

総合科目「量子と光」第9回
標準理論の限界をミュオニウム原子で探る

統合自然科学科／相関基礎科学系 松田 恭幸

自己紹介

- ▶ 1968.4 北海道生まれ
 - ▶ 京都大学理学部 → 京都大学大学院理学研究科で博士号
 - ▶ 1998.4-2008.3 理化学研究所に勤務
 - ▶ 2008.4-現在 東京大学教養学部・総合文化研究科
- ▶ 専門分野の自称は毎年変遷(笑)
 - ▶ 今は「低エネルギー素粒子物理学実験」を名乗っています
 - ▶ 主な活動場所は
 - ▶ CERN(Switzerland)
 - ▶ J-PARC(Ibaraki, Japan)
- ▶ おしゃべり&いい加減な性格です
- ▶ 専門外の話聞くのもするの好きです
- ▶ 居室は 16号館222A号室です



「素粒子物理学実験」って？

- ▶ 素粒子物理学の実験では、一般に高いエネルギーの素粒子をぶつけ、その反応で生じる粒子を調べる、という方法をとります

- ▶ 高いエネルギーの素粒子をぶつけると、

- ▶ より大きな質量をもった未知の粒子を見つけることができます

$$E = mc^2$$

- ▶ 世界をより細かい分解能で(性能のよい顕微鏡で)見ていることになります

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

- ▶ なので、一般に素粒子物理学実験は「高エネルギー実験」とも呼ばれます
-



自己紹介

- ▶ 1968.4 北海道生まれ
 - ▶ 京都大学理学部 → 京都大学大学院理学研究科で博士号
 - ▶ 1998.4-2008.3 理化学研究所に勤務
 - ▶ 2008.4-現在 東京大学教養学部・総合文化研究科
- ▶ 専門分野の自称は毎年変遷(笑)
 - ▶ 今は「**低エネルギー**素粒子物理学実験」を名乗っています
 - ▶ 主な活動場所は
 - ▶ CERN(Switzerland)
 - ▶ J-PARC(Ibaraki, Japan)
- ▶ おしゃべり&いい加減な性格です
- ▶ 専門外の話聞くのもするのも好きです
- ▶ 居室は 16号館222A号室です



「低エネルギー素粒子物理学実験」って？

- ▶ 私たちの研究室では、逆に、比較的低いエネルギーの加速器で作られる素粒子を含んだ原子を使って、素粒子物理学の謎に挑もうとしています
- ▶ 普通の原子ではなく、加速器で作られる粒子を含んだ原子、という意味で、こうした原子を「エキゾチック原子」と呼びます
- ▶ 今週と来週の2回で、こうしたエキゾチック原子のお話をしようと思います。



この講義の構成

- ▶ 1. 素粒子と、その作り方(加速器のお話)
- ▶ 2. 標準理論の限界をミュオニウム原子で探る
- ▶ 3. 宇宙進化の謎を反水素原子で探る



この講義の構成

- ▶ 1. 素粒子と、その作り方(加速器のお話)
- ▶ 2. 標準理論の限界をミュオニウム原子で探る
- ▶ 3. 宇宙進化の謎を反水素原子で探る



私たちの世界を作っているもの

- ▶ 私たちの世界の物質はクォークとレプトンと呼ばれる素粒子からできています。
 - ▶ 陽子は u クォーク2つと d クォーク1つからできています

$$\begin{array}{l} \text{クォーク} \\ \text{レプトン} \end{array} \begin{pmatrix} \boxed{u} & \boxed{d} & c & t \\ & s & & b \\ e^- & \mu^- & \tau^- \\ \nu_e & \nu_\mu & \nu_\tau \end{pmatrix}$$



私たちの世界を作っているもの

- ▶ 私たちの世界の物質はクォークとレプトンと呼ばれる素粒子からできています。
 - ▶ 陽子は u クォーク2つと d クォーク1つからできています
 - ▶ 中性子は u クォーク1つと d クォーク2つからできています

$$\begin{array}{l} \text{クォーク} \\ \text{レプトン} \end{array} \begin{pmatrix} u & c & t \\ d \times 2 & s & b \\ e^- & \mu^- & \tau^- \\ \nu_e & \nu_\mu & \nu_\tau \end{pmatrix}$$



私たちの世界を作っているもの

- ▶ 私たちの世界の物質はクォークとレプトンと呼ばれる素粒子からできています。
 - ▶ 陽子は u クォーク2つと d クォーク1つからできています
 - ▶ 中性子は u クォーク1つと d クォーク2つからできています
 - ▶ 原子は、陽子と中性子が結びついた原子核と電子からできています
- ▶ 私たちの身の回りの物質は全て、 u と d と e^- からできています。

$$\begin{array}{l} \text{クォーク} \\ \text{レプトン} \end{array} \begin{pmatrix} u & c & t \\ d & s & b \\ e^- & \mu^- & \tau^- \\ \nu_e & \nu_\mu & \nu_\tau \end{pmatrix}$$

素粒子はまだ他にも...

- ▶ でも、素粒子は他にもまだまだあります。

$$\text{クォーク} \begin{pmatrix} u & c & t \\ d & s & b \end{pmatrix}$$

$$\text{レプトン} \begin{pmatrix} e^- & \mu^- & \tau^- \\ \nu_e & \nu_\mu & \nu_\tau \end{pmatrix}$$

$$\text{反クォーク} \begin{pmatrix} \bar{u} & \bar{c} & \bar{t} \\ \bar{d} & \bar{s} & \bar{b} \end{pmatrix}$$

$$\text{反レプトン} \begin{pmatrix} e^+ & \mu^+ & \tau^+ \\ \bar{\nu}_e & \bar{\nu}_\mu & \bar{\nu}_\tau \end{pmatrix}$$



素粒子はまだ他にも...

- ▶ **でも、素粒子は他にもまだまだあります。**
- ▶ 陽電子: 電子の反粒子

$$\text{クォーク} \begin{pmatrix} u & c & t \\ d & s & b \end{pmatrix}$$

$$\text{レプトン} \begin{pmatrix} e^- & \mu^- & \tau^- \\ \nu_e & \nu_\mu & \nu_\tau \end{pmatrix}$$

$$\text{反クォーク} \begin{pmatrix} \bar{u} & \bar{c} & \bar{t} \\ \bar{d} & \bar{s} & \bar{b} \end{pmatrix}$$

$$\text{反レプトン} \begin{pmatrix} e^+ & \mu^+ & \tau^+ \\ \bar{\nu}_e & \bar{\nu}_\mu & \bar{\nu}_\tau \end{pmatrix}$$



素粒子はまだ他にも...

▶ **でも、素粒子は他にもまだまだあります。**

▶ 陽電子: 電子の反粒子

▶ ミュオン: 「第2世代」の電子の仲間。
負の電荷をもつミュオンと正の電荷をもつミュオンがある

$$\text{クォーク} \begin{pmatrix} u & c & t \\ d & s & b \end{pmatrix}$$

$$\text{レプトン} \begin{pmatrix} e^- & \mu^- & \tau^- \\ \nu_e & \nu_\mu & \nu_\tau \end{pmatrix}$$

$$\text{反クォーク} \begin{pmatrix} \bar{u} & \bar{c} & \bar{t} \\ \bar{d} & \bar{s} & \bar{b} \end{pmatrix}$$

$$\text{反レプトン} \begin{pmatrix} e^+ & \mu^+ & \tau^+ \\ \bar{\nu}_e & \bar{\nu}_\mu & \bar{\nu}_\tau \end{pmatrix}$$



素粒子はまだ他にも...

