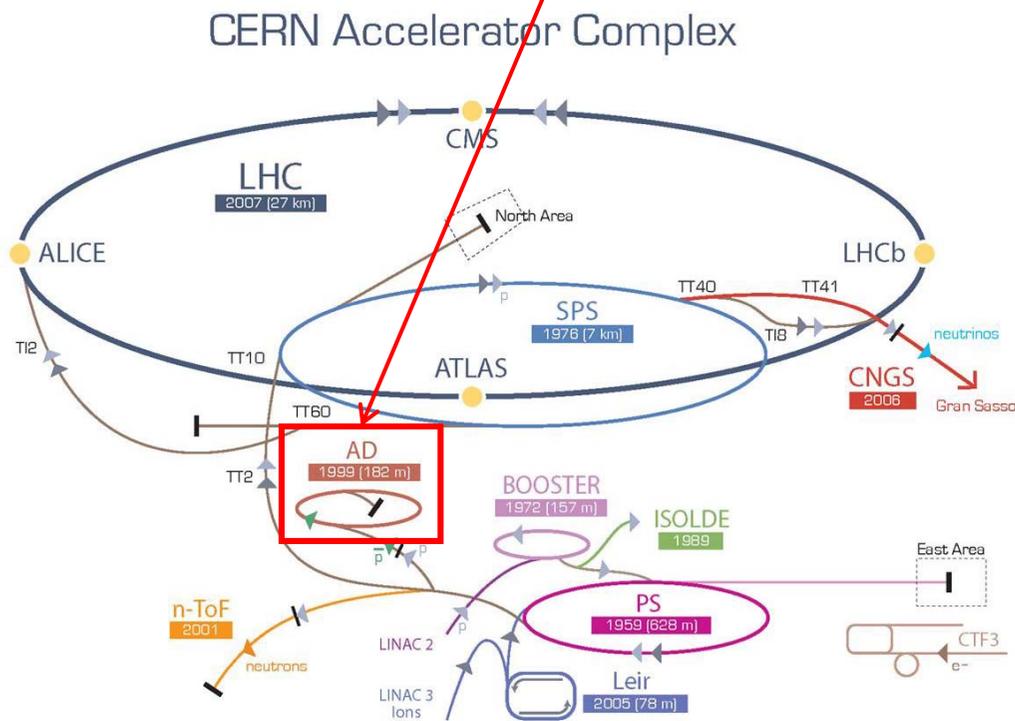


- ▶ この反応を起こすには、陽子を 6GeV (60億電子ボルト) 以上に加速する必要があります。私たちはCERN(欧州原子核研究機構)の加速器を使って反陽子を作り、研究しています。



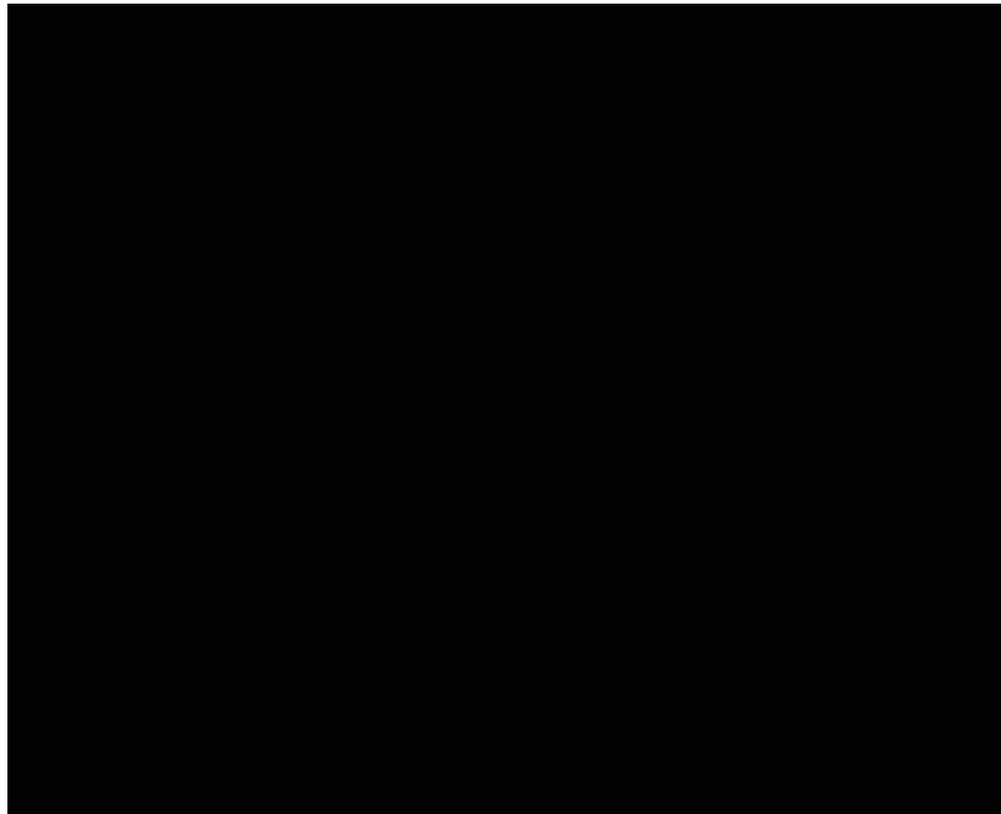
CERN (欧州原子核研究機構)

- ▶ CERNはスイスジュネーブ郊外にあり、世界でもっとも大きい研究所の一つです。ここでは大きいものから小さいものまで、数々の陽子加速器や電子加速器があり、さまざまな研究がすすめられています。
- ▶ 私たちは **AD (反陽子減速器)** で反陽子を使って研究しています



CERNと反物質

- ▶ CERNでの反物質研究は、最近映画のネタになっちゃいました
- ▶ ハリウッドが見る反物質研究は...

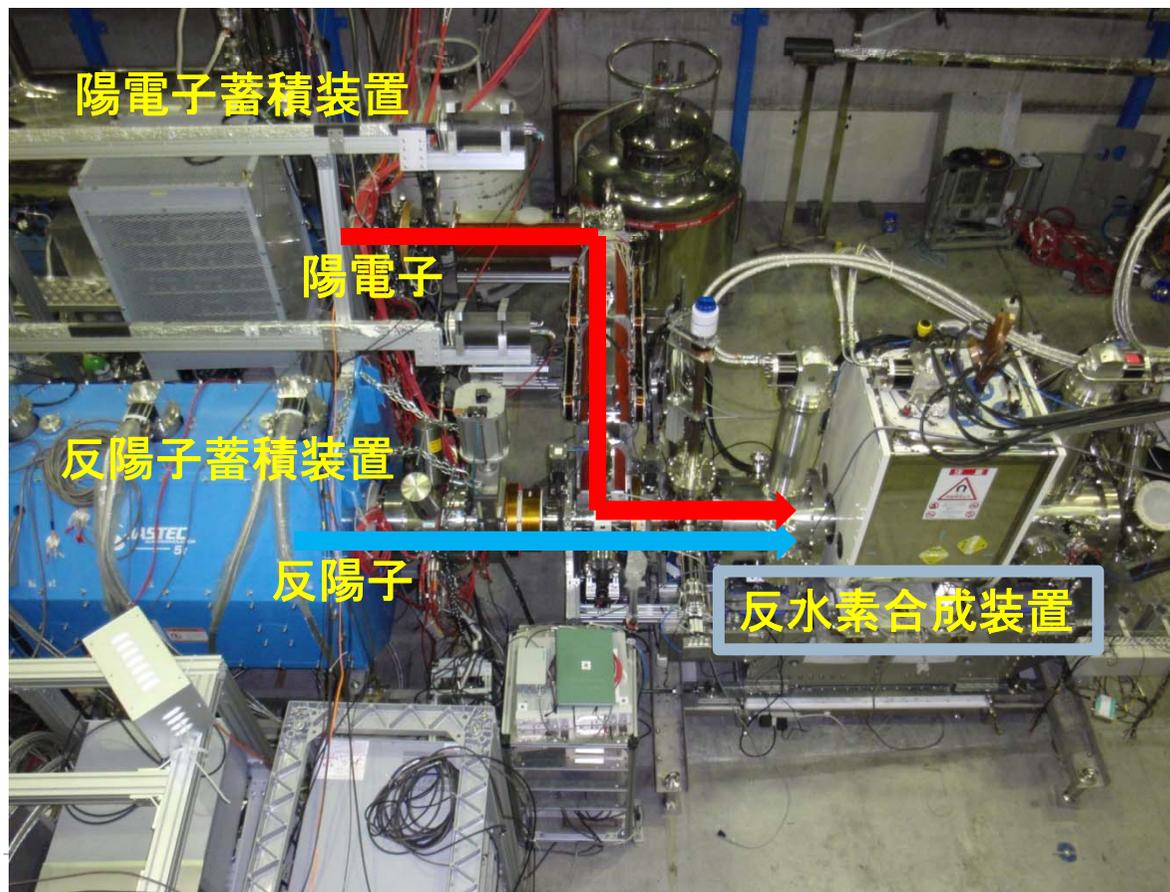


「天使と悪魔」(Sony Pictures Entertainment, 2009 : provided from CERN)



CERNと反物質

- ▶ CERNでの反物質研究は、最近映画のネタになっちゃいました
- ▶ ハリウッドが見る反物質研究は...
- ▶ 実際の実験施設は...



