

総合科目「量子と光」第10回
宇宙創成の謎を反水素原子で探る

統合自然科学科／相関基礎科学系 松田 恭幸

前回のお話

- ▶ 私たちの周りにある物質を作っている粒子(陽子、中性子、電子)以外にも、いろいろな素粒子が存在します。
 - ▶ 水素原子の陽子を正電荷を持つミュオンで置き換えた原子を「ミュオニウム原子」と言います。
 - ▶ ミュオニウム原子を作っているミュオンと電子は両方とも大きさを持たないため、実験結果と理論計算を精密に比較することができます
→未知の力や粒子の探索に適しています
-



今回のお話

- ▶ 今日は「反陽子」を含んだ原子のお話をしたいと思います
- ▶ 反陽子は陽子の「反粒子」です
そもそも「反粒子」って何なのでしょう？

その話をするには 20世紀の初めごろにさかのぼる必要があります...



“奇跡の年” 1905年

アインシュタインが
次々と論文を発表

- ▶ 特殊相対論
- ▶ 光量子仮説
- ▶ ブラウン運動



“奇跡の年” 1905年

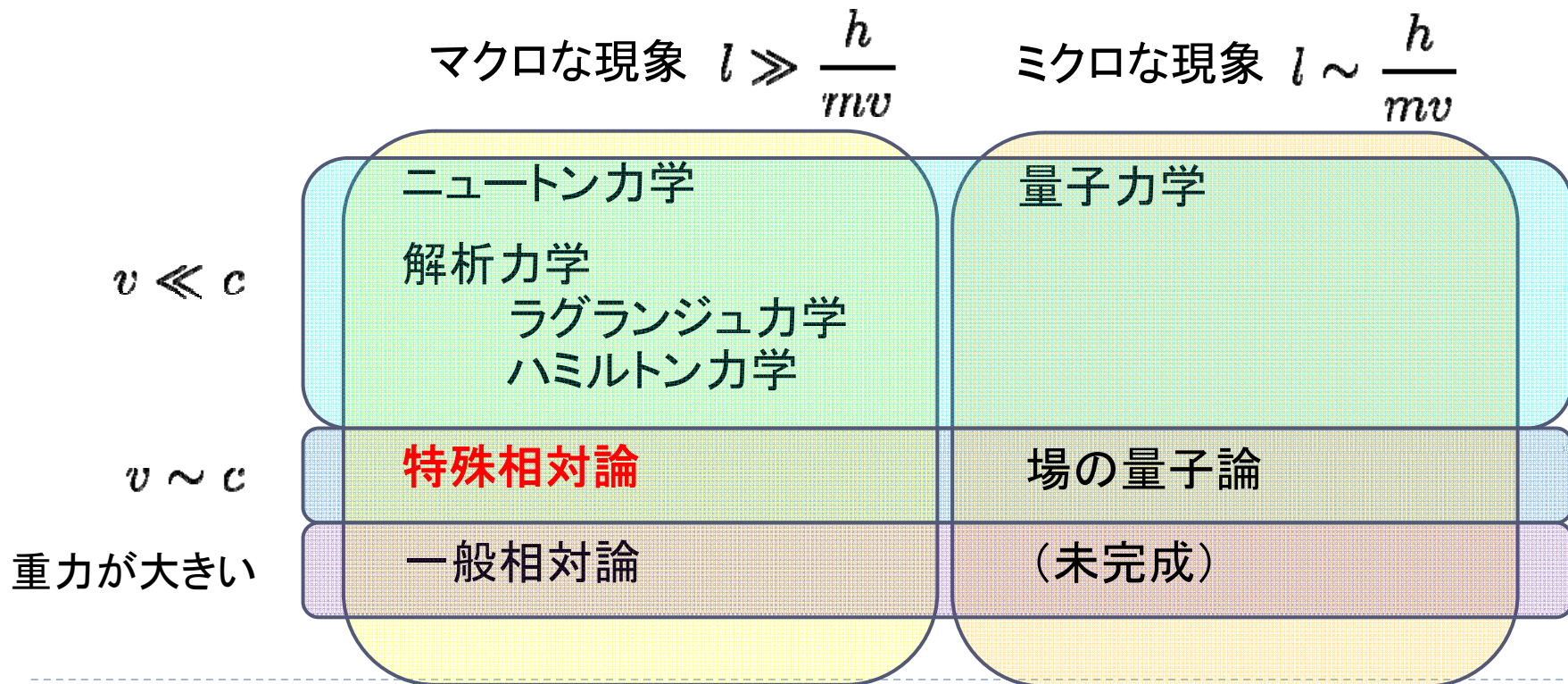
アインシュタインが
次々と論文を発表

- ▶ **特殊相対論**
- ▶ 光量子仮説
- ▶ ブラウン運動



古典力学の位置づけ

- ▶ 「古典力学」と言った場合には、運動の速度が光速度 c に比べて小さい場合の力学を指します。ニュートン力学と、その別の形の定式化である解析力学がこれに当てはまります
- ▶ 下の図のように書くと、「古典力学」の扱う範囲は非常狭いようにも見えますが、実際にはほとんどの力学的現象は古典力学で記述できます



特殊相対論

- ▶ 物体の運動速度が光速に近付いたときの「力学」の法則
- ▶ $v \ll c$ ではニュートン力学に一致
 - ▶ ニュートン力学自体も「自然界の本当の姿」を表すための「近似」でしかない
 - ▶ 特殊相対論は、より一歩近似を進めて「自然界の本当の姿」に近付いた力学体系
- ▶ 「光速度一定の法則」: **どの慣性系から見ても光速度は一定である**
- ▶ エネルギーと運動量の式 $E^2 = (pc)^2 + (mc^2)^2$

$$E = \sqrt{(pc)^2 + (mc^2)^2} = (mc^2) \sqrt{1 + (p/mc)^2}$$

$v/c \ll 1$ とすれば

$$\sim mc^2 \left(1 + \frac{1}{2} \left(\frac{p}{mc} \right)^2 \right) = \boxed{mc^2 + \frac{p^2}{2m}}$$

▶ mc^2 を除けば
古典力学と一致

“奇跡の年” 1905年

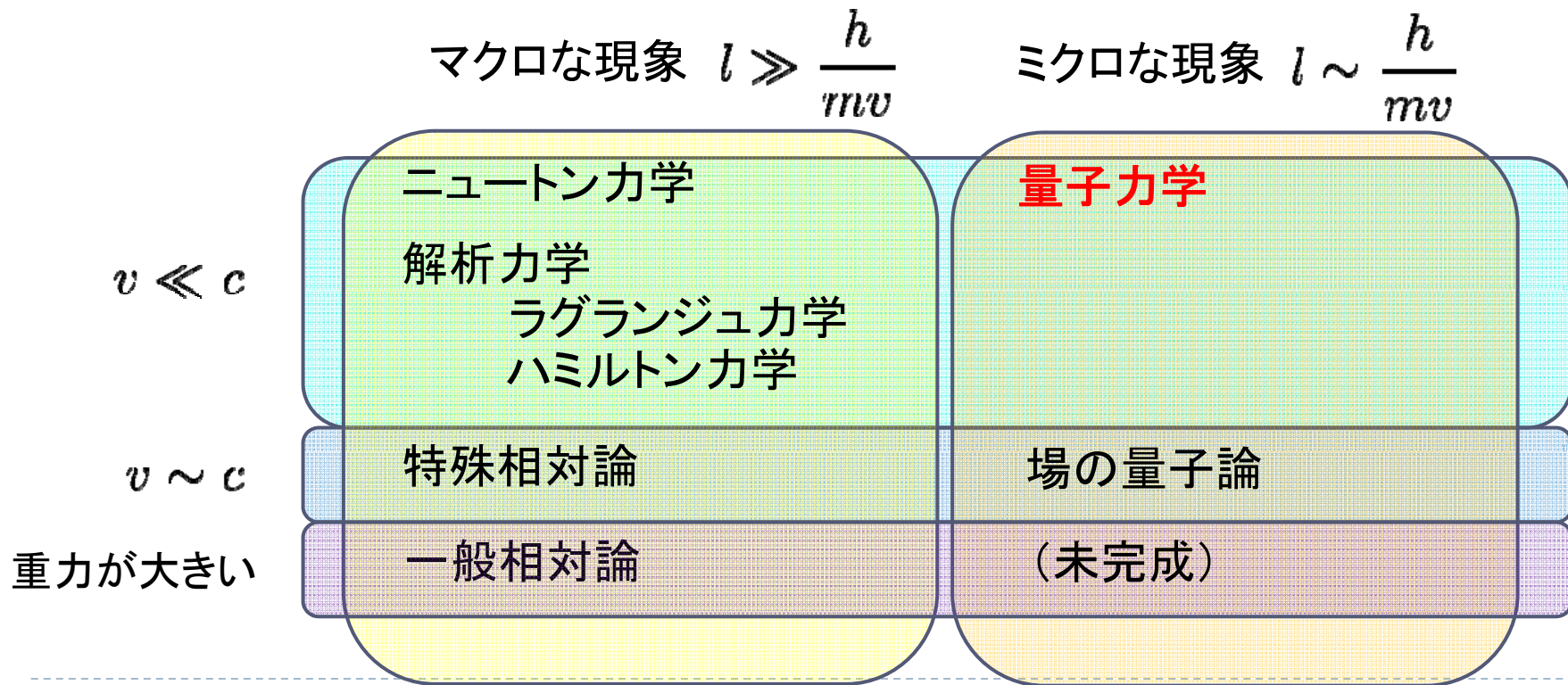
アインシュタインが
次々と論文を発表

- ▶ 特殊相対論
- ▶ 光量子仮説
- ▶ ブラウン運動



再掲：古典力学の位置づけ

- ▶ 「古典力学」と言った場合には、運動の速度が光速度 c に比べて小さい場合の力学を指します。ニュートン力学と、その別の形の定式化である解析力学がこれに当てはまります
- ▶ 下の図のように書くと、「古典力学」の扱う範囲は非常狭いようにも見えますが、実際にはほとんどの力学的現象は古典力学で記述できます