▶ **でも、素粒子は他にもまだまだあります。**

▶ 陽電子: 電子の反粒子

▶ ミュオン: 「第2世代」の電子の仲間。
負の電荷をもつミュオンと正の電荷をもつミュオンがある

▶ 反陽子: 陽子の反粒子。 \bar{u} クォーク2つと、 \bar{d} クォーク1つでできている。

クォーク $\begin{pmatrix} u & c & t \\ d & s & b \end{pmatrix}$

レプトン $\begin{pmatrix} e^- & \mu^- & \tau^- \\ \nu_e & \nu_\mu & \nu_\tau \end{pmatrix}$

反クォーク $\begin{pmatrix} \bar{u} & \bar{c} & \bar{t} \\ \bar{d} & \bar{s} & \bar{b} \end{pmatrix}$ x2

反レプトン $\begin{pmatrix} e^+ & \mu^+ & \tau^+ \\ \bar{\nu}_e & \bar{\nu}_\mu & \bar{\nu}_\tau \end{pmatrix}$



素粒子はまだ他にも...

- ▶ **でも、素粒子は他にもまだまだあります。**

- ▶ 陽電子: 電子の反粒子

- ▶ ミュオン: 「第2世代」の電子の仲間。負の電荷をもつミュオンと正の電荷をもつミュオンがある

- ▶ 反陽子: 陽子の反粒子。 \bar{u} クォーク2つと、 \bar{d} クォーク1つでできている。

- ▶ 私たちの研究室では、**ミュオン**と**反陽子**を中心に、さまざまな実験を行っています。

クォーク $\begin{pmatrix} u & c & t \\ d & s & b \end{pmatrix}$

レプトン $\begin{pmatrix} e^- & \mu^- & \tau^- \\ \nu_e & \nu_\mu & \nu_\tau \end{pmatrix}$

反クォーク $\begin{pmatrix} \bar{u} & \bar{c} & \bar{t} \\ \bar{d} & \bar{s} & \bar{b} \end{pmatrix}$

反レプトン $\begin{pmatrix} e^+ & \mu^+ & \tau^+ \\ \bar{\nu}_e & \bar{\nu}_\mu & \bar{\nu}_\tau \end{pmatrix}$

でも、どうやって作るの？

- ▶ 有名なアインシュタインの式

$$E = mc^2$$

この式は質量がエネルギーに、エネルギーが質量に変わりうることを表しています。

- ▶ つまり、十分に高いエネルギーを与えれば、何もないところから物質を作り出すことができますということです。こうして、通常私たちの周りには存在しないミュオンや反陽子などの粒子を作ることができます。

| 粒子の名前 | 質量 |
|---|--|
| 電子、陽電子 | 0.511 MeV/c ² |
| ミュオン(μ ⁺ , μ ⁻) | 105.6 MeV/c ² |
| π 中間子(π ⁺ , π ⁻) | 139.6 MeV/c ² |
| K 中間子(K ⁺ , K ⁻) | 493.7 MeV/c ² |
| 陽子、反陽子 | 938.3 MeV/c ² |
| Higgs 粒子 | 125x10 ³ MeV/c ² |

でも、どうやって作るの？

- ▶ 有名なアインシュタインの式

$$E = mc^2$$

この式は質量がエネルギーに、エネルギーが質量に変わりうることを表しています。

- ▶ つまり、十分に高いエネルギーを与えれば、何もないところから物質を作り出すことができるということです。こうして、通常私たちの周りには存在しないミュオンや反陽子などの粒子を作ることができます。

- ▶ 例えば、ミュオンは $p + p \rightarrow p + n + \pi^+$ というような反応でまず π^+ 中間子を作り、その崩壊 $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$ によって作られます。このためには陽子(p)に十分に高いエネルギーを与える必要があります。ではどれ位のエネルギーを与えればよいのでしょうか？
-



特殊相対論

- ▶ **アインシュタインの特殊相対論は**
 - ▶ どんな慣性系からみても物理法則は同じでなくてはならない
 - ▶ どんな慣性系からみても真空中の光の速度は一定でなくてはならない

ということを指導原理にして作られました

- ▶ **ここでは、ミュオンの作り方を理解するのに必要最小限の公式を学びます**



簡単な相対論的力学：速度の合成則

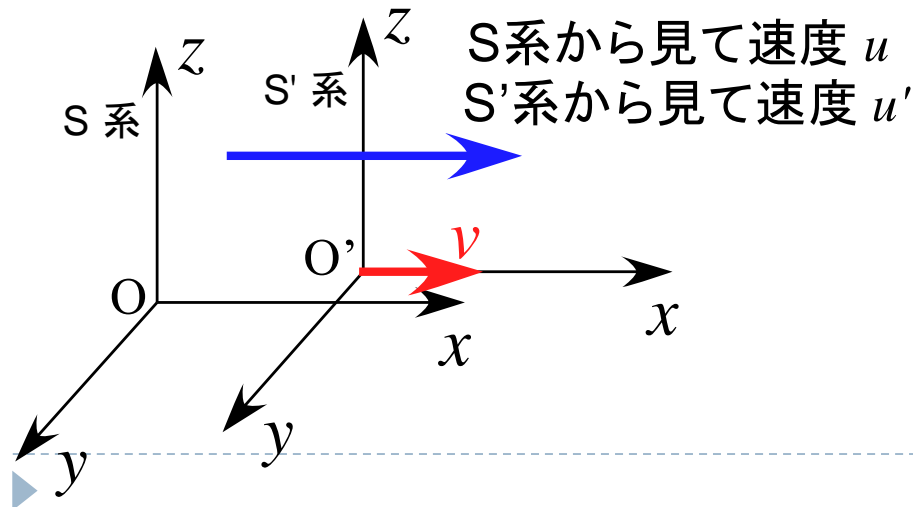
速度の合成則

- ▶ 慣性系 S に対して、一定速度 v で動いている慣性系 S' があるとします
- ▶ S 系で見たある粒子の速度を u 、 S' 系で見た粒子の速度を u' とすると...

ニュートン力学での速度の合成則は $u = u' + v$ です。

でも、これはさきほどの特殊相対論の原理と矛盾します。

例えば $u' = c$ ならば、 $u = c + v$ になってしまうからです。慣性系 S で見た光速 u と、慣性系 S' で見た光速 u' が違ってきますね！



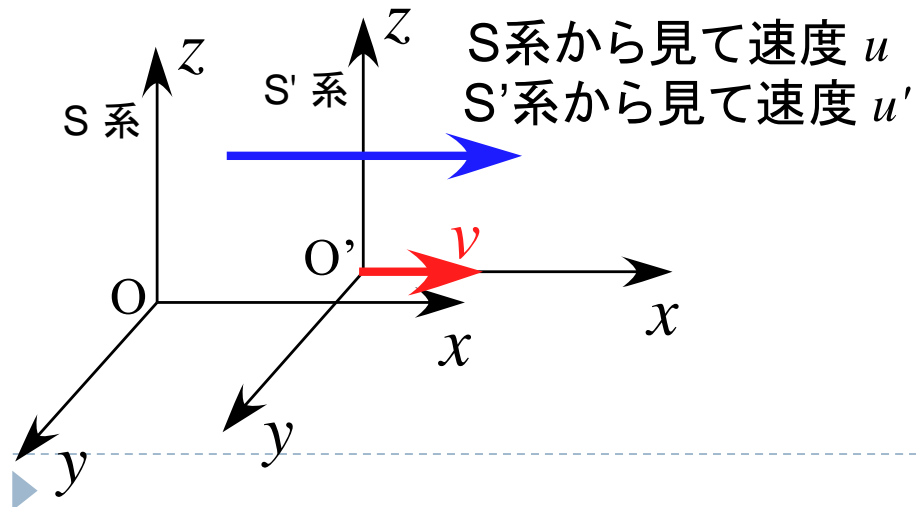
簡単な相対論的力学：速度の合成則

速度の合成則

- ▶ 慣性系 S に対して、一定速度 v で動いている慣性系 S' があるとします
- ▶ S 系で見たある粒子の速度を u 、 S' 系で見た粒子の速度を u' とすると...