実験装置の概略図

- ▶ 反水素を作るためには、反陽子と陽電子を「やさしく」くっつけてあげなくてはなりません。そのための独自の超低速反陽子ビーム生成装置、低速陽電子ビーム生成装置を開発してきました

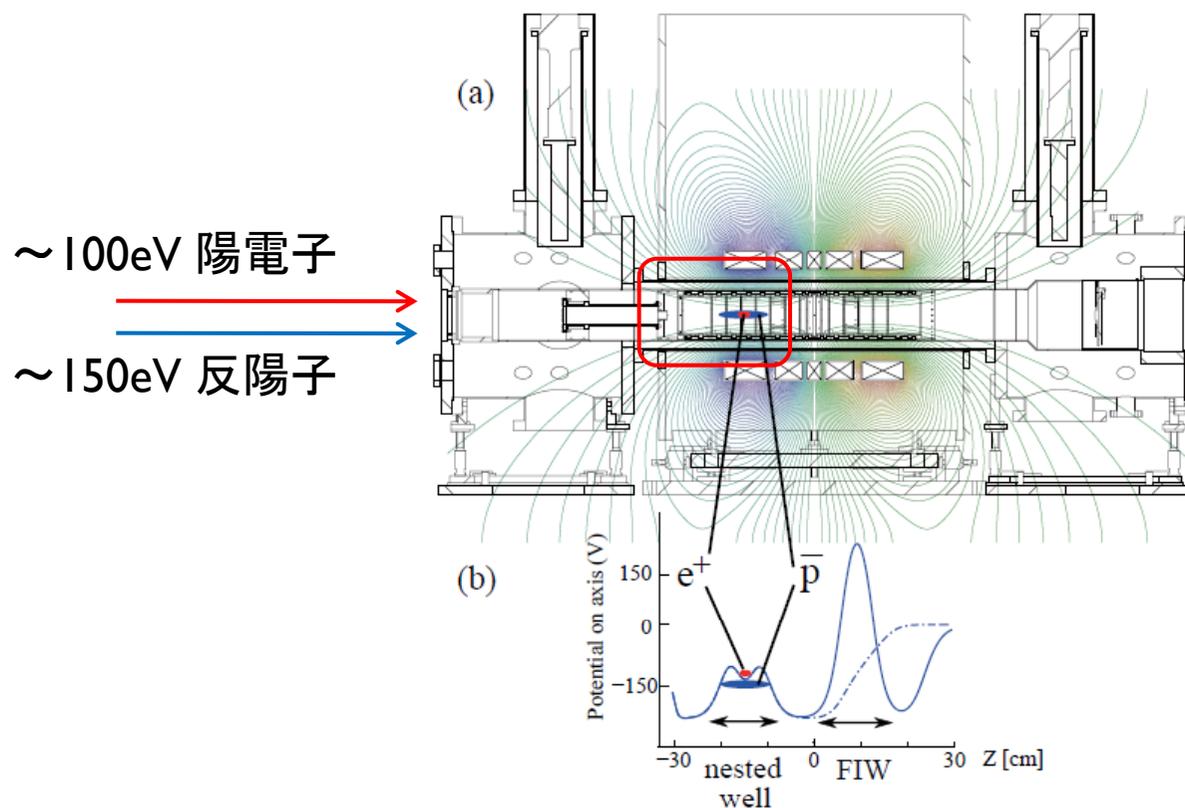
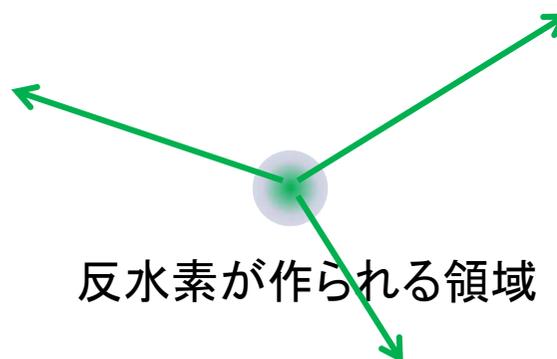