量子力学

- ▶ ミクロの世界を扱う「力学」の法則
- ▶ $l \gg \frac{h}{mv}$ ではニュートン力学と一致
- ▶ 不確定性原理: $\Delta p \Delta r \sim \hbar$
 - ▶ 位置と運動量を同時に決めることはできない
 - ▶ 時間とエネルギーを同時に決めることはできない
- ▶ シュレーディンガー方程式
 - ▶ 量子力学における運動方程式
 - ▶ 古典力学においては運動方程式は質点の位置の時間発展を記述するのに対して、量子力学では「波動関数」の時間発展を記述する



シュレーディンガー方程式

▶ 量子力学における運動方程式

- ▶ 外から力を受けずに自由に運動する粒子については

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \psi = -\frac{\hbar^2}{2m} \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} \right) \psi$$

- ▶ この式は、古典力学のエネルギーと運動量の関係式

$$E = \frac{p^2}{2m} \quad (p = mv)$$

において、 $E \rightarrow i\hbar \frac{\partial}{\partial t}$ $p \rightarrow -i\hbar \frac{\partial}{\partial x}$ と置きかえた形をしている

- ▶ 逆に言えば、シュレーディンガー方程式は $v \ll c$ の世界を記述している運動方程式。素粒子の運動を記述するには不適切。
-



Dirac 方程式

- ▶ Dirac は「ミクロ」の世界を扱う量子力学と、特殊相対論を結び付けた新しい方程式を導こうとした
- ▶ 特殊相対論におけるエネルギーと運動量の関係は

$$E^2 = (pc)^2 + (mc^2)^2$$

これを満たすように

$$E = \alpha \cdot (pc) + \beta mc^2$$

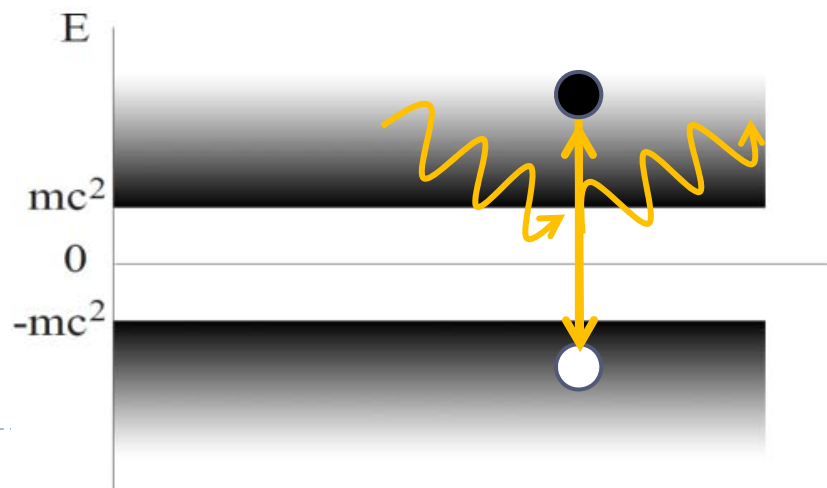
としたときの α と β を決めた
(Dirac 方程式)

→ 負のエネルギーの解が現れた



Dirac 方程式と負のエネルギー解

- ▶ 負のエネルギーを持つ状態があったら、全ての粒子はどんどんエネルギーを失って、負のエネルギー状態に落ちてしまいうに違いない
⇔ 観測事実と矛盾
- ▶ 負エネルギー状態はすでに埋め尽くされていて (Diracの海)、そこに粒子は落ち込めないに違いない
- ▶ では負エネルギー状態から粒子が飛び出して来たらどうなる？
 - ▶ 正エネルギー状態の粒子: 普通の粒子
 - ▶ 負エネルギー状態の「穴」: 普通の粒子と反対の電荷を持った粒子
- ▶ 「穴」に正エネルギーの粒子が落ち込むと、粒子も「穴」も消えてエネルギーが放出される



$$E = \alpha \cdot (pc) + \beta mc^2$$

反粒子

- ▶ Dirac は Dirac 方程式の帰結として、全ての粒子には質量が同じく、反対の電荷を持つ「反粒子」がある、と予言しました。
 - ▶ 「反粒子」と「粒子」が衝突すると、両方が消滅し、エネルギーを生成します(対消滅)
 - ▶ 十分なエネルギーを与えると、何もない空間から「粒子」と「反粒子」のペアを作り出すことができます(対生成)
 - ▶ 十分なエネルギーが与えられると、負のエネルギー状態を埋め尽くしている粒子が正のエネルギー状態に飛び出してくる現象です。負のエネルギー状態の「穴」が「反粒子」として見えることになります
 - ▶ Dirac は、陽子は電子の反粒子に違いない、と最初考えたと言われています。自然が符号が反対で同じ電荷量を持つ二つの粒子を作っているには何か理由があるはずだ、と思ったのです。
-



反粒子の発見 (陽電子の発見)

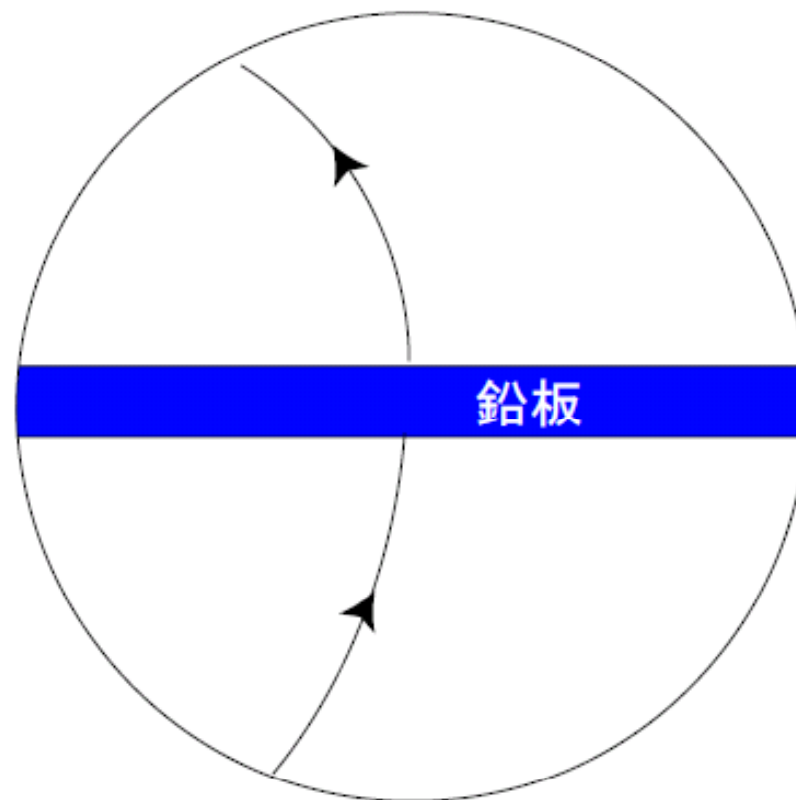


FIG. 1. A 53 million volt positron ($H\beta = 2.1 \times 10^6$ gauss-cm) passing through a 6 mm lead plate and emerging as a 23 million volt positron ($H\beta = 7.5 \times 10^5$ gauss-cm). The length of this latter path is at least ten times greater than the possible length of a proton path of this curvature.

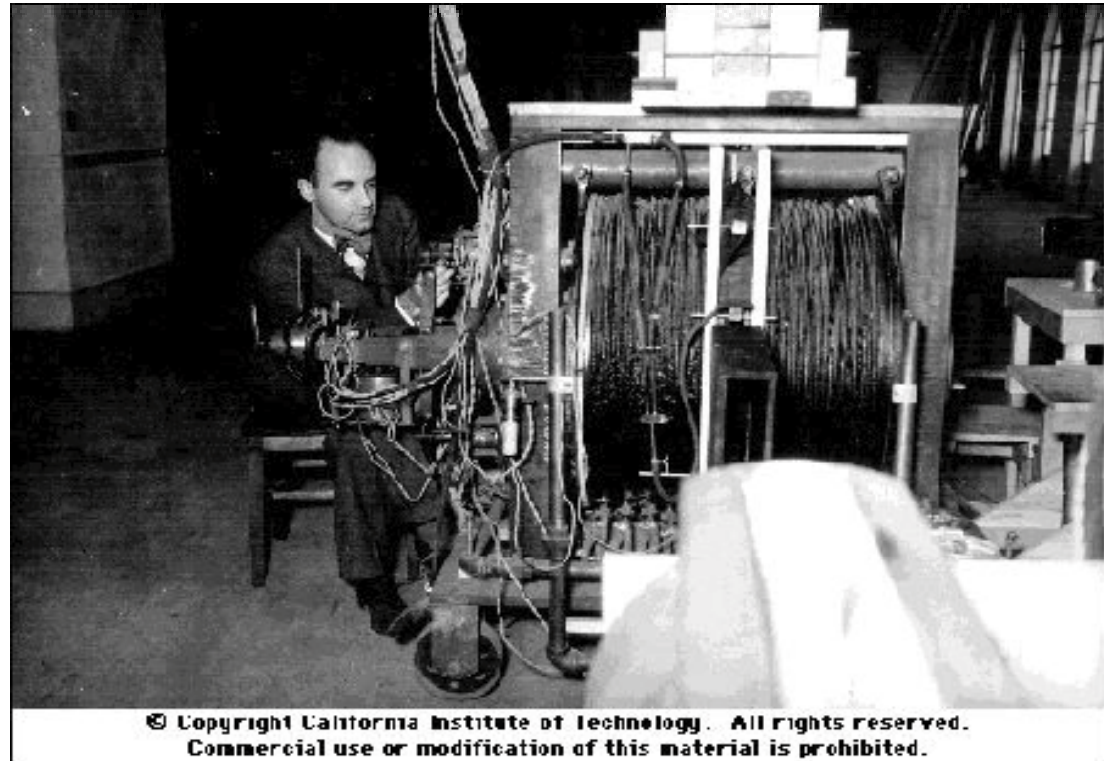
C.D. Anderson, Phys. Rev. 43 (1933) 491

反粒子の発見 (陽電子の発見)