特殊相対論での速度の合成則は
$$u = \frac{u' + v}{1 + \frac{u' v}{c c}}$$
 になります。

$u' = c$ のとき、 $u = (c + v) / (1 + v/c) = c$ になってますね！



簡単な相対論的力学：質量の増加

質量の増加

静止しているときに質量 m_0 の粒子が一定速度 v で動いているとき、その粒子の質量 m は、

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - v^2 / c^2}} (> m_0)$$

となります



簡単な相対論的力学：運動量

運動量は

$$p = mv = \frac{m_0 v}{\sqrt{1 - v^2 / c^2}}$$

と定義されます。



簡単な相対論的力学：エネルギー

全エネルギーは

$$E = \sqrt{(m_0 c^2)^2 + (pc)^2} = mc^2$$

になります。

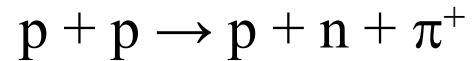
- ▶ 運動エネルギーは
(全エネルギー) - (静止しているときの全エネルギー)
で定義されます。

これだけ覚えておけば、 $p + p \rightarrow p + n + \pi^+$ 反応を起こすために必要な陽子のエネルギーを計算できます。



π 中間子の生成 (1)

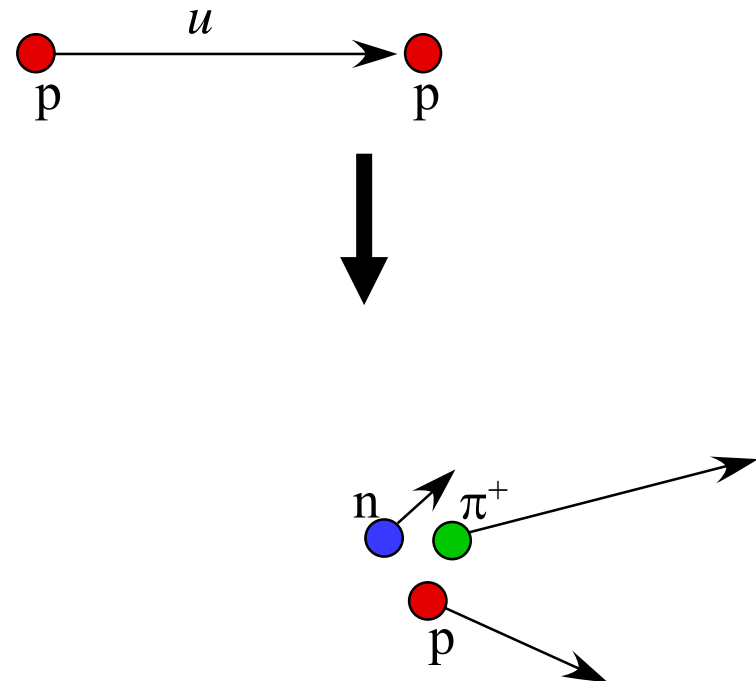
- ▶ 加速した陽子を止まっている陽子にぶつけて、



という反応をおこすことを考えましょう。

この反応では陽子の運動エネルギーが π 中間子を生ま出しています。

この反応を起こすためには陽子をどれくらいまで加速しなくてはいいかないでしょう？



π 中間子の生成 (2)

重心系でまず考えます

反応前の全エネルギーは速度 v で運動している二つの陽子のエネルギーの和ですから、

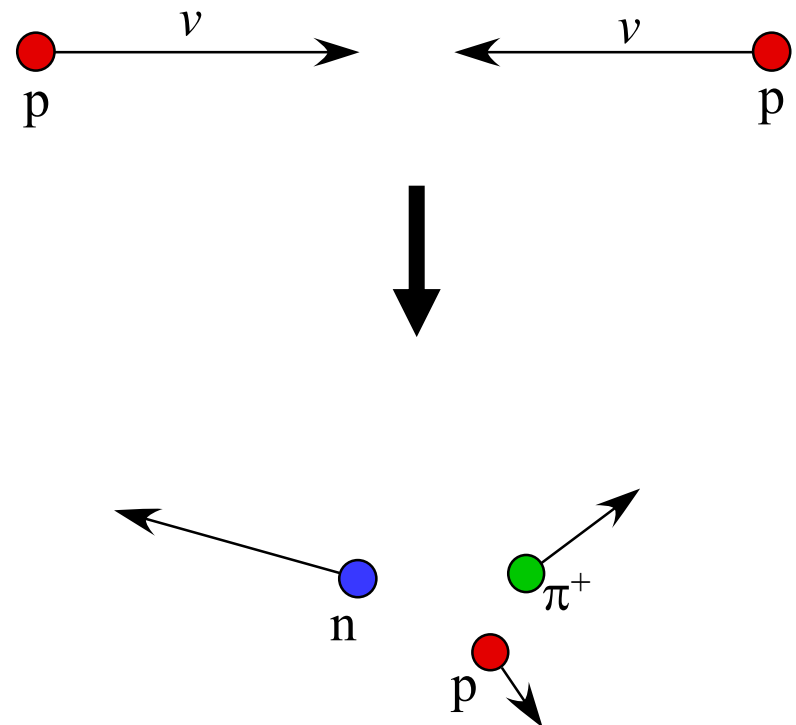
$$E = 2 \times mc^2 = 2 \times m_N c^2 / \sqrt{1 - v^2 / c^2}$$

もともとの運動エネルギーは反応によってπ中間子を作るのにぎりぎりの量しかなかった、とすると、反応後の全ての粒子は止まっているはずですが、

そのときの全エネルギーは、

$$E = (2m_N + m_\pi)c^2$$

ここで、 m_N は陽子と中性子の質量、 m_π はπ中間子の質量とします



π 中間子の生成 (3)

衝突前後のエネルギー保存から

$$2m_N c^2 / \sqrt{1 - v^2 / c^2} = (2m_N + m_\pi) c^2$$

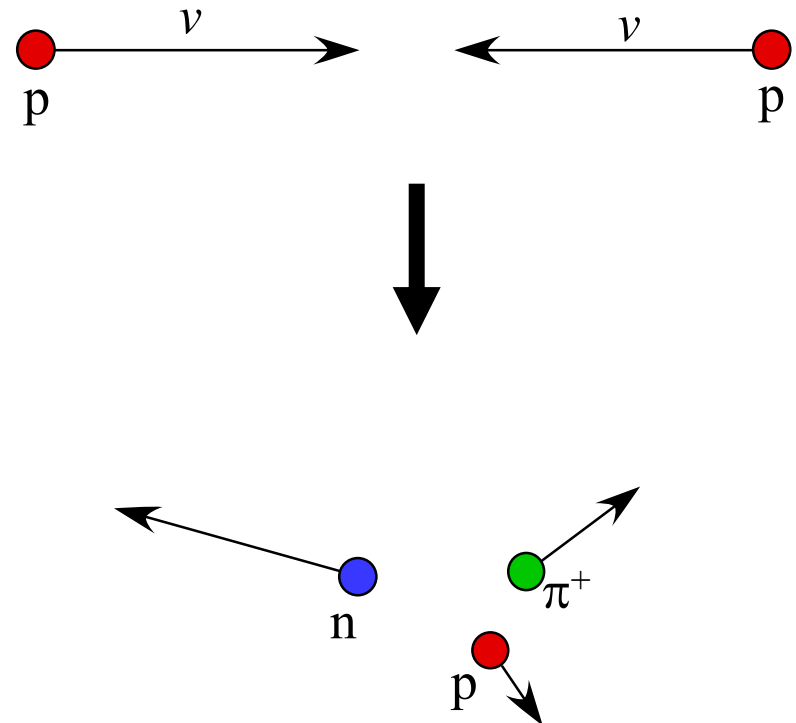
$$1 / \sqrt{1 - v^2 / c^2} = (1 + m_\pi / 2m_N)$$