図3 (a) カスプトラップの磁力線分布と (b) 反陽子・陽電子混合時のポテンシャル

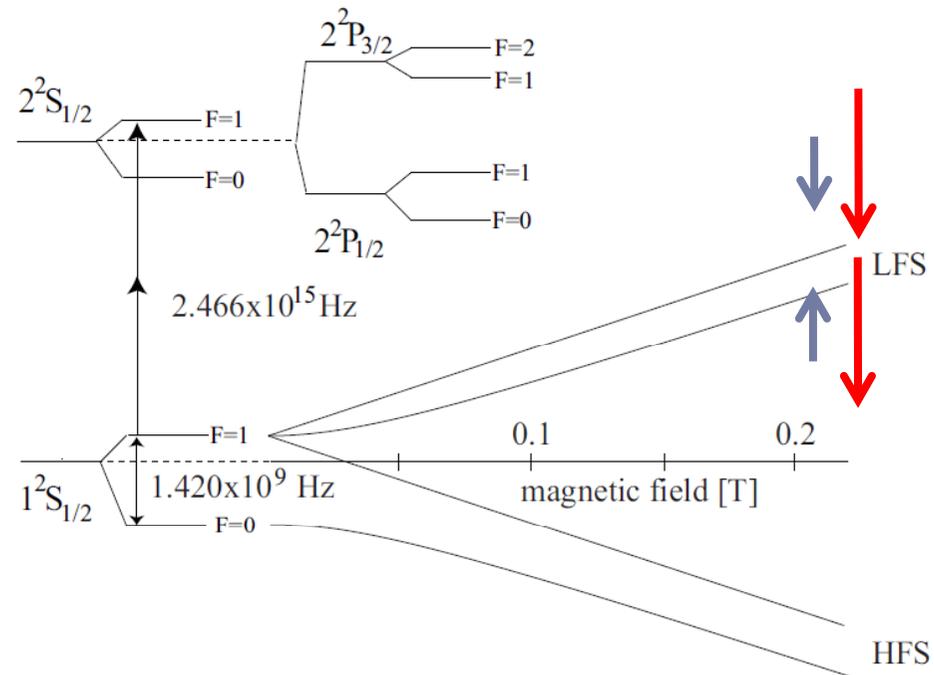
カusp磁場を用いた反水素ビームの生成

- ▶ 反水素原子は電氣的に中性なため、電場を使って力を及ぼすことができません
- ▶ そのため、生成された反水素原子は四方八方に飛び散ってしまいます



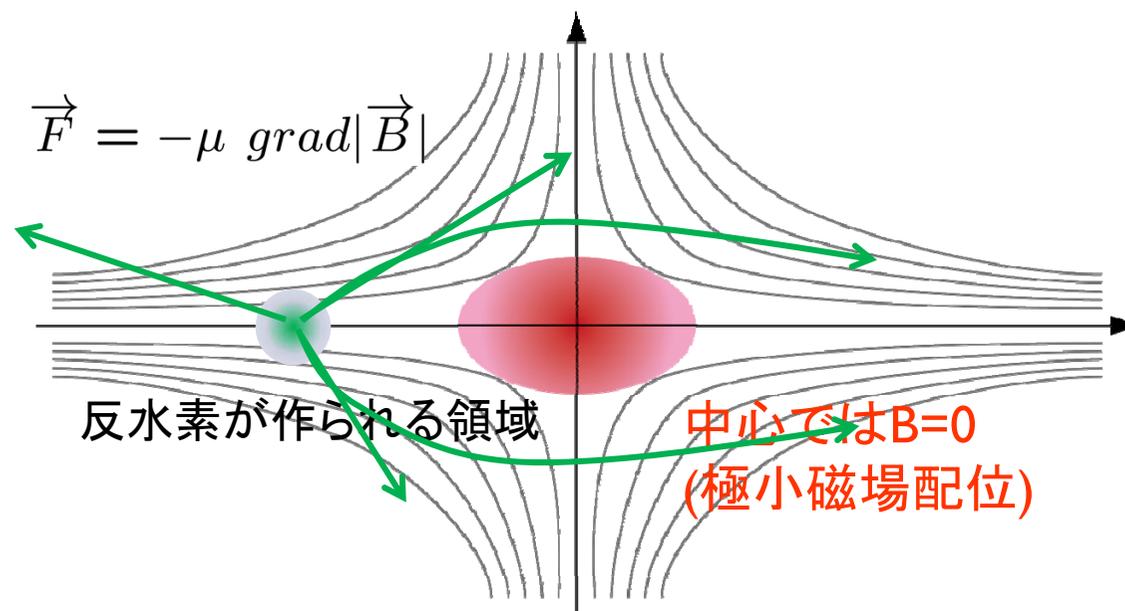
反水素の磁場中でのエネルギー準位

- ▶ 反水素原子の $1S$ 準位は、HFS によって分裂していますが、磁場中ではさらに分裂し、磁場が高くなるにつれてエネルギーが高くなる準位と、エネルギーが低くなる準位に分かれます。
- ▶ 磁場が高くなるにつれてエネルギーが高くなる準位は、磁場が低いところに向かって力を受けるため、Low Field Seeker (LFS) とよばれます。



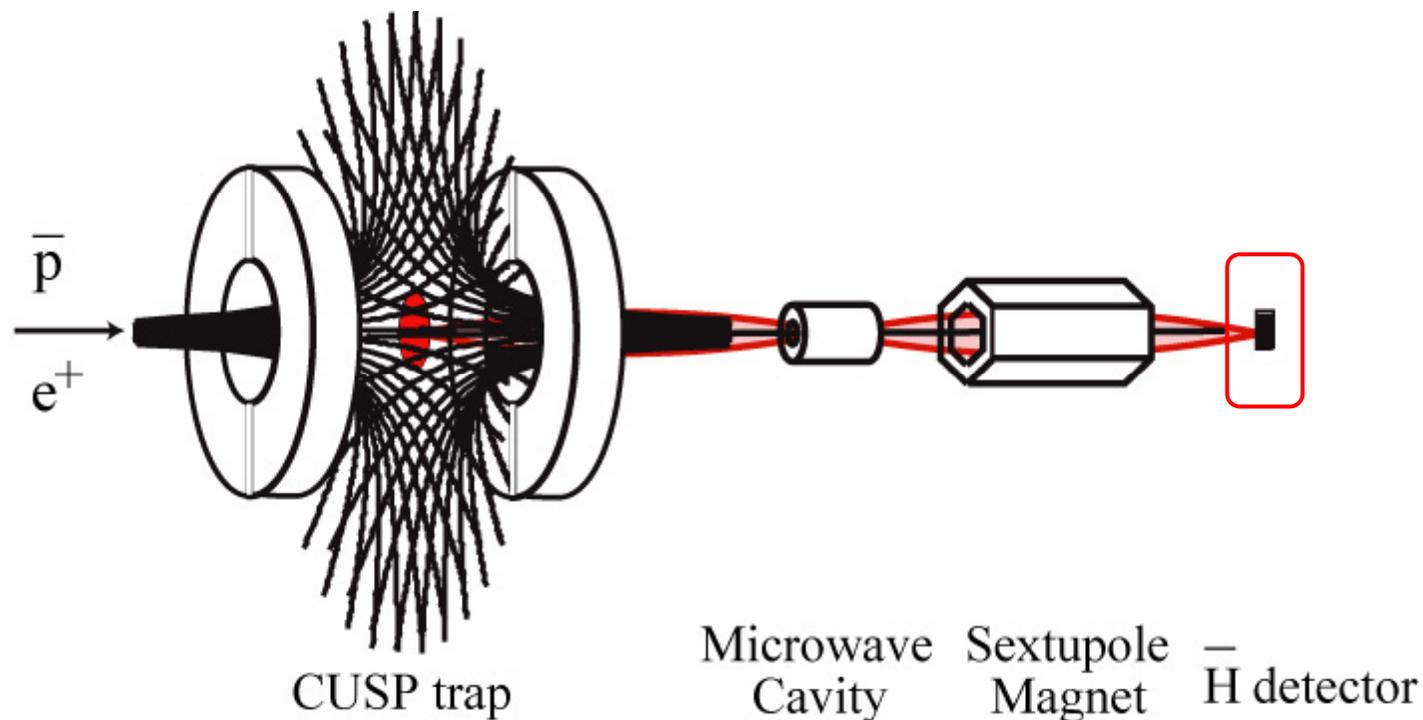
カusp磁場を用いた反水素ビームの生成

- ▶ 反水素原子は電氣的に中性なため、電場を使って力を及ぼすことができません
- ▶ そのため、生成された反水素原子は四方八方に飛び散ってしまいます
- ▶ 反水素原子のなかでもLFS状態にあるものは、磁場が弱い方向に力をうけます。私たちは、カusp型磁場と呼ばれる形の磁場を使って、四方に飛び散る反水素原子を収束してビームとして取りだそうと考えています。世界初の試みです



反水素ビームを用いた HFS分光実験

- ▶ 反水素ビームをカusp磁場から取り出した後、RF キャビティと六重極磁石を用いて HFS分光を行う予定です。

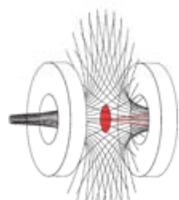


反水素ビームの生成に向けての進展

- ▶ 2010年夏にカस्प磁場中での反水素の合成に成功し、反水素ビームの生成に向けた一歩を踏み出しました。



Synopsis: Progress towards



Credit: Y. Enomoto et al., Phys. Rev. Lett. (2010)

Synthesizing
Y. Enomoto,
Kanai,
Venturi,
Matsuda
Phys. Rev. Lett.
Publish

Since cold antihydrogen (\bar{H}) was created in 2002, their spectra. Spectral differences between H and \bar{H} are being measured to test CPT symmetry.

An alternative to trapping is to actively extract antihydrogen for spectroscopy measurements. This approach also uses the magnetic fields used to nudge the antiprotons.

The ASACUSA collaboration at CERN has now taken a major step. In *Phys. Rev. Lett.*, the team demonstrates they can create \bar{H} in a trap. They used a so-called cusp trap, which consists of a magnetic cusp configuration and a series of ring electrodes that surround the trap.

After pulses of positrons and antiprotons entered a trap, a neutral \bar{H} was created and drifted downstream, it would soon become ionized and trapped.

By opening this second trap and counting the accurate number of antiprotons, 2% and 7% of incoming antiprotons into antihydrogen spin-polarized antihydrogen beam for high-precision spectroscopy.

[Previous synopsis](#) | [Next synopsis](#)

News archive

- ▶ 2011
- ▶ 2010
 - ▶ December 2010
 - ▶ November 2010
 - ▶ October 2010
 - ▶ September 2010
 - ▶ August 2010
 - ▶ July 2010
 - ▶ June 2010
 - ▶ May 2010
 - ▶ April 2010
 - ▶ March 2010
 - ▶ February 2010
 - ▶ January 2010
- ▶ 2009
- ▶ 2008
- ▶ 2007
- ▶ 2006
- ▶ 2005
- ▶ 2004
- ▶ 2003
- ▶ 2002
- ▶ 2001
- ▶ 2000
- ▶ 1999
- ▶ 1998
- ▶ 1997

Physics World reveals its top 10 breakthroughs for 2010

Dec 20, 2010 [25 comments](#)

It was a tough decision, given all the fantastic physics done in 2010. But we have decided to award the *Physics World* 2010 Breakthrough of the Year to two international teams of physicists at CERN, who have created new ways of controlling antiatoms of hydrogen.