“15 tracks in a Wilson chamber out of 1300 cosmic rays”

“positive particles which could not have a mass as great as that of proton”

“the charge is less than twice and is probably exactly equal to that of the proton”



C. D. Anderson, Phys. Rev. 43 (1933) 491



反粒子の発見（反陽子の発見）

Chamberlain, Segre, Wiegand, and Ypsilantis, Phys. Rev. 100 (1955) 497

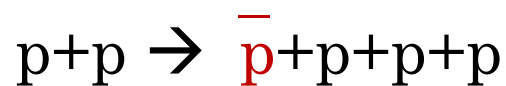
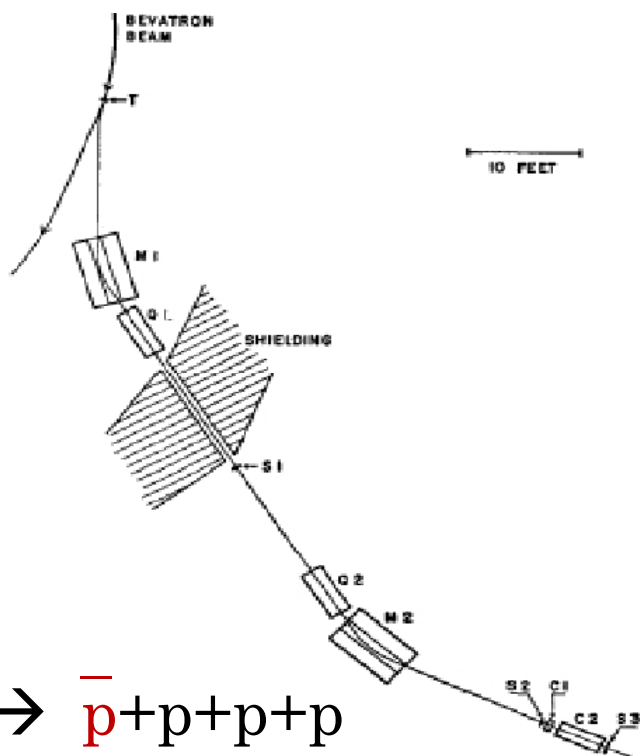


FIG. 1. Diagram of experimental arrangement.
For details see Table I.



I think that this discovery of antimatter was perhaps the biggest jump of all the big jumps in physics in the 20th century.

W. Heisenberg in “The physicist’s conception of Nature”, 1972

反粒子と CPT対称性

- ▶ すべての粒子には「反粒子」が存在します
 - ▶ 反粒子と粒子の質量は同じ
 - ▶ 反粒子と粒子の電荷量は同じ, 符号は反対
 - ▶ 反粒子と粒子のスピンは同じ
 - ▶ 反粒子と粒子の寿命は同じ
 - ▶ 反粒子と粒子の崩壊様式は同じ

だと思われています。

- ▶ このことは「**CPT対称性**」によって保証されています



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



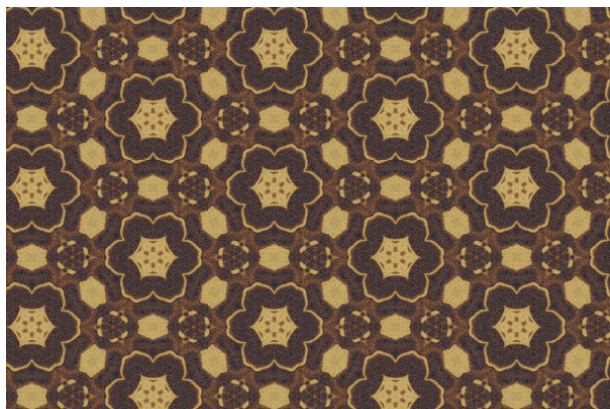
対称性の例

- ▶ 雪の結晶の形は 60度回転させても対称



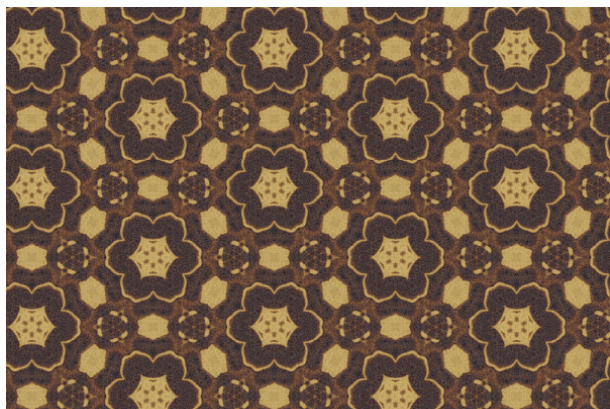
対称性の例

- ▶ 下のタイルの模様は周期的な平行移動に対して対称



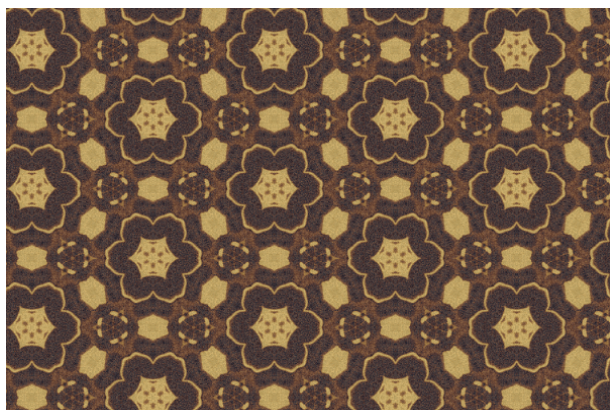
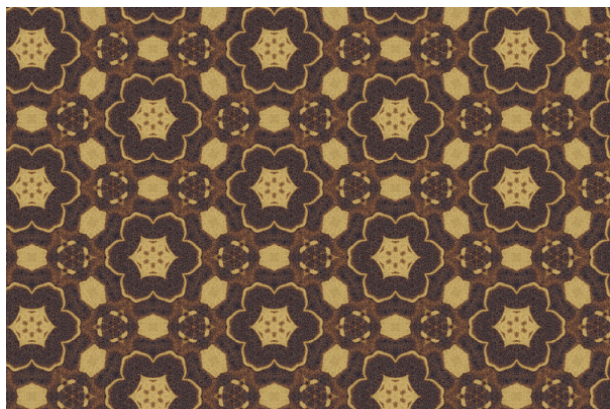
対称性の例