$m_N \sim 940 \text{ MeV}/c^2$, $m_\pi \sim 140 \text{ MeV}/c^2$ より

$$1 - v^2 / c^2 = 1 / (1 + m_\pi / 2m_N)^2 \sim 0.866$$

$$v / c \sim \sqrt{1 - 0.866} \sim 0.37$$

つまり、 π^+ 中間子を作るには、重心系で少なくとも $0.37c$ の速度で運動している陽子同士をぶつける必要があるということになります



でも、どうやって作るの？（再掲）

- ▶ 有名なアインシュタインの式

$$E = mc^2$$

この式は質量がエネルギーに、エネルギーが質量に変わりうることを表しています。

- ▶ つまり、十分に高いエネルギーを与えれば、何もないところから物質を作り出すことができるということです。こうして、通常私たちの周りには存在しないミュオンや反陽子などの粒子を作ることができます。

| 粒子の名前 | 質量 |
|---|--|
| 電子、陽電子 | 0.511 MeV/c ² |
| ミュオン(μ ⁺ , μ ⁻) | 105.6 MeV/c ² |
| π 中間子(π ⁺ , π ⁻) | 139.6 MeV/c ² |
| K 中間子(K ⁺ , K ⁻) | 493.7 MeV/c ² |
| 陽子、反陽子 | 938.3 MeV/c ² |
| Higgs 粒子 | 125x10 ³ MeV/c ² |

π 中間子の生成 (3)

衝突前後のエネルギー保存から

$$2m_N c^2 / \sqrt{1 - v^2 / c^2} = (2m_N + m_\pi) c^2$$

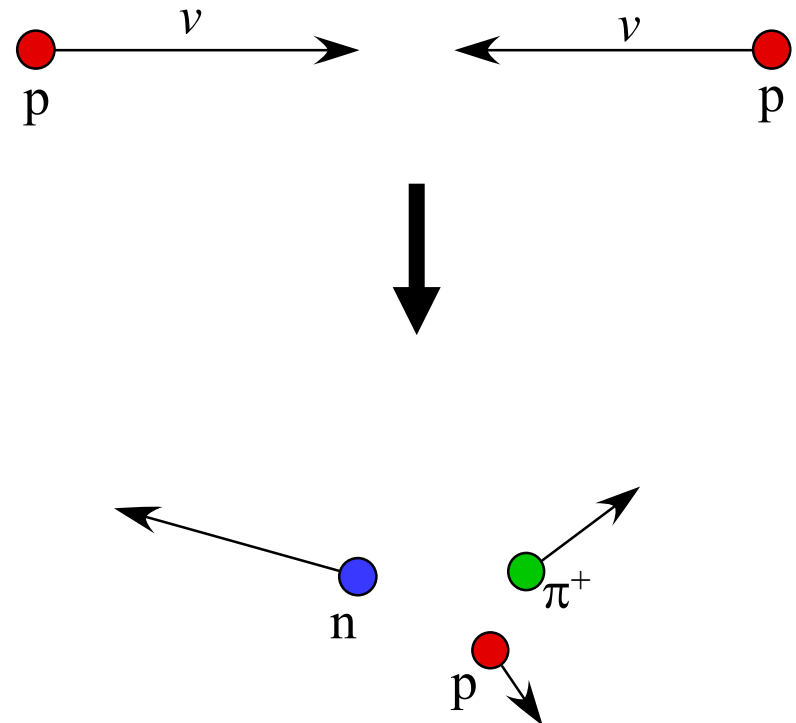
$$1 / \sqrt{1 - v^2 / c^2} = (1 + m_\pi / 2m_N)$$

$m_N \sim 940 \text{ MeV}/c^2$, $m_\pi \sim 140 \text{ MeV}/c^2$ より

$$1 - v^2 / c^2 = 1 / (1 + m_\pi / 2m_N)^2 \sim 0.866$$

$$v / c \sim \sqrt{1 - 0.866} \sim 0.37$$

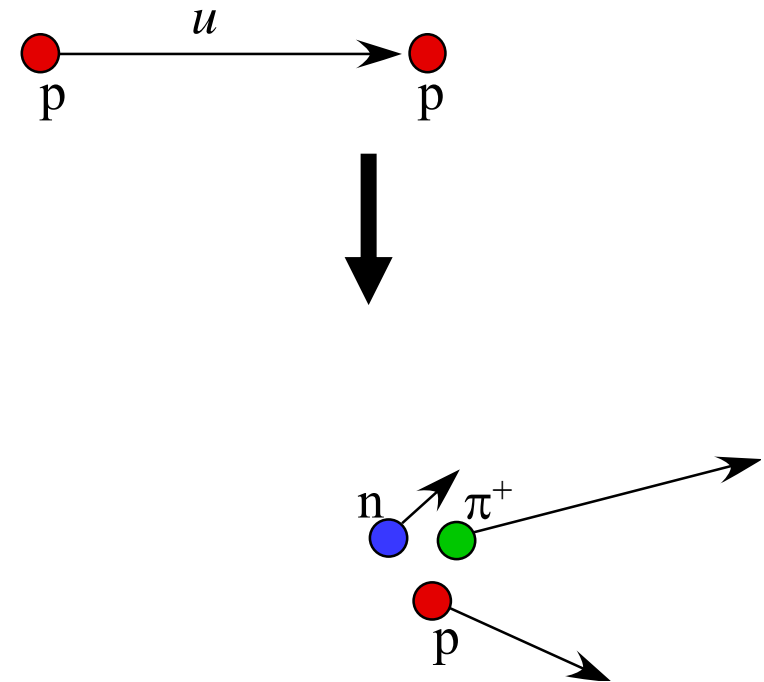
つまり、 π^+ 中間子を作るには、重心系で少なくとも $0.37c$ の速度で運動している陽子同士をぶつける必要があるということになります



π 中間子の生成 (4)

一方の陽子が止まっている系(実験室系)に戻ります。

この系は、重心系では $-v$ で動いていた陽子が止まって見える系ですから、打ち込む陽子の速度 u は、重心系での速度 v に、さらに速度 v を加えたものになります。



- ▶ 速度の合成則を使って

$$u = \frac{(v+v)}{1+(v/c)(v/c)} = \frac{2(v/c)}{1+(v/c)^2} c$$

- ▶ $v/c \sim 0.37$ を代入して計算すると
 $u/c \sim 0.65$
- ▶ つまり、少なくとも光速の 65% まで陽子を加速して標的にぶつけなくてはならないということになります

π 中間子の生成 (5)

- ▶ 陽子を光速の 65% まで加速すると「ぎりぎり」で π⁺ 中間子を作ることができることがわかりました。このときの陽子の運動エネルギーは
(運動エネルギー)

$$= (\text{全エネルギー}) - (\text{止まっているときの質量のエネルギー})$$

なので、

$$KE = mc^2 - m_N c^2 = \frac{m_N c^2}{\sqrt{1 - v^2 / c^2}} - m_N c^2 \sim (940 \text{ MeV}) (1 / \sqrt{1 - (0.65)^2} - 1)$$

$$\sim 300 \text{ MeV}$$

- **300 MeV 以上の運動エネルギーを持つように加速した陽子をぶつけると π⁺ 中間子を作ることができます。**

(π⁺ 中間子の質量 (~140 MeV/c²) よりも大きい運動エネルギーを陽子に与えてあげなくてはならないことに注意しましょう)



では、どうやって陽子を加速するのでしょうか？



加速器の種類

- ▶ 荷電粒子を加速するための加速器にもいろいろな種類があります。エキゾチック粒子を使った研究をするためには、たくさんの荷電粒子を高いエネルギーまで加速する必要があります
- ▶ 静電加速器: 原理は簡単だけど、高エネルギーまでは無理

ん...どっかで見たような...