Shared glory at CERN as antihydrogen research takes the gong

The ALPHA collaboration announced its findings in late November, which involved trapping 38 antihydrogen atoms (an antielectron orbiting an antiproton) for about 170 ms. This is long enough to measure their spectroscopic properties in detail, which the team hopes to do in 2011.

Just weeks later, the ASACUSA group at CERN announced that it had made a major breakthrough towards creating a beam of antihydrogen that is suitable for spectroscopic studies. Our congratulations to both teams.

We have also awarded nine runners-up mentions (see below) – with second place going to the first direct detection of the spectrum of an exoplanet and third place to the observation of quantum behaviour in an object big enough to be seen with the naked eye.

1st place: Antihydrogen success

The antihydrogen breakthroughs scooped our first prize because it ought now be possible to carry out the first detailed studies of the energy levels in antihydrogen. Any slight differences in the levels

Share this

- [E-mail to a friend](#)
- [Twitter](#)
- [Facebook](#)
- [Connotea](#)
- [CiteULike](#)
- [SHARE](#) [f](#) [t](#) [e](#) [...](#)

Related stories

[Probing the antiworld \(in depth\)](#)

Corporate video

"Multiphysics simulations" by COMSOL
[Learn more – view video](#)

Key suppliers



Contact us for advertising information

反水素ビームの生成に向けての進展

- ▶ 2010年夏にカस्प磁場中での反水素の合成に成功し、反水素ビームの生成に向けた一歩を踏み出しました。
- ▶ 2011年から12年にかけて
 - ▶ 陽電子の数を10倍以上に増やし、反陽子の冷却法の改善を行いました
 - ▶ 反水素検出器を改良しました
 - ▶ 分光に必要な六重極磁石とRFキャビティの導入
- ▶ 2012年夏に反水素ビームとして取りだすことに成功したんじゃないかなーと思っていますが、論文投稿中です。
- ▶ 2013年は加速器の運転がなかったので、装置の改良にいそしみました。
- ▶ 2014年からついに分光実験！



Collaborators (2013)

東大院総合文化:

石川彰一郎、大塚未来、黒田直史、高木聡、田島美典、鳥居寛之、長濱弘季
樋口嵩、松田恭幸、水谷丈洋

理化学研究所:

金井保之、永田祐吾、毛利明博、山崎泰規、S.Van Gorp、D. Murtagh、S. Ulmer

広大先端研:

桧垣浩之

東理大院理:

長嶋泰之、

Univ. of Brescia: (Italy)

N.Zurlo, L.Venturelli, E. L. Rizzini

Stefan Meyer Institute: (Austria)

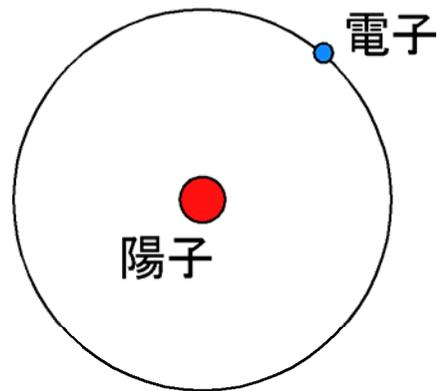
C. Malbrunot, O. Massiczek, C. Sauerzopf, E. Widmann

赤字 = 大学院生・ポスドク = 中心になって仕事をしている人たち



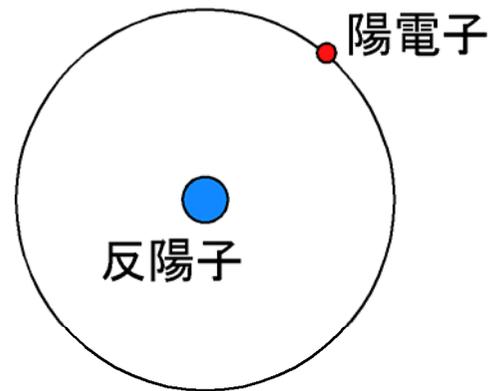
水素と反水素とミュオニウム

▶ 水素原子



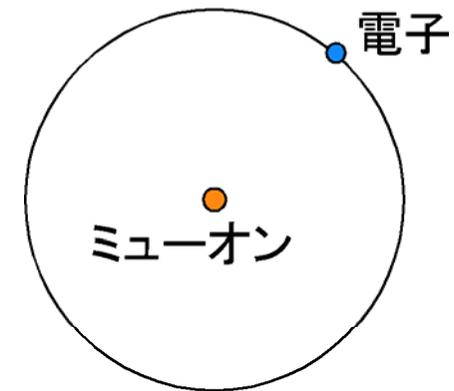
- ▶ 最も単純な原子
- ▶ 非常に精密な分光データと理論計算
- ▶ 陽子の構造の不確かさが理論計算の不確かさに最も寄与

▶ 反水素原子



- ▶ 最も単純な反原子
- ▶ エネルギー準位が水素原子と違えば、(陽子の構造の不確かさに依らずに)大発見！

▶ ミュオニウム



- ▶ レプトンのみからなる水素様原子
- ▶ スペクトルの構造は水素原子に類似
- ▶ 陽子の構造を考慮する必要がない



水素（様）原子の精密分光

- ▶ 水素様原子の精密分光は、これまでに物理学の発展の上で大きな役割を果たしてきました
 - ▶ ボーアの原子模型(←量子力学)
 - ▶ ディラック方程式(←相対論的量子論)
 - ▶ ラムシフト(←場の量子論)
 - ▶ 超微細構造(←スピン)
 - ▶ “水素を理解することは、物理学の全てを理解することである” (ヴィクター・ウェイスコプフ)
 - ▶ “物理学者の予言がいつも正しいのには理由がある。彼らは水素原子を計算し、ヘリウムイオンを計算したら、そこで止めてしまうのだ” (リチャード・ファインマン)



ご冗談でしょう、ファインマンさん

- ▶ 水素(様)原子のエネルギー準位の精密計算は、大変な労力が必要

(M.I.Eides et al. Phys. Rep. 342, 63 (2001) からほんの一部を抜粋)

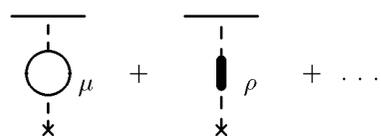


Fig. 16. Muon-loop and hadron contributions to the polarization operator. ³

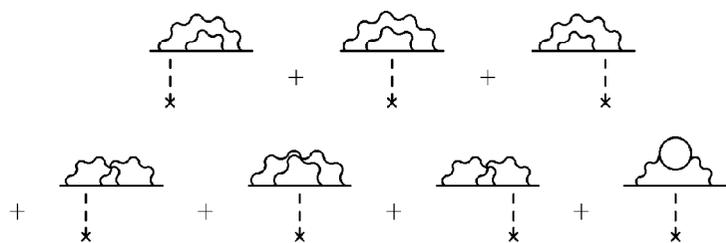


Fig. 12. Two-loop electron formfactor.

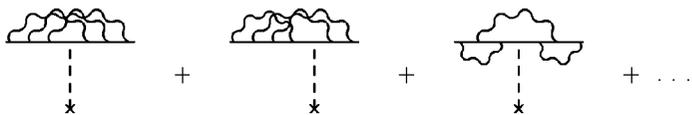


Fig. 14. Examples of the three-loop contributions for the electron form factor.