- ▶ 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



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

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

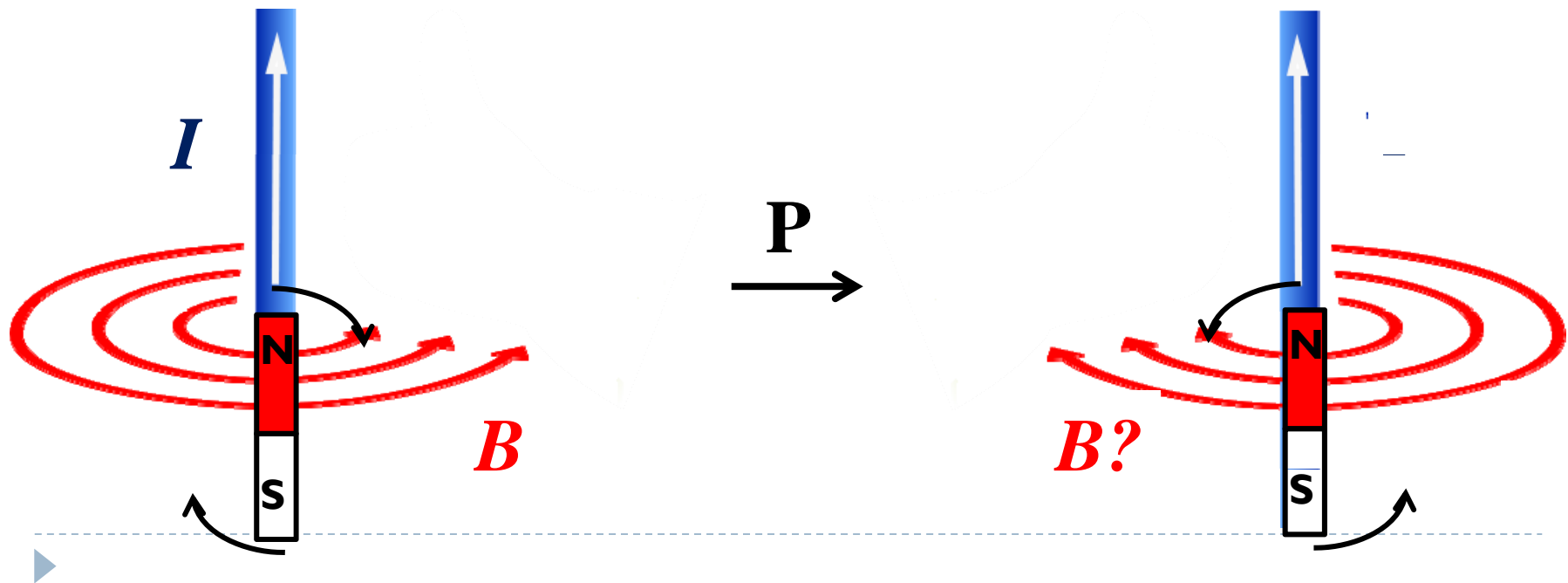
パリティ変換しても成り立っています



パリティ対称性

▶ 「アンペールの右ねじの法則」

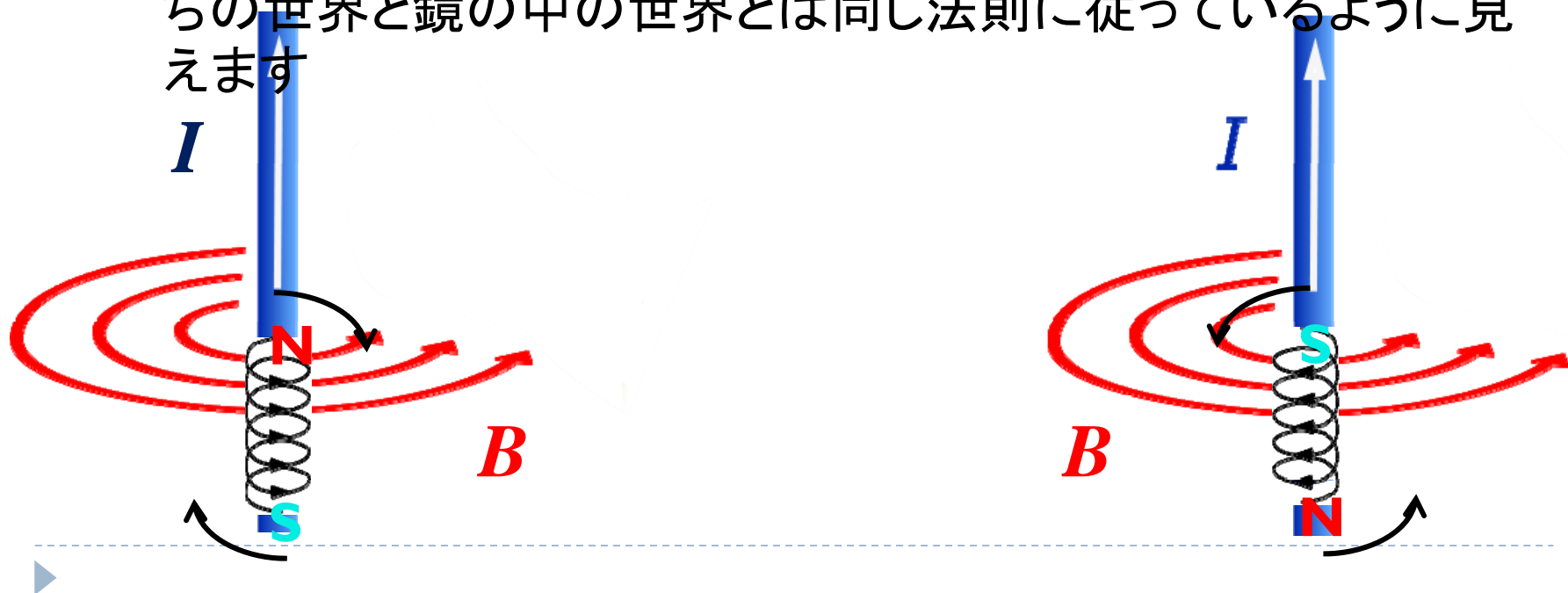
- ▶ 電流を右ねじの進む方向に直進させると、磁場は右ねじの回転方向に生じる
- ▶ 鏡の中の世界では成り立たない？



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。
- ▶ 「本当の」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



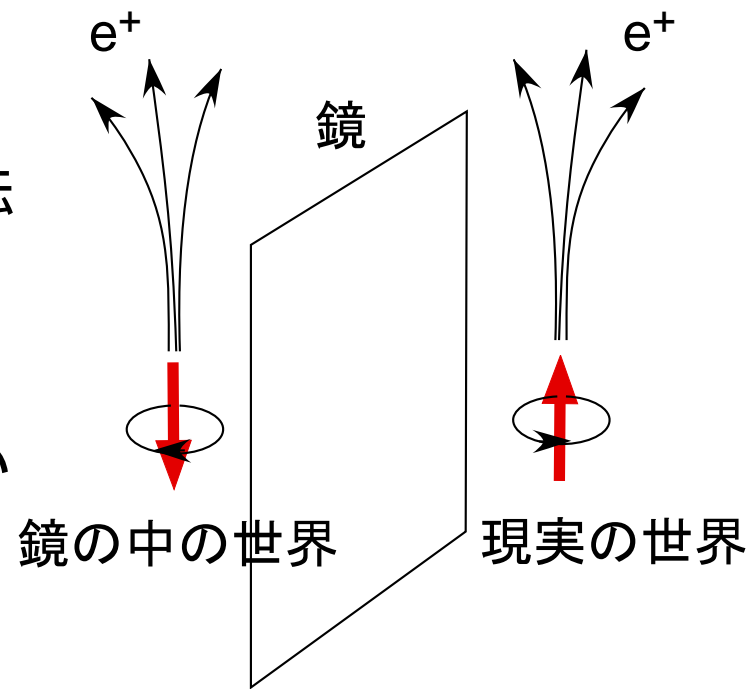
自然法則とパリティ変換

- ▶ 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になります
- ▶ 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。

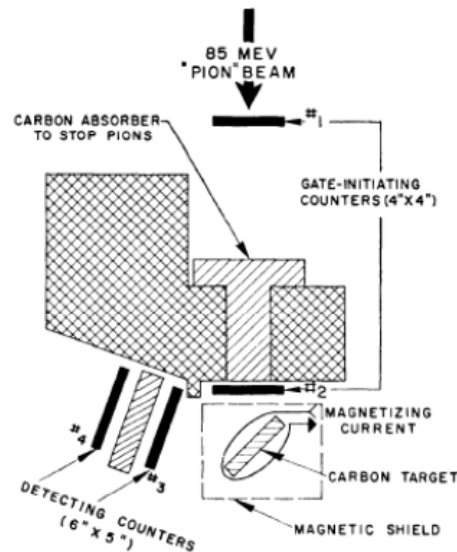


FIG. 1. Experimental arrangement. The magnetizing coil was close wound directly on the carbon to provide a uniform vertical field of 79 gauss per ampere.

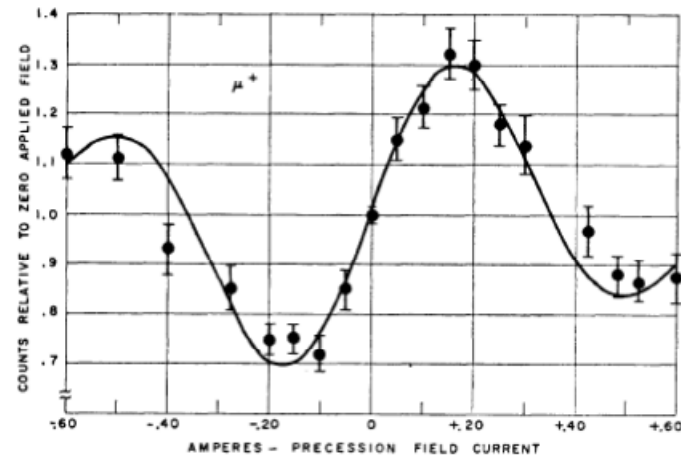
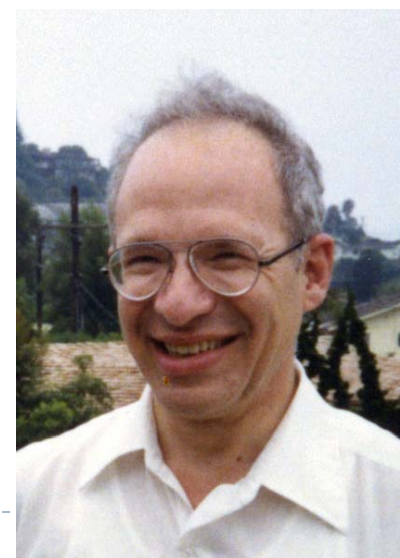
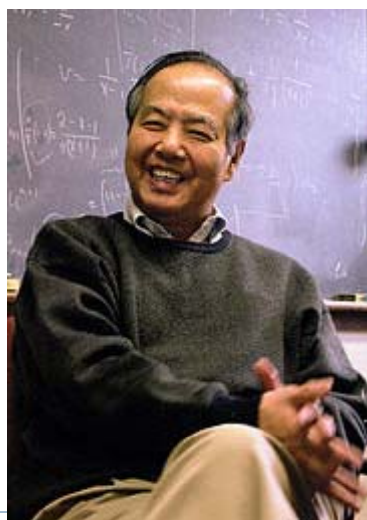


FIG. 2. Variation of gated 3-4 counting rate with magnetizing current. The solid curve is computed from an assumed electron angular distribution $1 - \frac{1}{2} \cos\theta$, with counter and gate-width resolution folded in.

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"



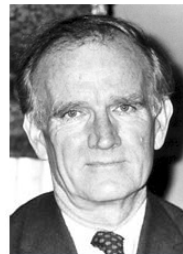
James Watson Cronin

1/2 of the prize

USA

University of Chicago
Chicago, IL, USA

b. 1931



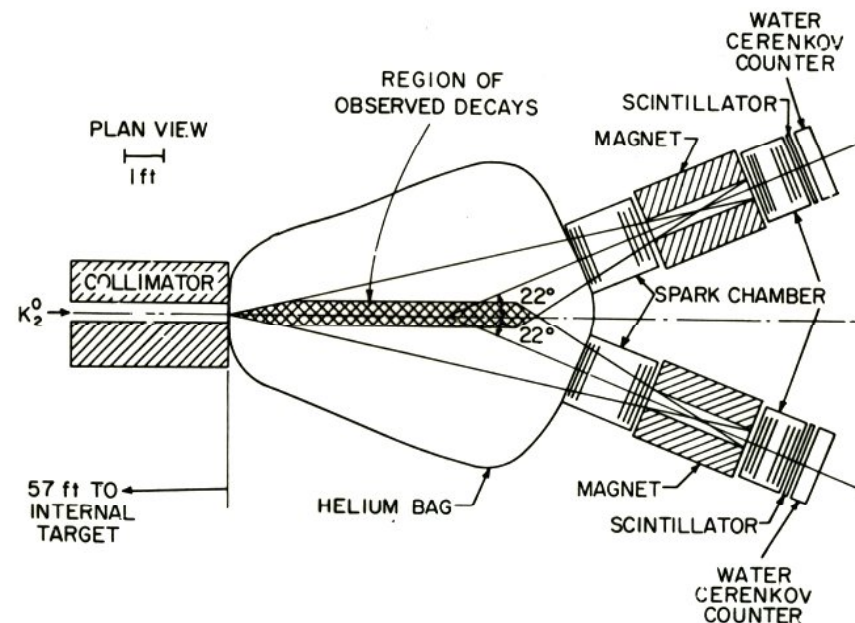
Val Logsdon Fitch

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！



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
 - ▶ 局所性とは「力は遠隔作用しない」ということ
 - ▶ ローレンツ不変性は「4次元空間は対称的」ということ
- ▶ 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
 - ▶ パリティの破れでは Lee, Yang が、CP の破れでは Fitch, Cronin + 小林, 益川がノーベル賞をもらっているぞ。
。。。3匹目のドジョウはいないのかな？