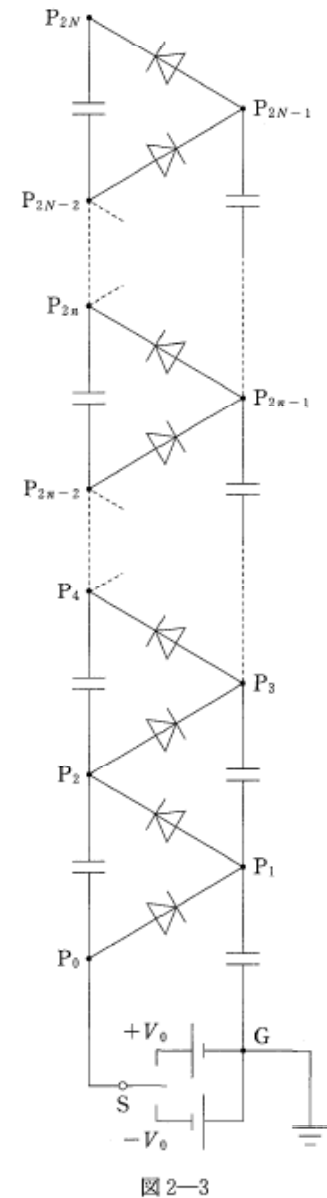
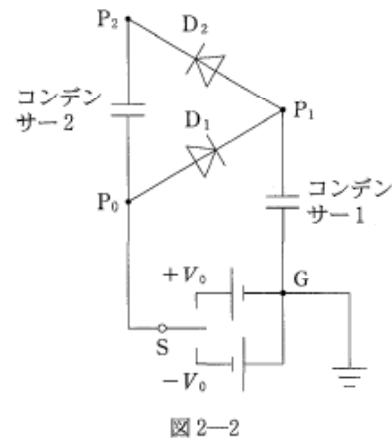
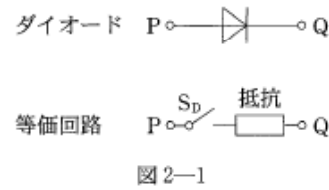
コッククロフトーワトソン型加速器 (1MeV)
(National Science Museum, London)

どっかで見たとような...

- ▶ 2011年の東大2次試験に出ましたね(笑)

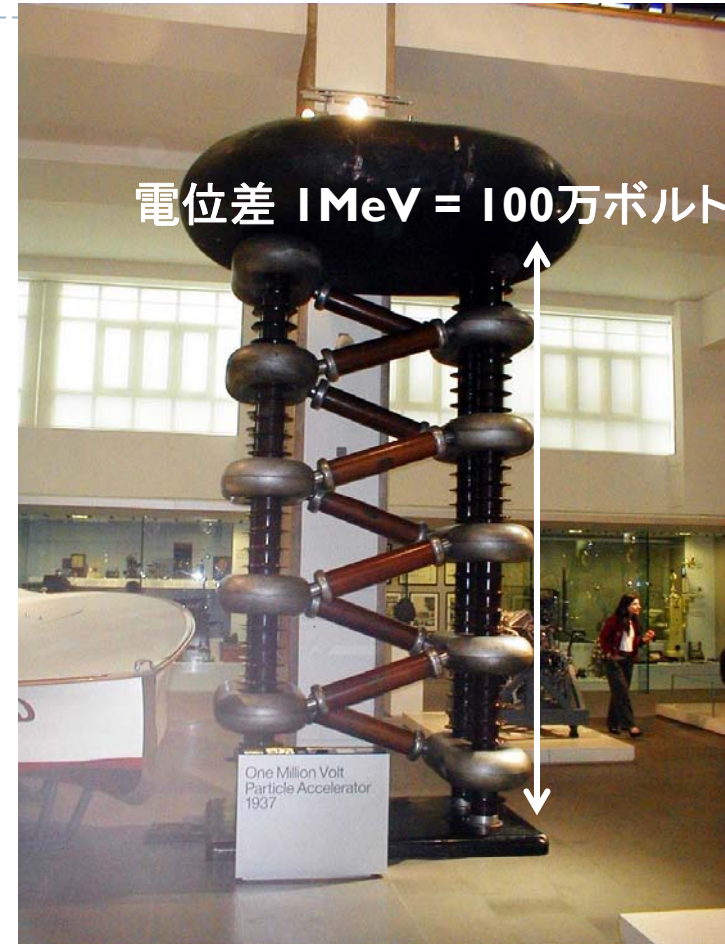
II 図2-2の回路に多数のコンデンサーとダイオードを付け加えた図2-3の回路は、コッククロフト・ウォルトン回路と呼ばれ、高電圧を得る目的で使われる。いま、コンデンサーの容量は全てCとし、最初、スイッチSは $+V_0$ 側にも $-V_0$ 側にも接続されておらず、コンデンサーには電荷は蓄えられていないとする。

スイッチSを $+V_0$ 側、 $-V_0$ 側と何度も繰り返し切り替えた結果、切り替えても回路中での電荷移動が起こらなくなった。この状況において、スイッチSを $+V_0$ 側に接続したとき、点 P_{2n-2} と点 P_{2n-1} の電位は等しくなっていた($n=1, 2, \dots, N$)。また、スイッチSを $-V_0$ 側に接続したとき、点 P_{2n-1} と点 P_{2n} の電位は等しくなっていた($n=1, 2, \dots, N$)。スイッチSを $+V_0$ 側に接続したときの点 P_{2N-1} 、 P_{2N} の電位 V_{2N-1} 、 V_{2N} を N と V_0 で表せ。なお、点Gを電位の基準点(電位0)とせよ。



加速器の種類

- ▶ 荷電粒子を加速するための加速器にもいろいろな種類があります。エキゾチック粒子を使った研究をするためには、たくさんの荷電粒子を高いエネルギーまで加速する必要があります
- ▶ 静電加速器：原理は簡単だけど、高エネルギーまでは無理
- ▶ 1MeV(100万ボルト)の加速じゃあ、粒子を作れないなあ。π中間子を作るには 300MeV 必要なので...



コッククロフトーワトソン型加速器 (1MeV)
(National Science Museum, London)

加速器の種類

- ▶ ライナック:
- ▶ ざっくり言えばリニアモーター(磁場で磁石をひっぱる)の電場版
- ▶ 粒子の動きに同期して電場が振動している(ので、タイミングがあった粒子は加速され続ける)
- ▶ 高いエネルギーまで加速しようとすると、どんどん長くなる



ISIS 陽子ライナック (70MeV)
(Rutherford Appleton Laboratory, UK)



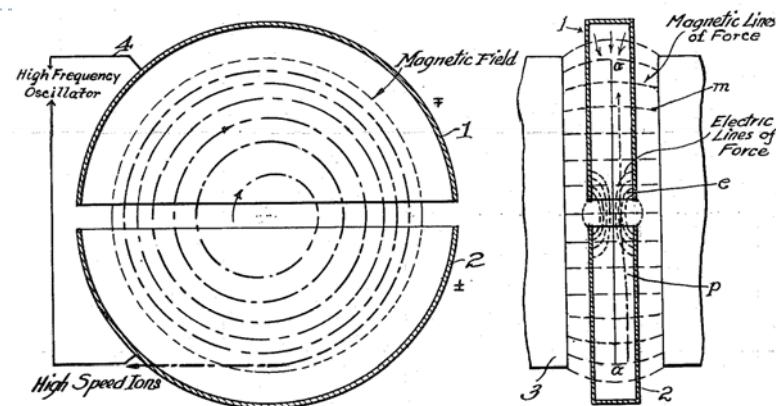
LANSCE 陽子ライナック (800MeV)
(Los Alamos National Lab., USA)

全長 800m ぐらい

加速器の種類

- ▶ サイクロトロン: 荷電粒子を渦巻き状に走らせて加速する。高エネルギーになると、装置はどんどん大きく、重くなる

(...なんか、サイクロトロンもよく入試に出ますね(笑))



ローレンスの特許出願書類(1934)に書かれたサイクロトロンの概念図 (wikipedia より)