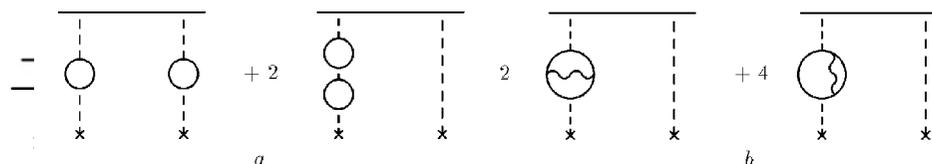
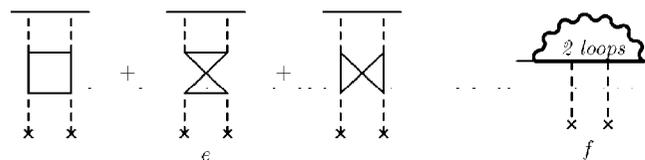
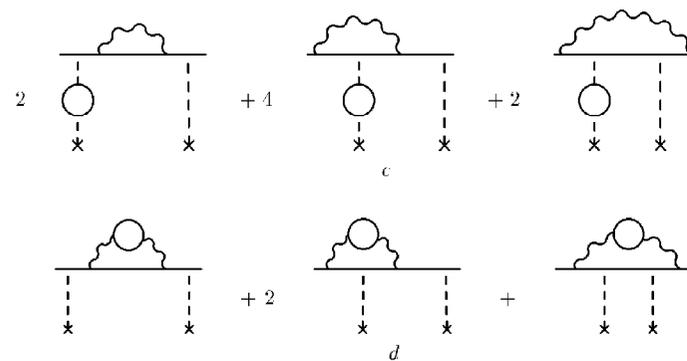
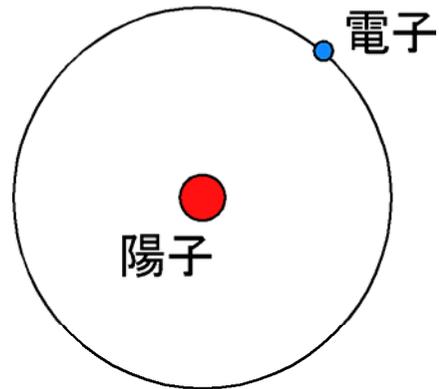


Fig. 20. Six gauge invariant sets of diagrams for corrections of order $\alpha^2(Z\alpha)^5 m$.



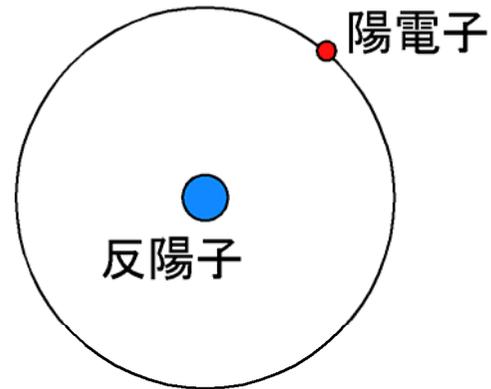
水素と反水素とミュオニウム

▶ 水素原子



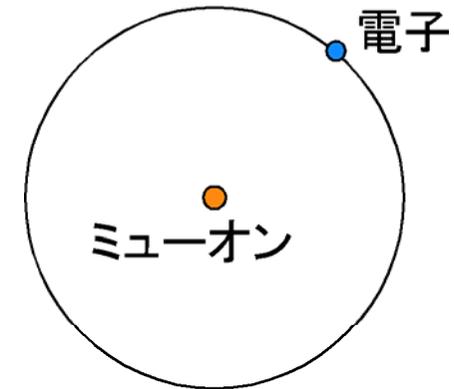
- ▶ 最も単純な原子
- ▶ 非常に精密な分光データと理論計算
- ▶ 陽子の構造の不確かさが理論計算の不確かさに最も寄与

▶ 反水素原子



- ▶ 最も単純な反原子
- ▶ エネルギー準位が水素原子と違えば、(陽子の構造の不確かさに依らずに)大発見！

▶ ミュオニウム



- ▶ レプトンのみからなる水素様原子
- ▶ スペクトルの構造は水素原子に類似
- ▶ **陽子の構造を考慮する必要がない＝計算が簡単に！**

最近の状況（ミュオニウム）

▶ ミュオニウム原子の精密分光

- ▶ HFS transition: $\Delta\nu=4\,463\,302\,765(53)\text{Hz}$ (12ppb)

- ▶ Liu et al. PRL 82, 711(1999)

- ▶ R_∞ と α を与えられたものとする(CODATA 2006)

$$\frac{\mu_\mu}{\mu_p} = 3.183345137(85) \text{ (27ppb)}$$

$$\frac{m_{\mu^+}}{m_{e^-}} = 206.7682823(52) \text{ (25ppb)}$$

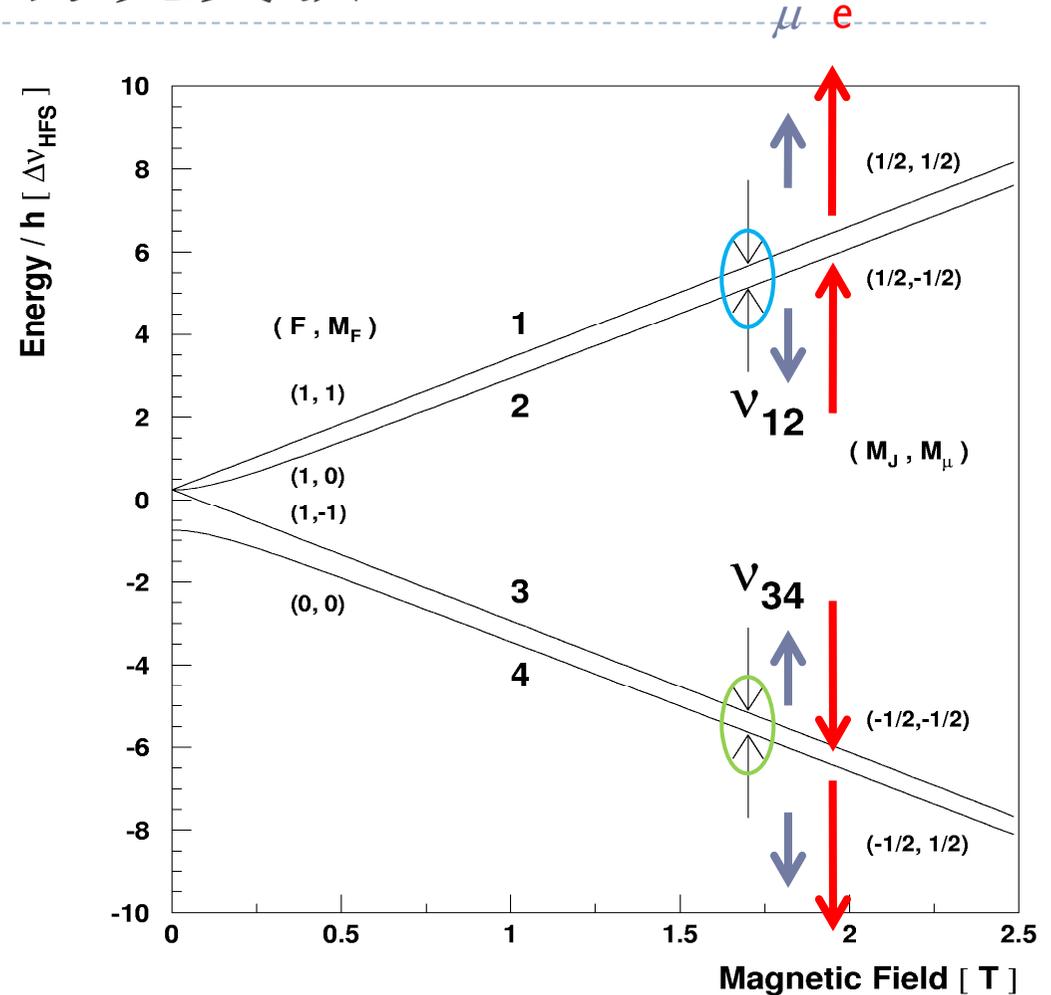
- ▶ 現時点で、理論的な計算値と実験値はズレていない

- ▶ 水素原子とポジトロニウムではズレている。本当ならミュオニウムでもズレるはず。
 - ▶ ズレがあれば、それは現在の素粒子理論には含まれていない粒子を間接的に捉えたことになる
 - ▶ 構造を持たない粒子からなるミュオニウムは調べるのに最適