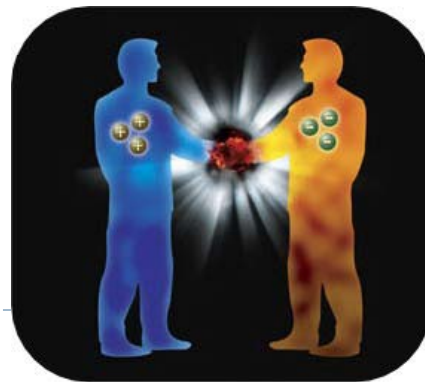
The Big Question: なぜ我々は存在するのか？

- ▶ 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。

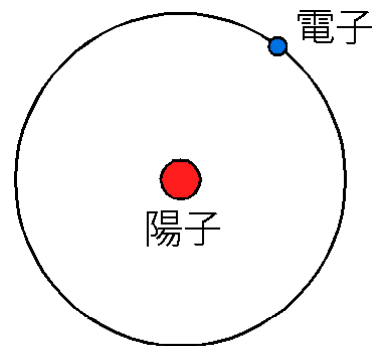
- ▶ この差があるおかげで、星々が誕生し、生命を育む星も生まれました。
- ▶ どうしてこのような差が生まれるのかは、今も物理学最大の謎の一つです。
- ▶ もしかしたら、粒子と反粒子の性質にわずかながらの違いがあるのでしょうか？
- ▶ **粒子と反粒子の性質を比較したい！**



水素と反水素

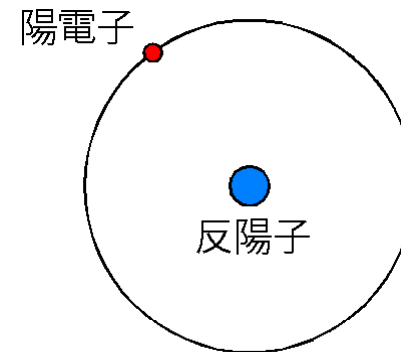
▶ 水素原子

- ▶ 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？



でも、ちょっと待って！

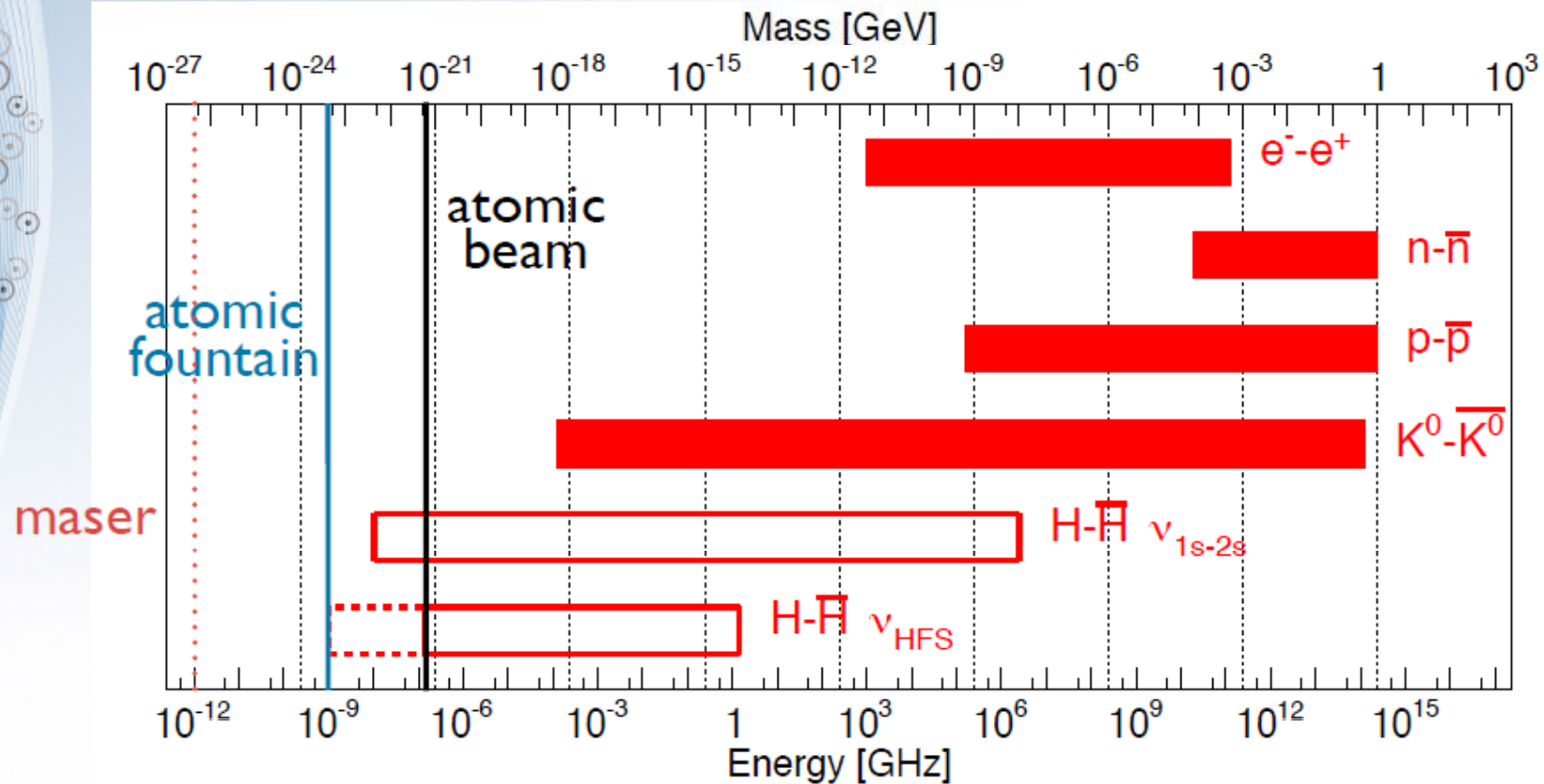
- ▶ 粒子と反粒子を比較すると言っても...
 - ▶ 電子と陽電子
 - ▶ 陽子と反陽子
 - ▶ 中性子と反中性子
 - ▶ ミューオンと反ミューオン(負のミューオンと正のミューオン)
 - ▶ K中間子とその反粒子
 - ▶ 水素と反水素

どれがいいのでしょうか？

- ▶ **全部やる！** (←これはこれで正しい)
 - ▶ パリティの破れにせよ、CPの破れにせよ、どこでどんな形で破れているかは見つかるまで分からなかった。自然はいつも私たちが驚かせてきた。
- ▶ **でも水素と反水素**っていいですよ



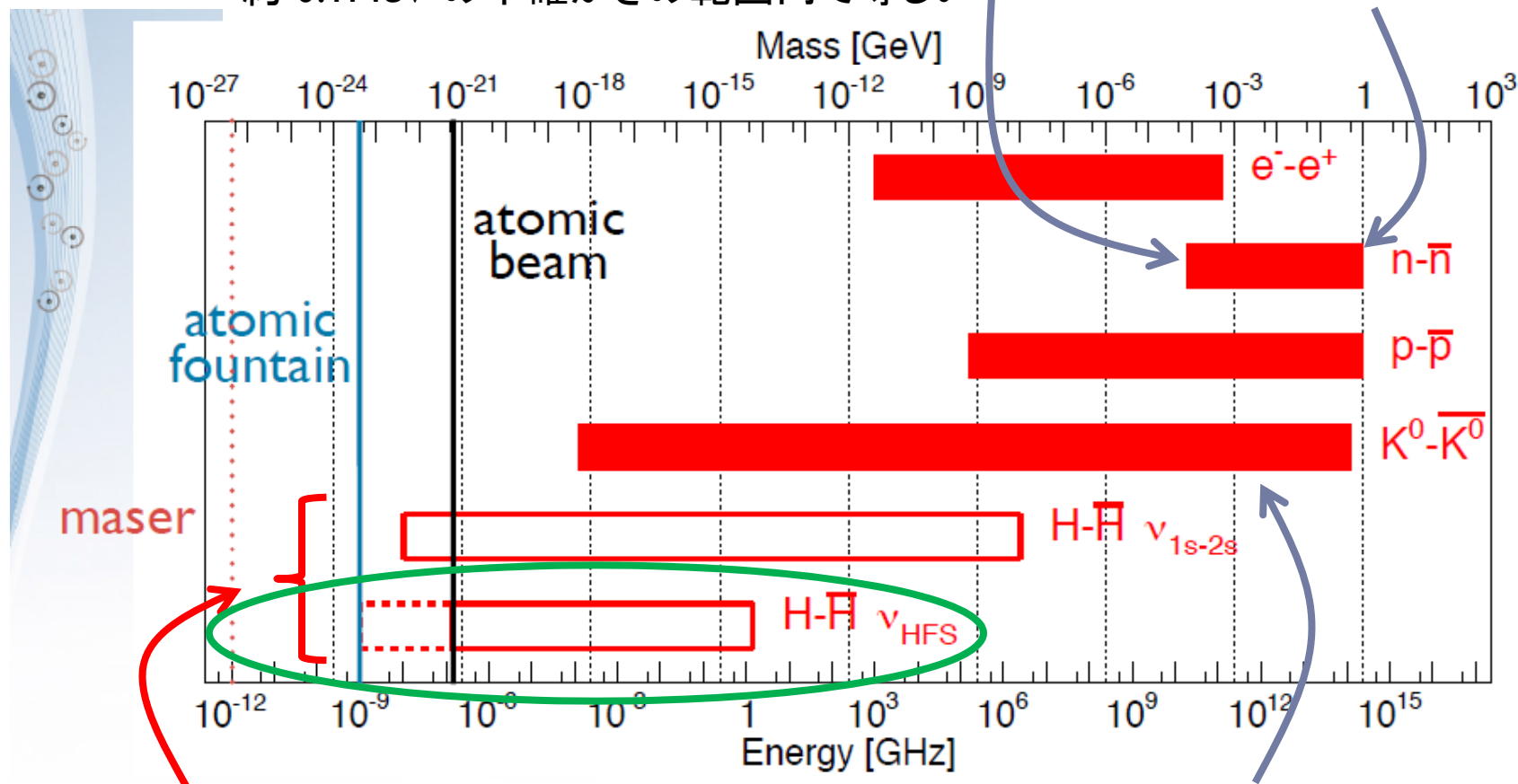
CPT TESTS - RELATIVE & ABSOLUTE PRECISION