理化学研究所 RIBF のサイクロトロン
総重量 8300トン

加速器の種類

- ▶ シンクロトロン: 円形状に並べた加速空洞の中に荷電粒子を走らせて加速する。雑な言い方をすれば、リニアックの構成要素を円形に並べたようなもの。
- ▶ 高エネルギーにしてもそれほど建設コストが増大しない。高度なRF技術が必要

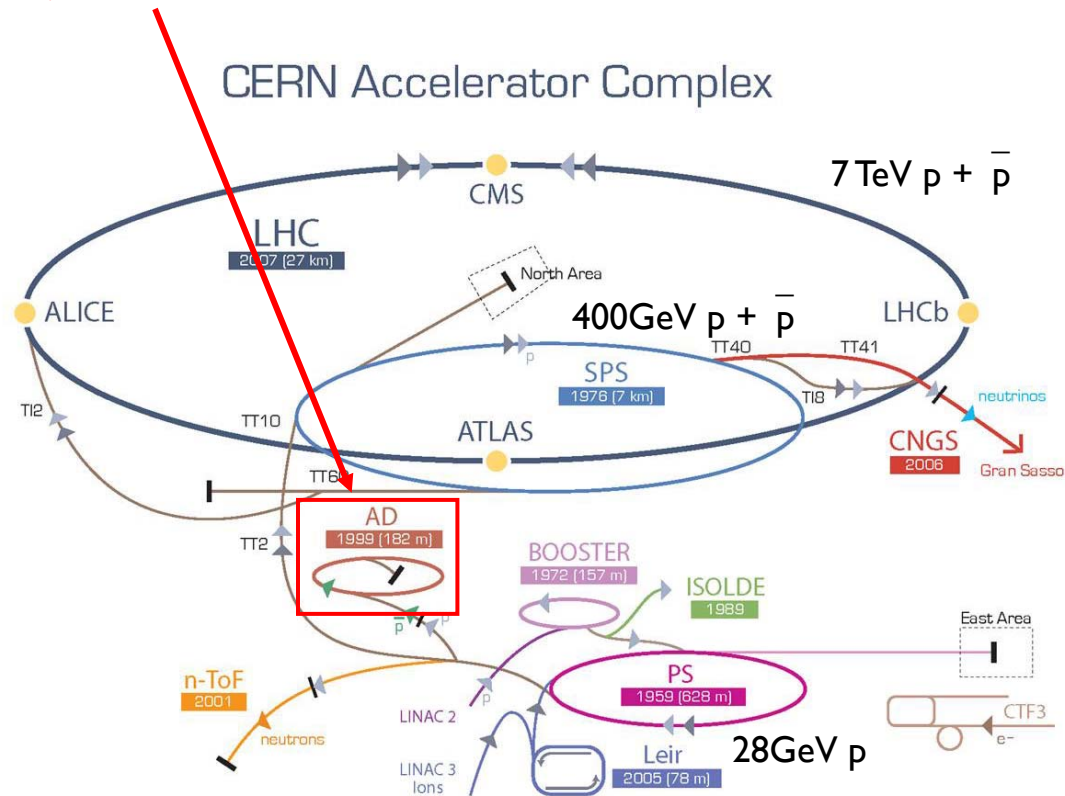
現在、高エネルギー加速器の標準的な技術になっています。



英国 STFC の ISIS シンクロトロン
加速エネルギー 800MeV
(π 中間子を作れます)

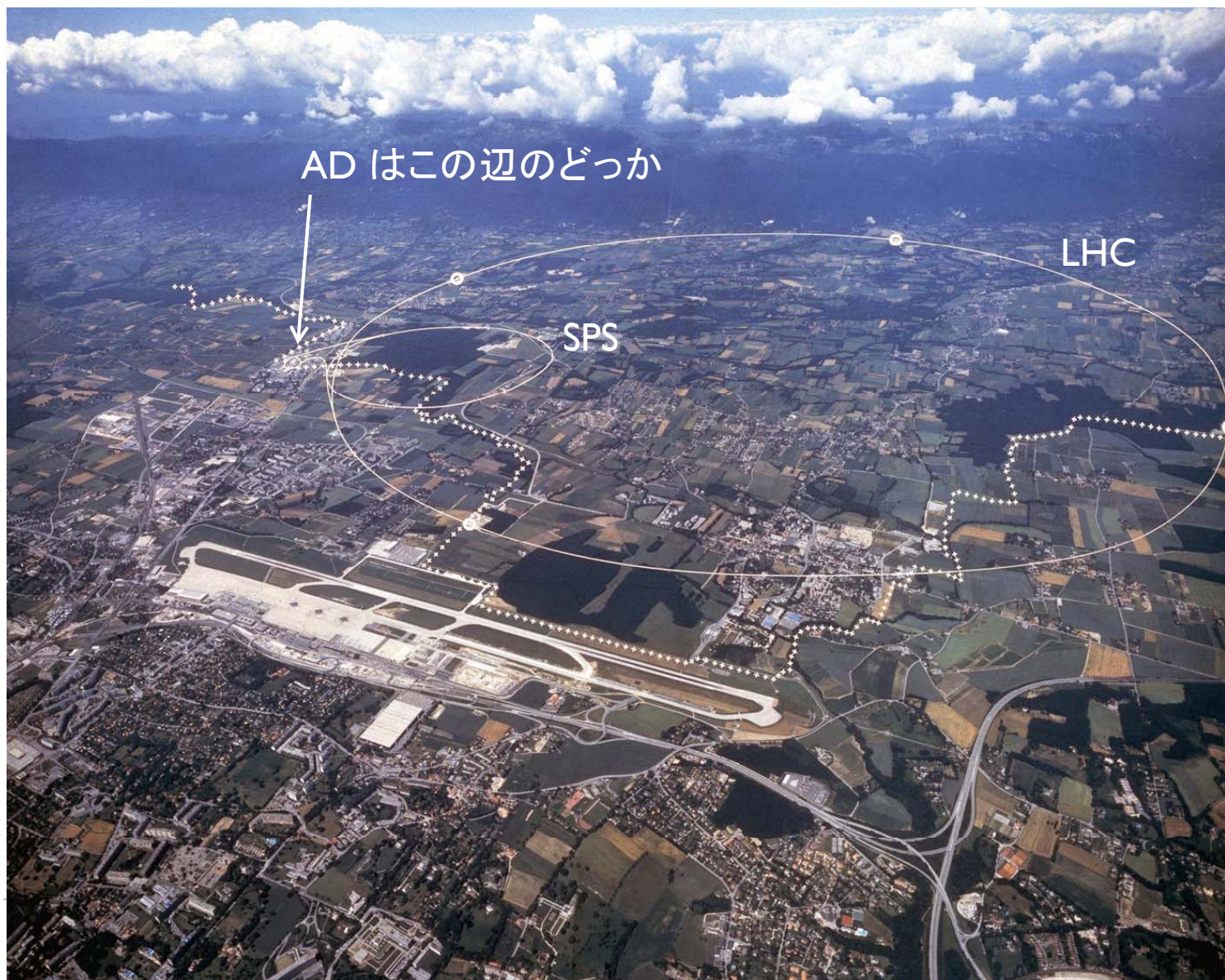
世界の陽子加速器 (CERN)

- ▶ ヨーロッパ原子核研究所(CERN)は**世界で最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**反陽子**の研究をこのAD施設で行っています



(<http://www.cern.ch> から転載)

世界の陽子加速器 (CERN)



世界の陽子加速器 (J-PARC)

- ▶ 日本では東海村に高エネルギー加速器研究機構と日本原子力研究機構が共同で J-PARC という陽子加速器の建設をすすめ、2008 年から運転を開始しました。
- ▶ 施設は 3GeV の陽子加速器と 50GeV の陽子加速器の2段式。
- ▶ **3GeV の加速器は中性子とミュオンを、50GeV の加速器は K 中間子とニュートリノを主に作るのに使われています。どちらも**世界最高のビーム強度**を誇っています。**



(<http://j-parc.jp> から転載)

ここまでのまとめ

- ▶ 私たちの周りの物質は第一世代のクォークとレプトンの正粒子からできています
 - ▶ それ以外にも素粒子はたくさんあります
 - ▶ 陽電子(電子の反粒子)
 - ▶ 反陽子(陽子の反粒子)
 - ▶ ミュオン(第2世代のレプトン)
 - ▶ 中間子(1個のクォークと1個の反クォークからできている粒子)
- etc...