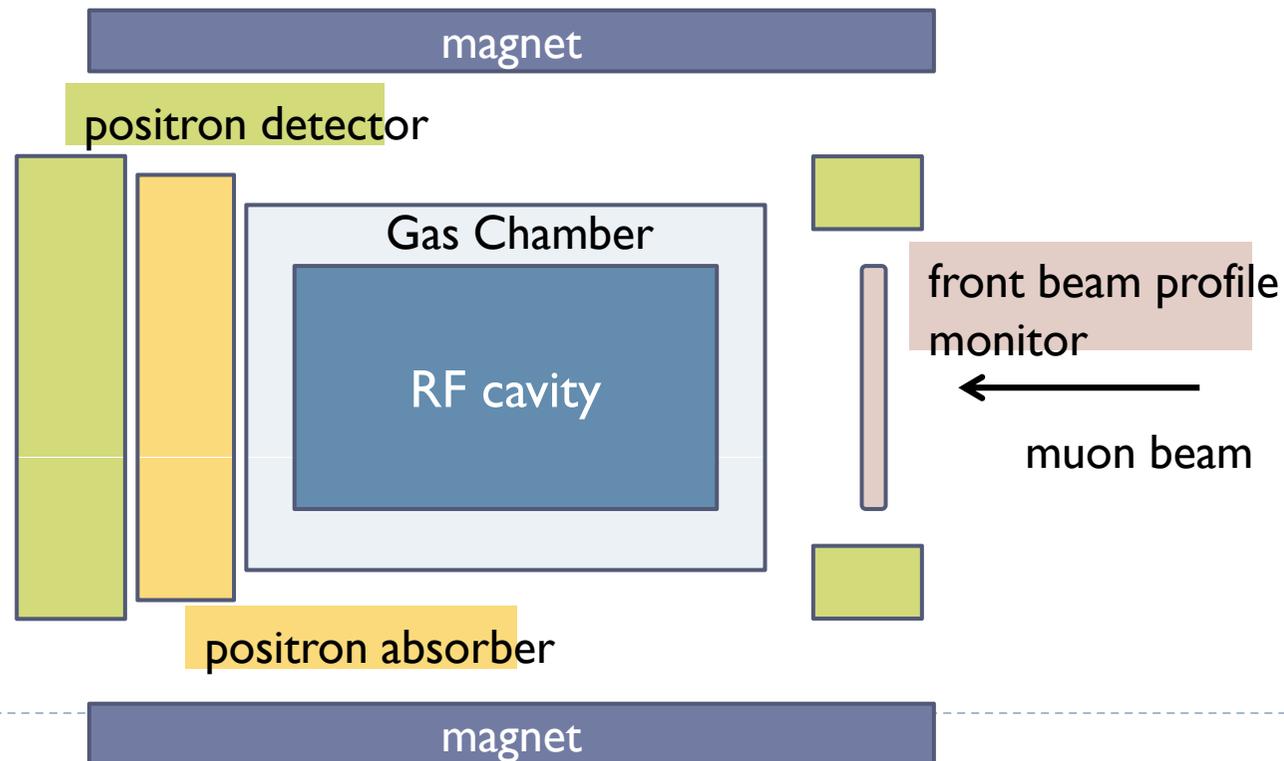
ミュオニウム HFS 分光実験

- ▶ 無磁場での基底状態の分裂を測定するのではなく、強磁場中での ν_{12} , ν_{34} を測定する
(ミュオンのスピンの向きをプローブとして使うため)
- ▶ $\nu_{12} + \nu_{34} = \Delta\nu_{\text{HFS}}$
 - ▶ $\nu_{12} \sim 1.9\text{GHz}$ (at 1.7T)
 - ▶ $\nu_{34} \sim 2.6\text{GHz}$ (at 1.7T)
- ▶ 両方の周波数に共鳴するような RF キャビティを用いる