- ATOMIC PHYSICS EXPERIMENTS, ESPECIALLY ANTIHYDROGEN OFFER THE MOST SENSITIVE EXPERIMENTAL VERIFICATIONS OF CPT

中性子と反中性子の質量の差は実験によると
 約 0.1 MeV の不確かさの範囲内で等しい

中性子の質量は約 1 GeV

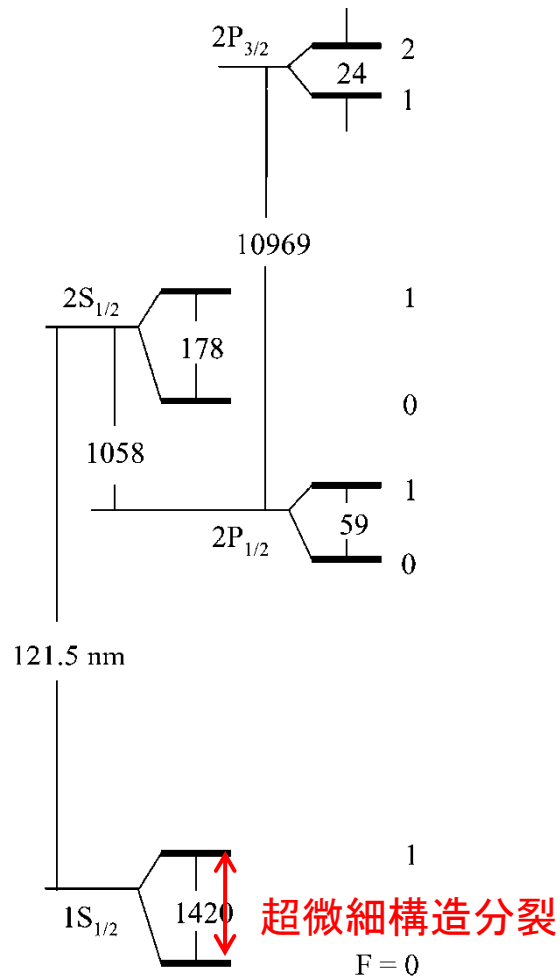


絶対的な CPT の破れの量を探すなら、
 水素原子と反水素原子の分光が有力候補

相対的には K 中間子とその反粒子の質量の
 違いが一番厳しい CPT のテストになっている

▶ 私たちは反水素原子の超微細構造を測定しようという研究をしています

反水素の超微細構造分裂の測定

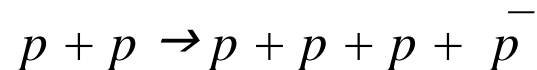


水素原子のエネルギー準位

- ▶ 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！)
- ▶ 反水素についてはまだ誰も測っていません
これを測ってあげようじゃないですか！

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

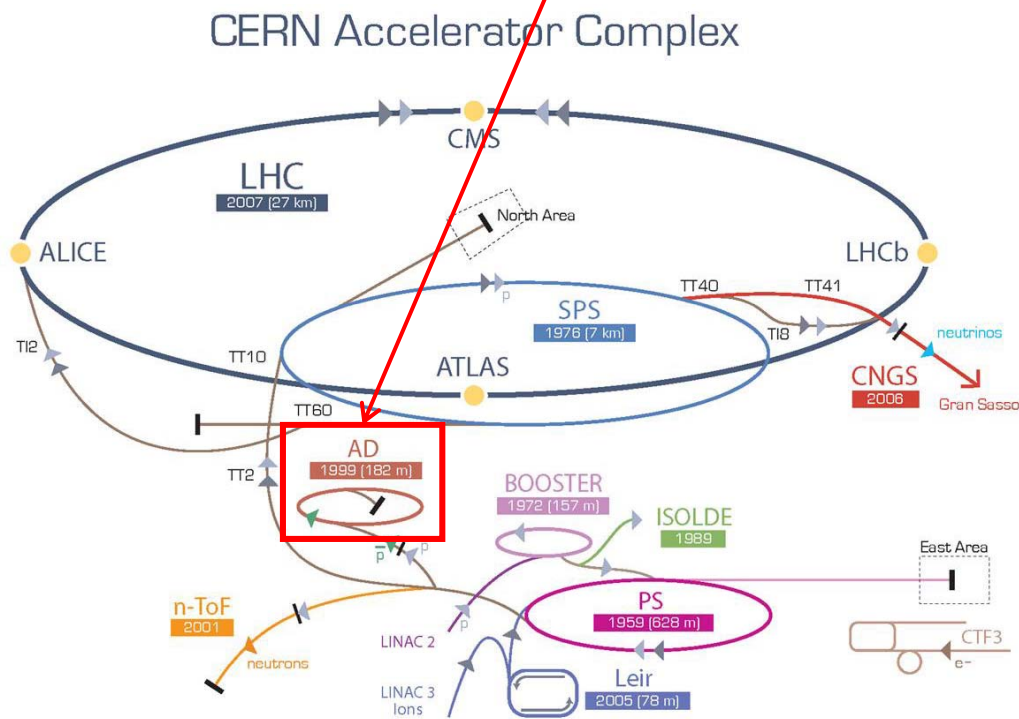


- ▶ この反応を起こすには、陽子を高いエネルギーに加速する必要があります。私たちはCERN(欧州原子核研究機構)の加速器を使って反陽子を作り、研究しています。



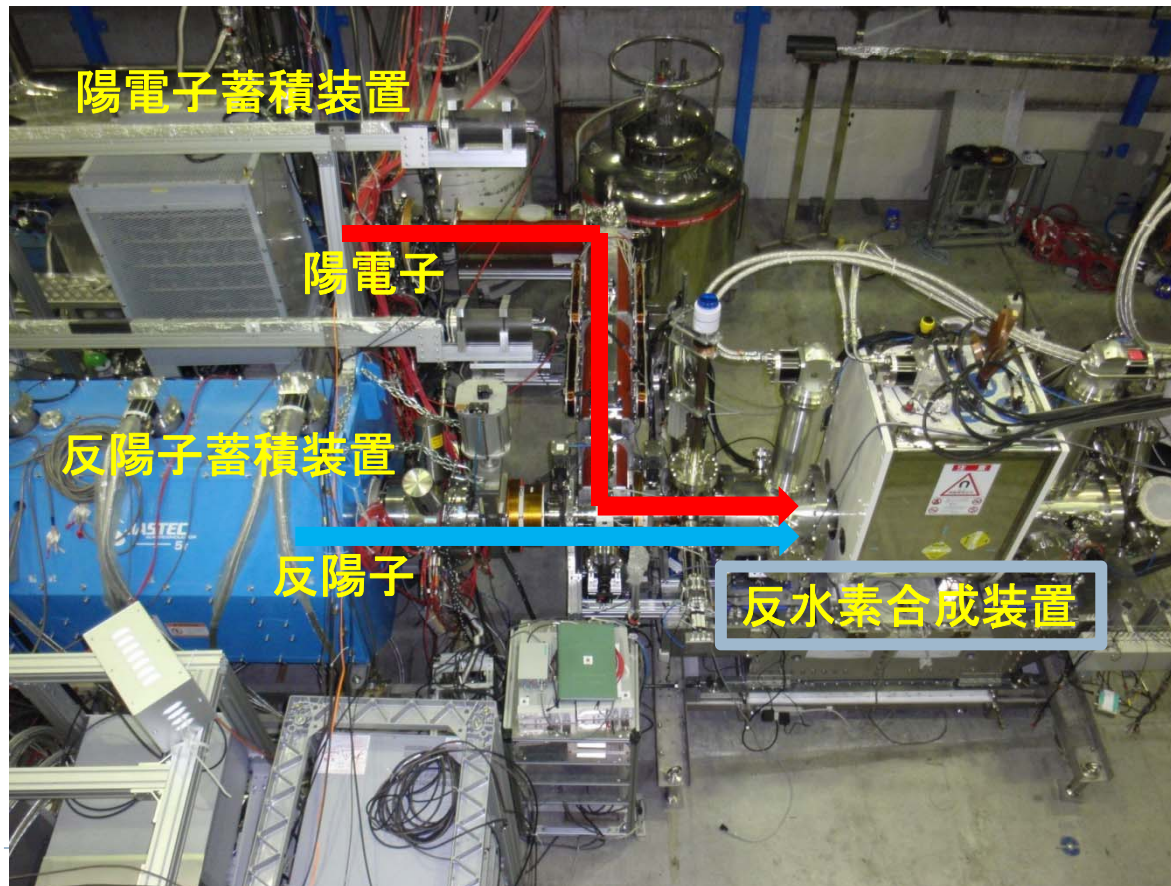
CERN (欧州原子核研究機構)

- ▶ 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...
- ▶ 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