ここまでのまとめ

- ▶ 様々な粒子を加速器を用いて作ることができます
 - ▶ 加速器にもいろいろな種類があります。高いエネルギーの加速器としてはシンクロトロンがよく用いられます
 - ▶ 大きなシンクロトロンを用いて加速した陽子を使って、様々な粒子を作ることができます
 - ▶ ミュオン(と π 中間子)は質量が軽いので、もっとも作りやすい粒子の一つです。
 - ▶ K 中間子や反陽子はその次ぐらいに作りやすい粒子です。
 - ▶ 逆に、他の粒子と比較して重い、例えばヒッグス粒子を作ろうとすると、山手線一周ぐらいの大きさの装置(LHC)が必要になります。



この講義の構成

- ▶ 1. 素粒子と、その作り方(加速器のお話)
- ▶ 2. 標準理論の限界をミュオニウム原子で探る
- ▶ 3. 宇宙進化の謎を反水素原子で探る



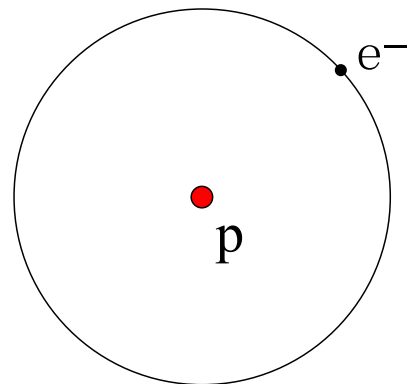
ミュオニウム原子って？

- ▶ 普通の原子は(u クォークと dクォークからできている)陽子と中性子からなる原子核と電子から出来ています。
- ▶ ミュオンが入っている原子って、どんなものがあるでしょう？



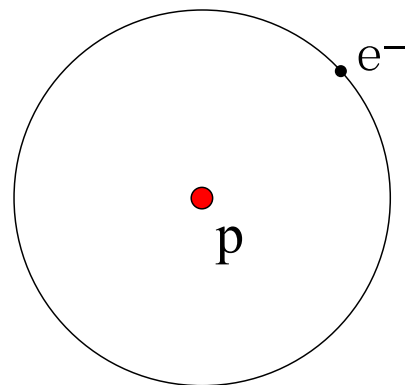
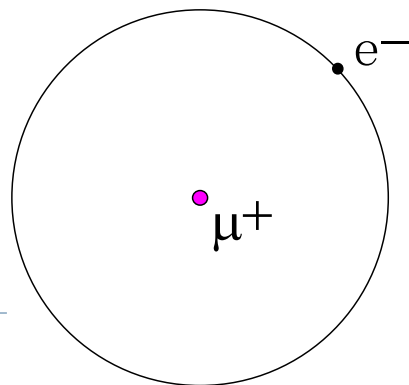
ミュオニウム原子って？

- ▶ 普通の原子は(u クォークと dクォークからできている)陽子と中性子からなる原子核と電子から出来ています。
- ▶ ミュオンが入っている原子って、どんなものがあるでしょう？
 - ▶ 陽子が +1 の電荷を持つミュオンにおきかえられた原子
 - ▶ 電子が -1 の電荷を持つミュオンにおきかえられた原子



ミュオニウム原子って？

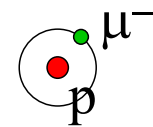
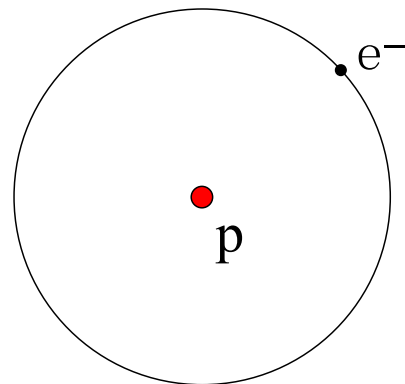
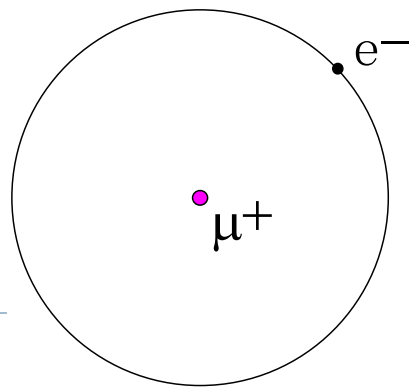
- ▶ 普通の原子は(u クォークと dクォークからできている)陽子と中性子からなる原子核と電子から出来ています。
- ▶ ミュオンが入っている原子って、どんなものがあるでしょう？
 - ▶ 陽子が +1 の電荷を持つミュオンにおきかえられた原子
 - ▶ 電子が -1 の電荷を持つミュオンにおきかえられた原子



...

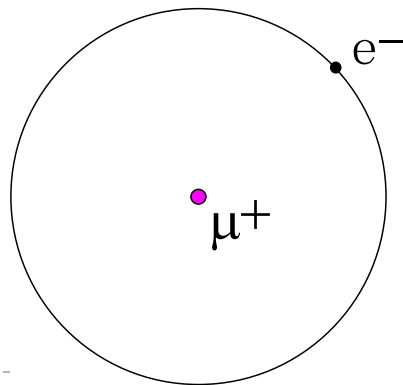
ミュオニウム原子って？

- ▶ 普通の原子は(u クォークと dクォークからできている)陽子と中性子からなる原子核と電子から出来ています。
- ▶ ミュオンが入っている原子って、どんなものがあるでしょう？
 - ▶ 陽子が +1 の電荷を持つミュオンにおきかえられた原子
 - ▶ 電子が -1 の電荷を持つミュオンにおきかえられた原子



ミュオニウム原子って？

- ▶ ミュオニウム原子とは、水素原子の原子核(陽子)を +1 の電荷を持つミュオンで置き換えた原子です。
- ▶ 元素記号 Mu があります
- ▶ 水素原子もミュオニウム原子も電子の換算質量 $\frac{m_e M}{m_e + M}$ は、ほぼ m_e になります
 - ▶ ということは、ミュオニウム原子のスペクトルは水素原子のスペクトルとほとんど変わりません。
 - ▶ **調べて何が面白いの？**



原子の分光

- ▶ 原子の分光 = エネルギー準位の間隔の測定
- ▶ エネルギー準位は原子核と電子の間に働く力によって決まります。つまり、原子の分光とは、原子核と電子の間に働く力を測定しているのと同じことです

$$E\Psi = \left(-\frac{\hbar^2}{2m}\nabla^2 + V \right) \Psi$$
$$\nabla^2 = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta \frac{\partial}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial^2}{\partial \phi^2}$$
$$V(r) = -\frac{e^2}{4\pi\epsilon r}$$



二つの電荷に働く力は...