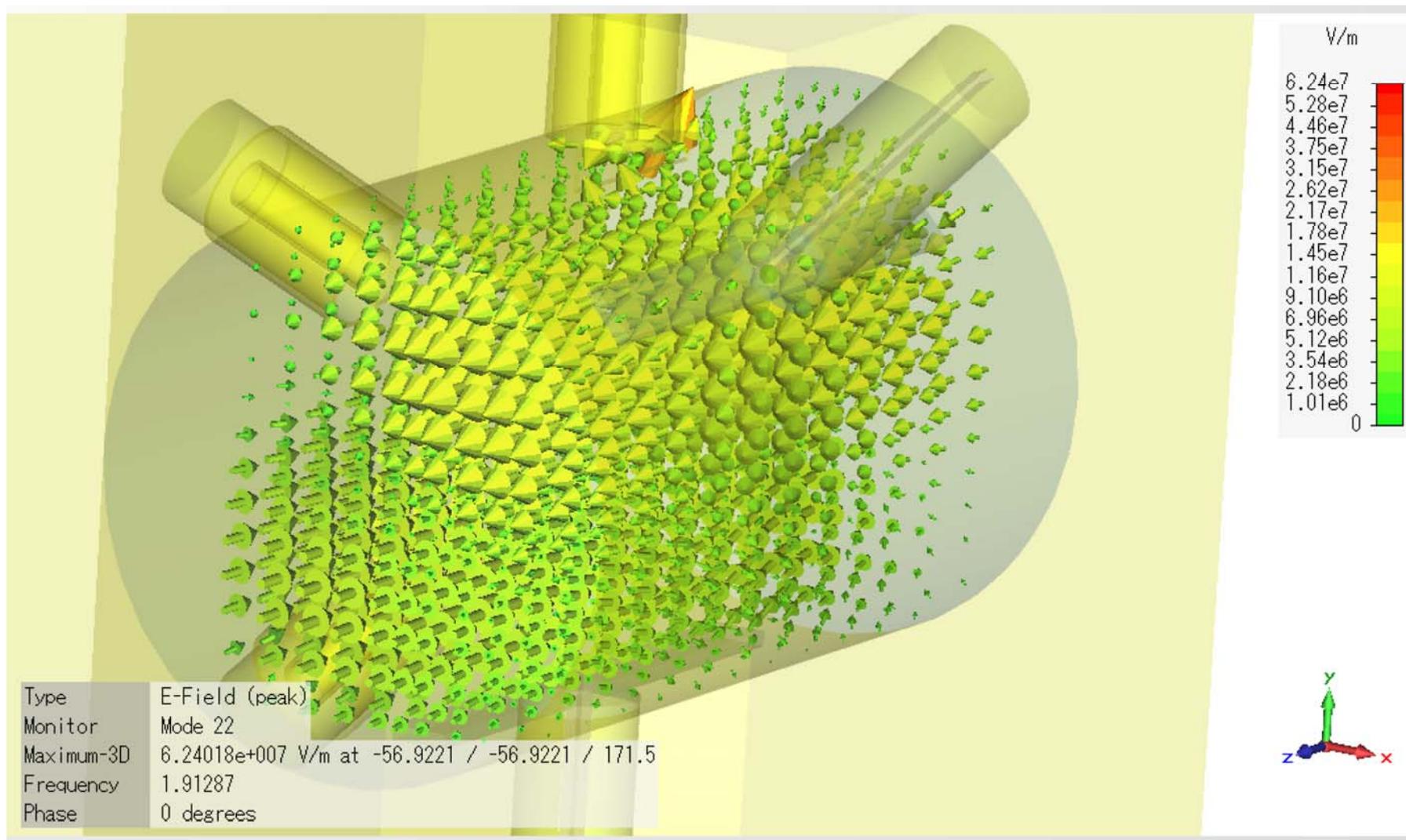


ミュオニウムHFS 分光実験

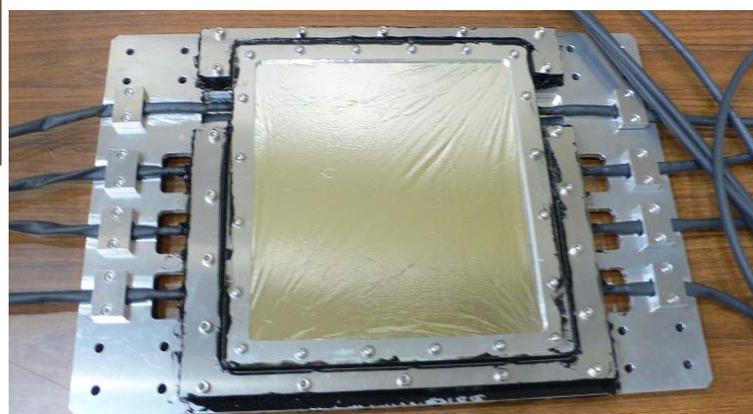
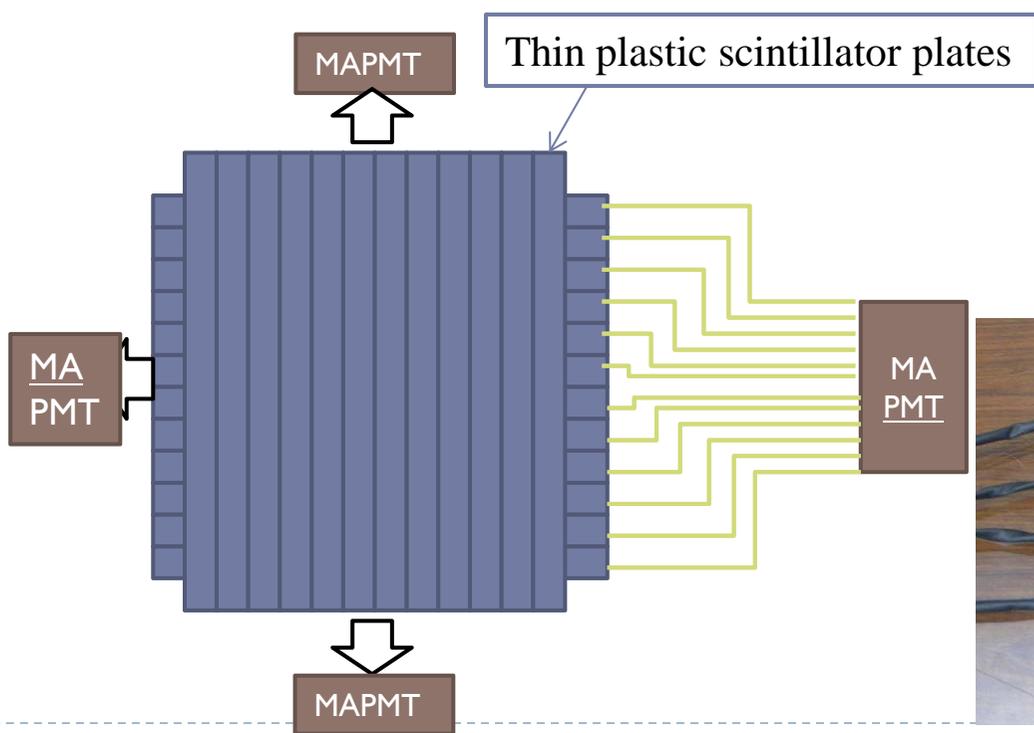
- ▶ 均一な強磁場中に Kr ガスをつめた RF キャビティを置く
- ▶ ミュオンを打ち込み、キャビティの中にミュオニウムを作る
- ▶ RF をかけてミュオニウムのスピンの向きを反転させる
- ▶ ミュオニウムのスピンの向きを、崩壊時の陽電子の向きから測る



RF キャビティの制作



プロファイルモニタの開発



Collaborators (2012)

- ▶ 東大院総合文化

- ▶ 田中香津生、水谷丈洋、鳥居寛之、松田恭幸

- ▶ 高エネルギー加速器研究機構

- ▶ 下村浩一郎、豊田晃久、斉藤直人、神田聡太郎、深尾 祥紀、佐々木憲一、菅野未知央、三部勉

赤字＝大学院生・ポスドク＝中心になって仕事をしている人たち



“はたらく素粒子原子”

- ▶ 素粒子を含む原子をつかった基礎物理のお話は分かったから、もうちょっとぼくらの生活に「役に立つ」研究はないの？



核融合反応

- ▶ 重水素と三重水素(トリチウム)の原子核が反応してヘリウム4と中性子になる反応は、エネルギー源として最も有望な核融合反応として世界各国で研究が行われています。



- ▶ ところが、プラスの電荷を帯びた原子核と原子核の間には強いクーロン斥力が働きます。この反応を起こすには、**クーロン斥力に打ち勝つだけのエネルギーをDやTに与える必要があります。**
 - ▶ 超高温(数億度)のプラズマを作り、熱エネルギーでクーロン斥力に打ち勝つ方法
 - ▶ 代表例:トカマク方式(JT-60、ITERなど)
 - ▶ 高温で超高压状態を作り、熱と圧力でクーロン斥力に打ち勝つ方法
 - ▶ 代表例:レーザー慣性核融合方式(激光、NIFなど)

どれも大変です

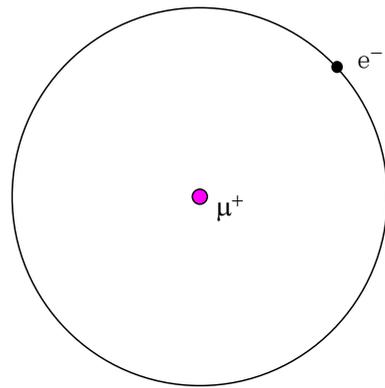
クーロン斥力に打ち勝たずに核融合を起こせないでしょうか

ミューオンを使ってできます

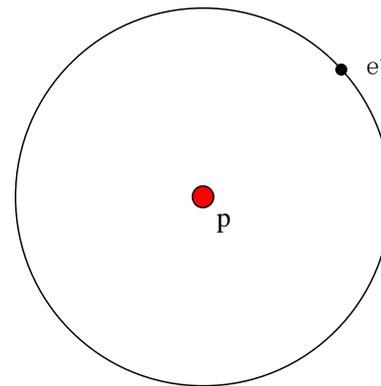


ミュオニック原子

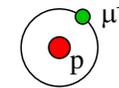
- ▶ ミュオニウム原子は水素原子の陽子が正の電荷を帯びたミュオンに置きかえられたものでしたが、逆に、水素原子の電子が負の電荷をもったミュオンで置き換えられた原子をミュオニック水素原子と呼びます。
 - ▶ μ^- は電子のおよそ200倍重い粒子です。
 - ▶ ミュオンの軌道半径は電子の軌道半径のおよそ 1/200 になります
- この原子をうまく使って核融合を起こすことができます



参考:ミュオニウム原子



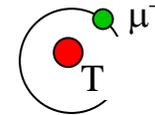
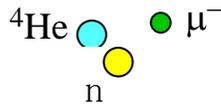
水素原子



ミュオニック水素原子

ミュオン触媒核融合の原理

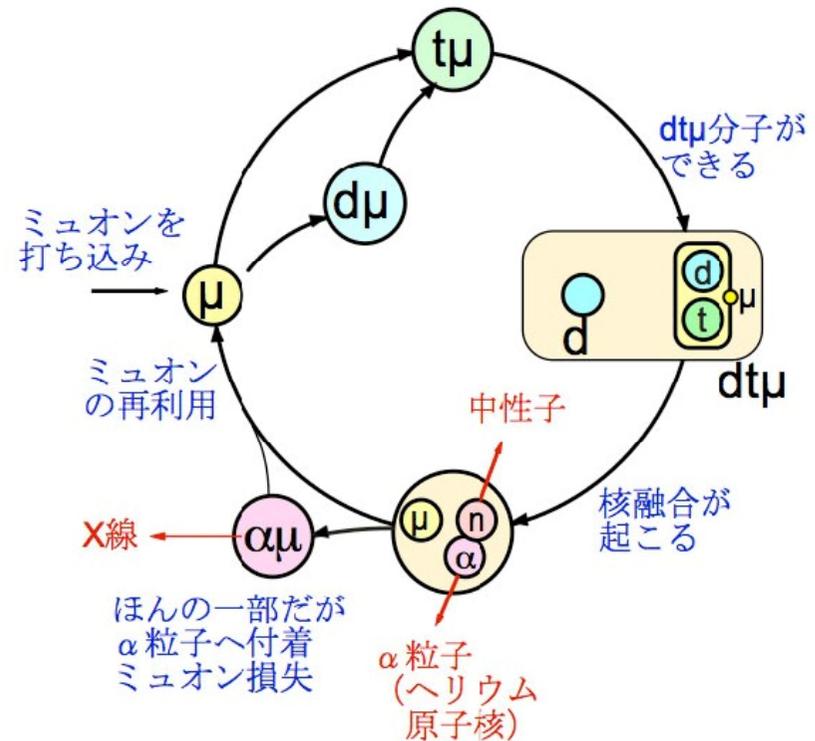
- ▶ 先ほど説明したように、通常なら D と T の間には強い斥力が働き、近づくことができません。
- ▶ ところが μ^- がトリチウムの周りを回っている $T\mu^-$ 原子は、外から見ると「電氣的に中性」です。D のすぐそばまで近づいても斥力を感じません。