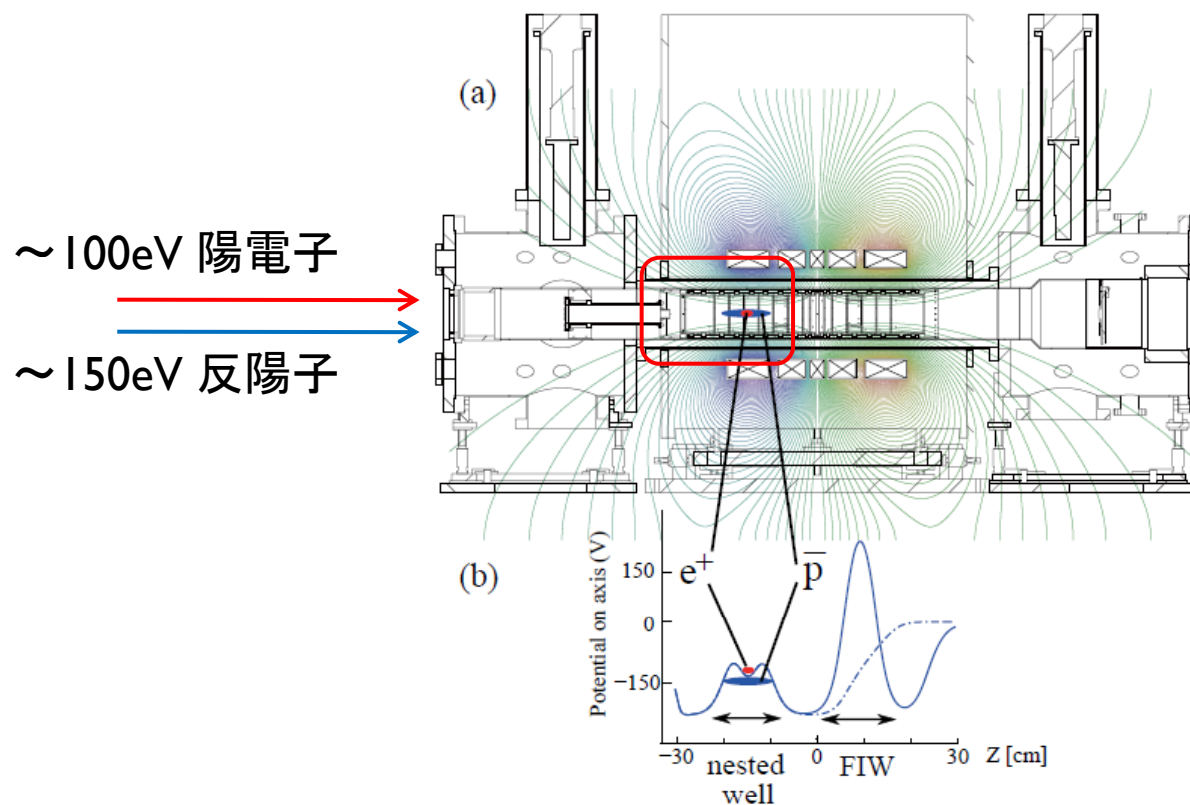
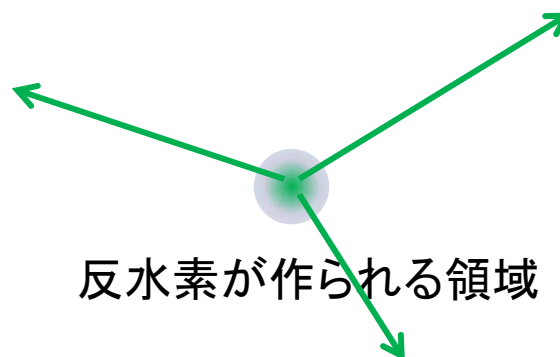


図3 (a) カスプトラップの磁力線分布と (b) 反陽子・陽電子混合時のポテンシャル

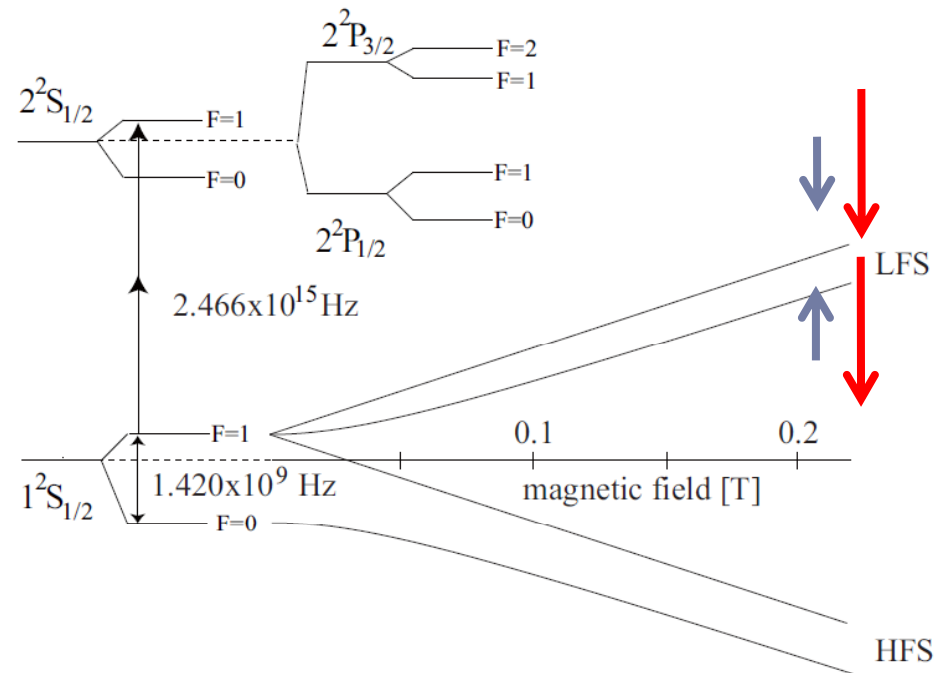
カusp磁場を用いた反水素ビームの生成

- ▶ 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



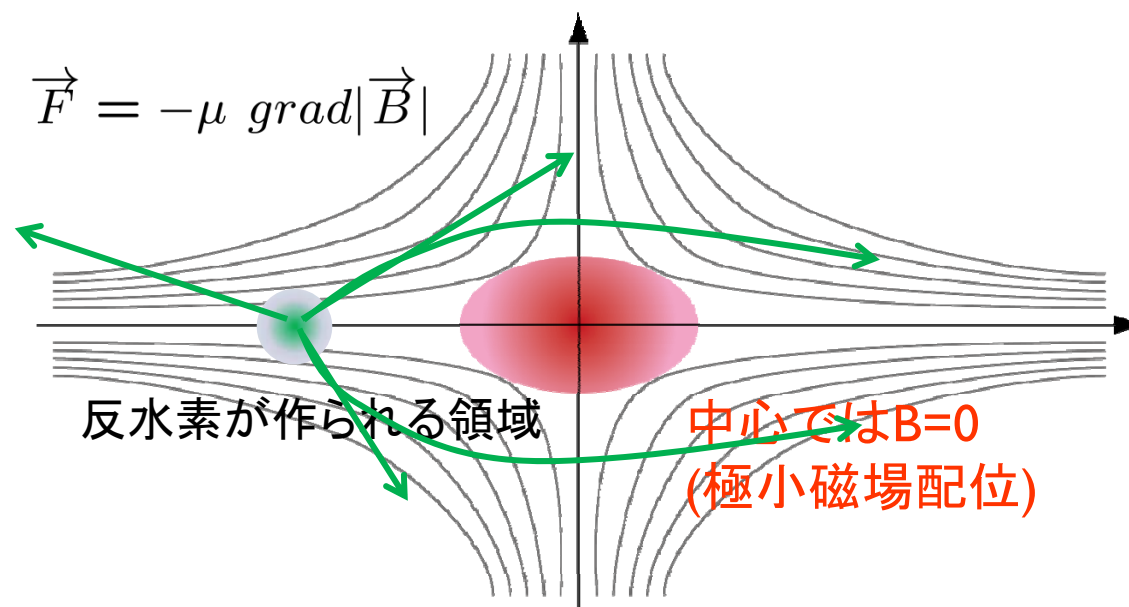
反水素の磁場中でのエネルギー準位

- ▶ 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。



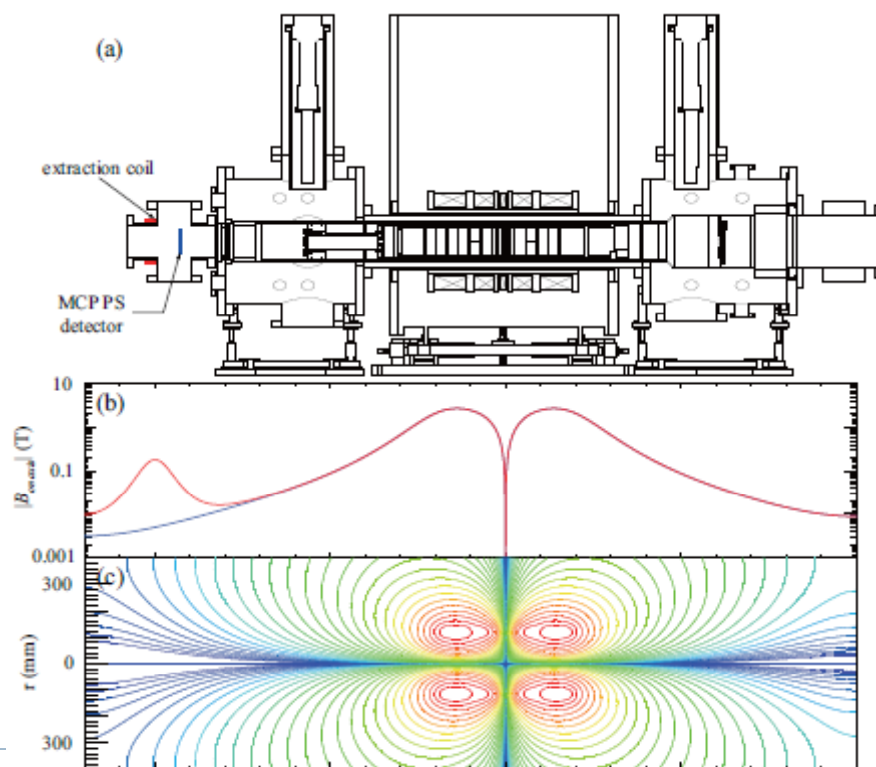
カusp磁場を用いた反水素ビームの生成

- ▶ 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



カスプ磁石

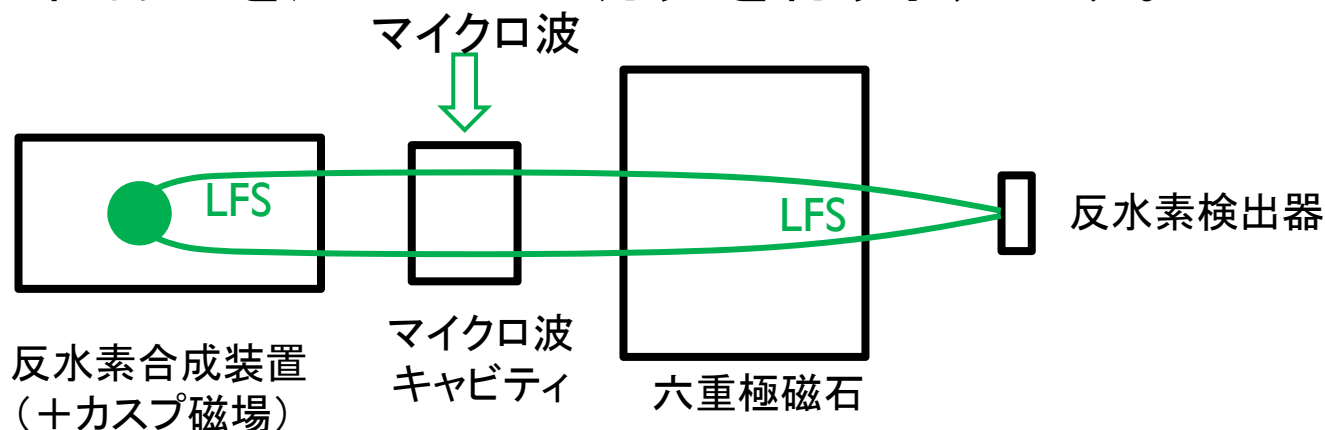
- ▶ 円周形のコイルを二つ向き合わせて、逆向きに電流を流したものの
- ▶ 中心の磁場はゼロになる



実験に使うカスプ磁石
最大磁場 3.4T
最大電流 100A

反水素ビームを用いた HFS分光実験

- ▶ 反水素ビームをカस्प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。

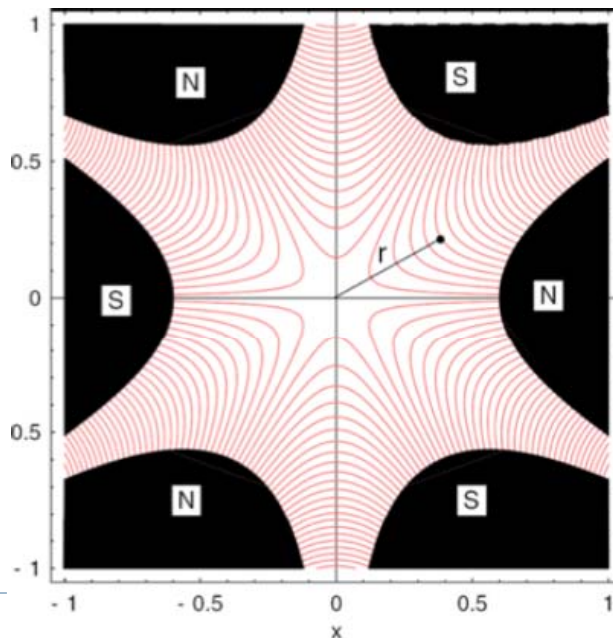


- ▶ カस्प磁場から取り出された反水素ビームはマイクロ波キャビティと六重極磁石を通過して、反水素検出器に到達します。

六重極磁石

- ▶ 磁場が中心で弱く、外側で強くなるように電磁石を配置
- ▶ 磁場の強さ \propto (中心からの距離)² になっている

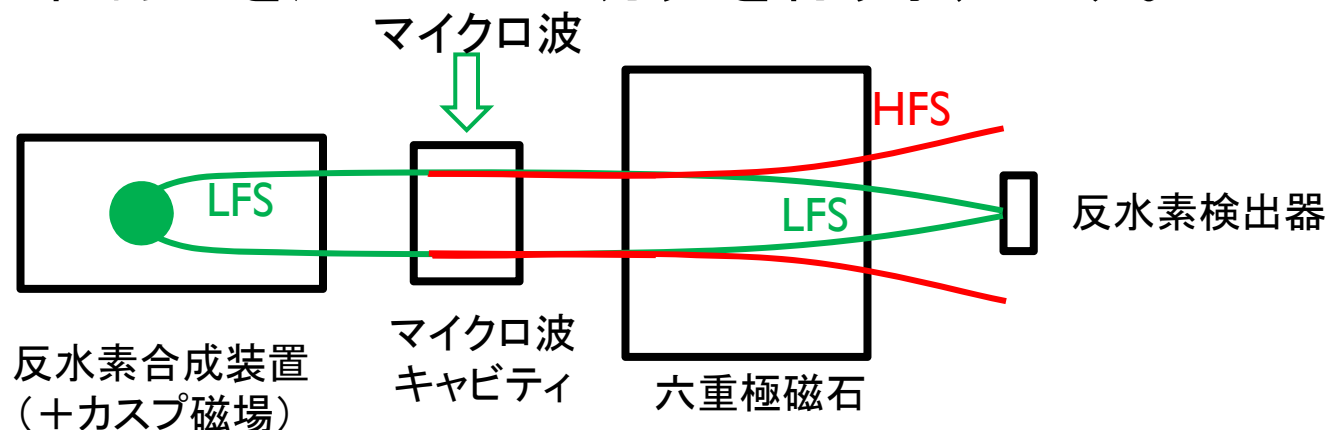
$\vec{F} = -\mu \text{grad}|\vec{B}|$ から、磁気モーメントを持つ粒子(反水素原子)は、中心からの距離に比例した力を受けるのでレンズとして働く



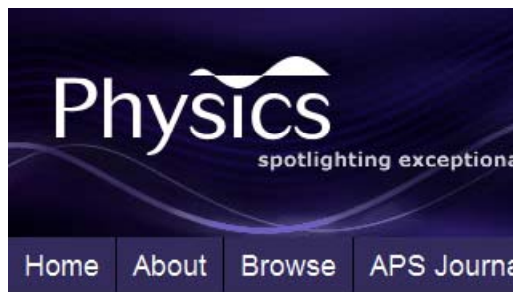
実験に使う六重極磁石
最大磁場 3.5T
最大電流 400A

反水素ビームを用いた HFS 分光実験

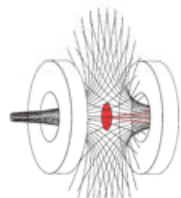
- ▶ 反水素ビームをカस्प磁場から取り出した後、RF キャビティと六重極磁石を用いて HFS 分光を行う予定です。



- ▶ カस्प磁場から取り出された反水素ビームはマイクロ波キャビティと六重極磁石を通して、反水素検出器に到達します。
- ▶ マイクロ波の周波数が、反水素の LFS 状態と HFS 状態のエネルギー差にマッチすると、LFS 状態から HFS 状態に遷移します。
- ▶ HFS 状態の反水素は六重極磁石で発散されて、反水素検出器に届く数が減ります



Synopsis: Progress toward



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

Synthesizing antihydrogen
Y. Enomoto, Kanai, Venturelli, Matsuda, Phys. Rev. Lett. 2010
Publish

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

An alternative to trapping is to actively extract antihydrogen for spectroscopy measurements. This approach also requires 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](#)

Search
Filter by topic

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

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

-
-
-
-
-
- ...

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。
→ Phys. Rev. Lett. 105, 243401 (2010)
- ▶ 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キャビティを導入しました
- ▶ 2012年夏に世界で初めて、反水素をビームとして取り出すことに成功しました
→ Nature Communications, 5, 3089 (2014)
- ▶ 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。
 - ▶ 陽電子の数はさらに5倍以上増加
- ▶ 2014年、つい1週間前にデータを取り終えたところですよ
 - ▶ データはまだ解析中なので、結果はお話できません。ごめんなさい。



まとめ

- ▶ 私たちの周りにある物質を作っている粒子(陽子、中性子、電子)以外にも、いろいろな素粒子が存在します。
- ▶ こうした素粒子を含む原子は普通の原子とは少し違う振る舞いを示しますが、こうした振る舞いをうまく利用すると、いろいろと面白いことができます
 - ▶ 新しい粒子や力を探る(ミュオニウム原子の分光)
 - ▶ CPT対称性の検証(反陽子原子の分光)
- ▶ その他にもたくさんエキゾチックな原子があります
 - ▶ π -中間子が原子核の周りを回る原子
 - ▶ K^- -中間子が原子核の周りを回る原子



おわりに

- ▶ 皆さん方はとても運がいい！
 - ▶ J-PARC はこれから少なくとも十数年間の間、世界トップクラスのミューオン、 π 中間子、K中間子、ニュートリノの研究施設であり続けます
 - ▶ 反陽子研究は CERN の AD で行われていますが、数年後に ELENA という装置が完成し、実験で使える反陽子の強度がさらに10倍以上になると期待されます
- ▶ 面白い物理を探すのは、あなたがたにかかっています！
- ▶ これからの勉強で、面白いテーマが見つけれられることを祈っています！