- ここで、 $DT\mu^-$ 分子が作られますが、このとき D と T の距離は普通の DT 分子のおよそ $1/200$ しかなく、すぐに核融合が起きるのです。
- 反応のあと、 μ^- が残されますが、この μ^- は近くのトリチウム原子に捉われると、また次の反応を引き起こします。こうして一つの μ^- が次々と核融合反応をおこします。これが「**ミュオン触媒核融合反応**」です。この反応は μ^- が $2.2\mu\text{sec}$ の寿命で崩壊するまで続きます。
- このミュオン触媒核融合では、クーロン斥力に打ち勝つために高温や高圧にする必要がありません。**手軽な核融合**です。

ミュオン触媒核融合

- ▶ 右の図はミュオンが次々と核融合反応を起こす様子を描いたものです。
 - ▶ 一つのミュオンで120回程度の核融合反応を起こさせることに成功しています。これがエネルギー源になるには、この10倍以上も効率を上げなくてはなりません。
 - ▶ 私たちは、様々な条件を変えながら効率を上げるための研究を理化学研究所、高エネルギー加速器研究機構と共同ですすめています
- **もしかしたら、将来はミュオン触媒核融合発電所ができているかも？**



私たちの研究室

「加速器で作られる様々な粒子とその束縛系を使って、
自然界の謎に挑む」

- ▶ 私は物質基礎科学コースに所属していますが、私の研究室の分野はいわゆる「物性物理」や「化学」ではありません。むしろ「素粒子実験」に近い研究室です。
 - ▶ 「素粒子実験」というと CERN LHC 実験のような大規模（数百人 × 十数年）のものが代表的ですが、私たちは比較的比較的小規模（数人 × 数年）の実験を志向しています。
 - ▶ 実験に用いるテクニックには様々な分野と共通性があります（原子トラップ、RF、プラズマ、レーザー...）
 - ▶ 「何か」に尖がって、楽しく研究をしたいと思っています。
-
- ▶

私たちの研究室

「加速器で作られる様々な粒子とその束縛系を使って、
自然界の謎に挑む」

現在の研究対象

- ▶ 反陽子が陽電子と作る束縛系である反水素
- ▶ ミュオンが電子と作る束縛系であるミュオニウム

自然界の謎をつ
きとめるために
これらの原子が
「はたらいて」い
ます！

研究の手法(手を動かすもの＝「尖がる」もの)

- ▶ 放射線検出器
 - ▶ 電気回路
 - ▶ 電子回路
 - ▶ プログラミング
 - ▶ RF
 - ▶ 低温
 - ▶ レーザー
 - ▶ 真空技術
-



まとめ

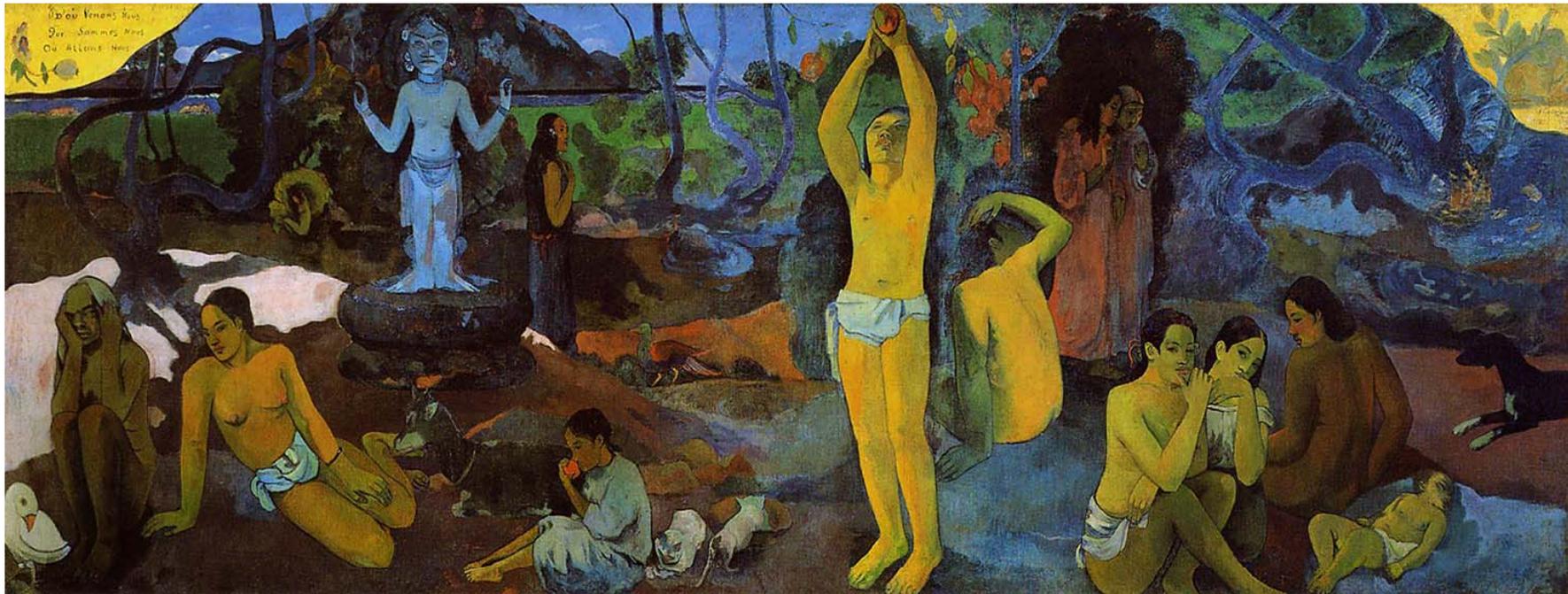
- ▶ 私たちの周りの物質を作っている粒子(陽子、中性子、電子)以外の素粒子(反陽子、ミュオンなど)も、原子を作ります
- ▶ そうした原子の性質をうまく使えば、宇宙生成の謎に迫ったり(反水素の分光によるCPT対称性の探求)、標準理論を超える現象の探索を行ったり(ミュオニウム原子の精密分光)、もしかしたらクリーンなエネルギーを作り出すことができる(ミュオン触媒核融合)かも知れません
- ▶ 自然界にはまだまだいろいろな謎があります。素粒子物理の世界にも、物性物理の世界にも、化学の世界にも、生物の世界にも...
- ▶ 社会にもさまざまな課題があります。エネルギー問題、食糧問題、経済問題...
- ▶ 加速器を用いた研究は様々な分野の謎や課題を解く力になる可能性があります

**明日の新しい研究分野を拓くのは
あなたがたかも知れません！**



人間の根源的な問い

- ▶ 《我々はどこから来たのか 我々は何者か 我々はどこへ行くのか》（ポール・ゴーギャン）



最初の二つの問いに科学は答えようとするが...



残る課題：我々はどこに行くのか

- ▶ 科学が決めることではない～むしろ哲学・文明論の範疇
- ▶ しかし、科学(技術)はこれからも我々の強力なパートナーであり続けるだろうことは確実：科学技術を活用せずに21世紀(以降)の人類の将来はない
 - ▶ 大地震と大津波(への対策の欠如)、福島原発事故など、“現時点での科学技術”の限界を知らしめる出来ごともありますが、それをもって“科学”そのものを悲観観してはならないと思います

東京大学教養学部の理念

- ▶ **主体的に考え続ける市民を育てたい(自分たちもなりたい！)**
 - ▶ 科学的な思考法を身につけていること
 - ▶ 専門知識＋広い視野・関心を持つこと
 - ▶ 異なる専門分野・バックグラウンドを持つ人ともコミュニケーションできること
- ▶ 「**一つ屋根の下**」に文系・理系問わずに様々な研究分野の人が集まり、**交流する場**を作ることが大切

みなさんに期待しています！



おしまい

レポートについて

- ▶ 提出期限は**12月20日(金)午後5時**とします
 - ▶ 提出場所は**15号館1階107A教務事務室**
 - ▶ レポート課題:
 - ▶ 対称性が破れている身近なものについて自由に述べてください
 - ▶ この講義の感想等、自由に書いてください
 - ▶ A4用紙に学生証番号と氏名を必ず記入して提出すること。枚数、形式は自由。言語は日本語または英語。
 - ▶ 講義のトラペを後日ホームページに載せます
 - ▶ <http://radphys4.c.u-tokyo.ac.jp/~matsuday>
 - ▶ 質問があったら遠慮なく16号館222A号室、または matsuday@phys.c.u-tokyo.ac.jp までどうぞ
-