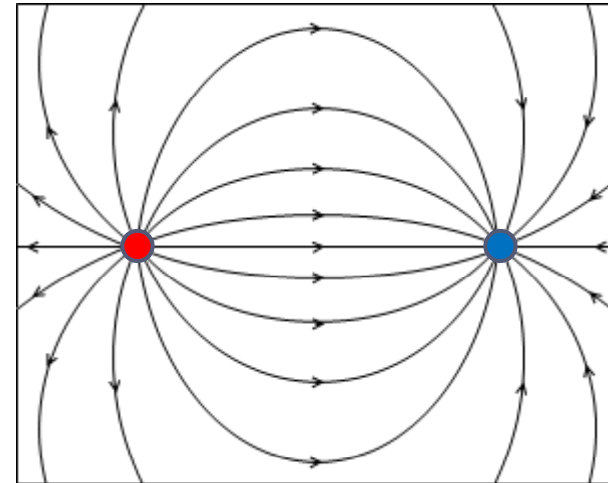
▶ クーロン力です
こんな精密に測るまでもない？

▶ でも、量子力学によれば
 $\Delta E \cdot \Delta \tau \sim \hbar$

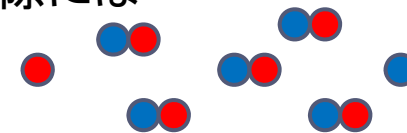
の不確定性で許される時間の間、仮想的な粒子が生まれてもよいのです。

ですから、実は二つの電荷の間には、電荷をもった粒子の対が生まれては消えているのです。

▶ すると、単純なクーロン力からはズレてくるはずですね。



実際には



二つの電荷に働く力は...

- ▶ さきほどの仮想的に生まれる粒子は、質量が軽いほど長い時間存在することができます。ですから(一番軽い荷電粒子である)電子と陽電子の対による影響が非常に大きく影響します。
 - ▶ ですが、精密に測れば $\mu^+\mu^-$ の対、 $u\bar{u}$ の対、などあらゆる粒子の対の影響が見えてきます
 - ▶ まだ見つかっていない粒子も、もし存在すれば、かならず影響を及ぼします。加速器で直接作ることができない粒子であっても、短い時間ならば仮想的に対生成・対消滅することができるからです。
 - ▶ まだ知られていない力があれば、かならず影響を及ぼします。
 - ▶ つまり、原子を精密に分光することで、まだ見つかっていない(加速器では直接作ることができない)粒子や力を探索することができるのです。
-



どの原子を使って精密な分光をしましょう？

- ▶ 水素原子(や、他の普通の原子)
 - ▶ **素晴らしい実験がたくさんあります！**
→ 鳥井先生の講義スライド参照
 - ▶ 普通の原子は「安定」です
 - ▶ 時間をかけて冷却、分光することができます

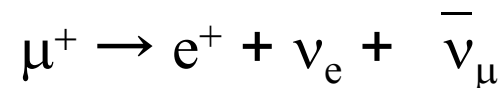
- ▶ ですが、原子核(水素の場合は陽子)と電子の間に働く力を調べるプローブとしては...ちょっと難しいところがあるので
 - ▶ 原子核(や陽子)は空間的に広がりを持っています。
 - ▶ 原子核や陽子の「中」にも電子が存在する確率があります。
 - ▶ 原子核や陽子の空間的な広がりを正確に知っていないと、エネルギー準位の正確な計算ができません



どの原子を使って精密な分光をしましょう？

▶ ミュオニウム原子

- ▶ ミュオンは電子と同じく、大きさを持たない粒子です
→理論上は、厳密にエネルギー準位を計算できます
- ▶ まだ見つかっていない粒子や力を探索するのに適しています
- ▶ ミュオンはおよそ100万分の2秒で、電子とニュートリノに崩壊してしまいます。

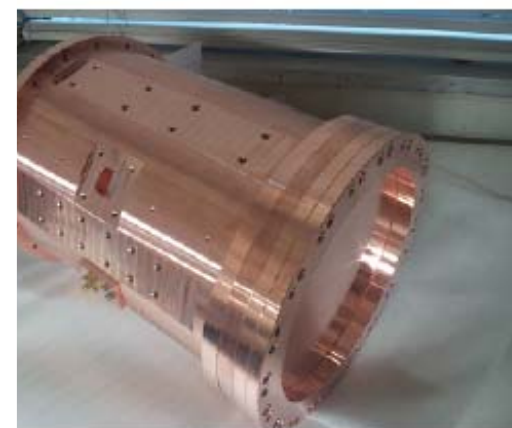


- ▶ 崩壊する前に分光しなくてはなりません
 - ▶ ミュオニウム原子がたくさん必要です
-

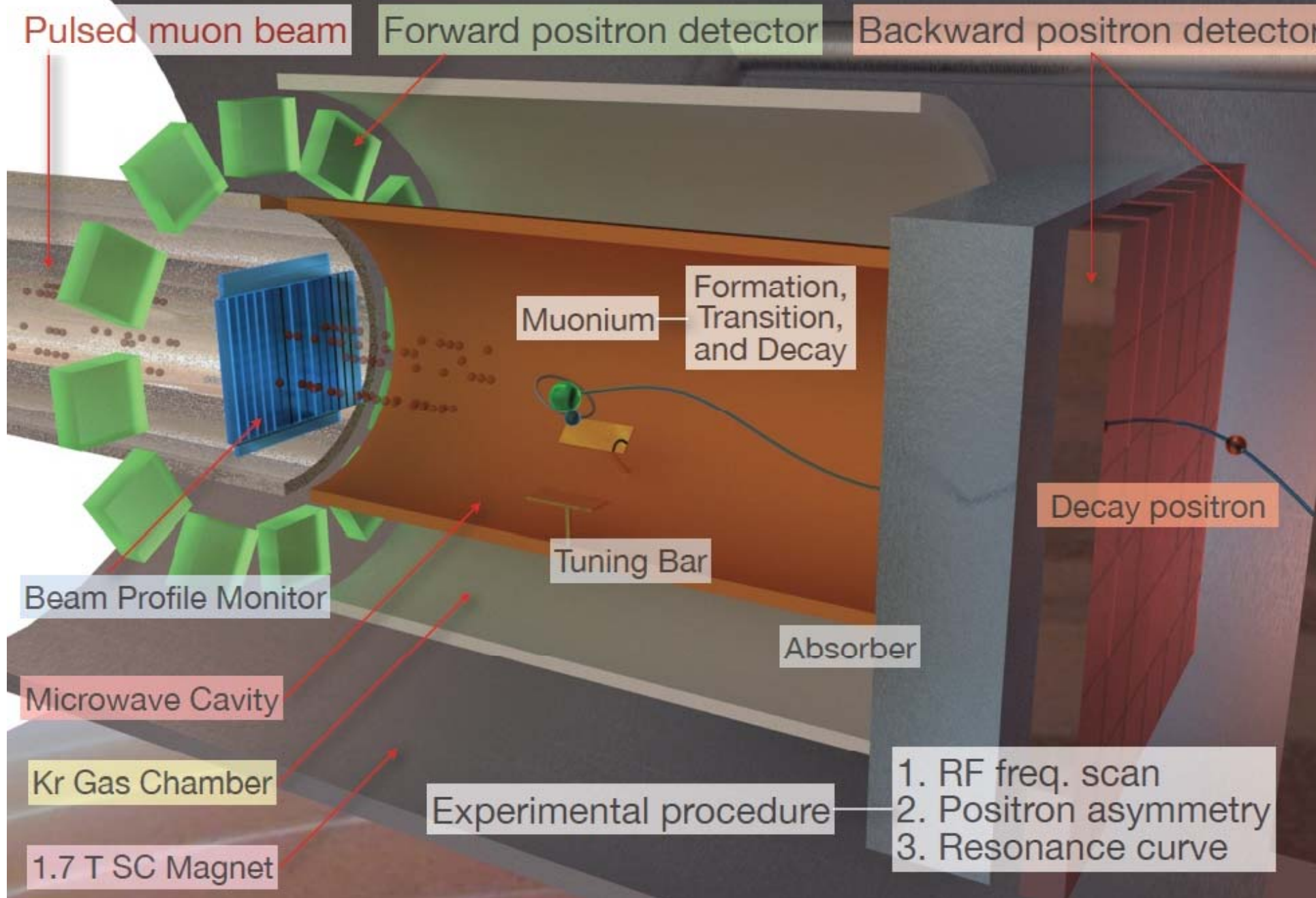


ミュオニウム分光実験@J-PARC（準備中）

- ▶ J-PARC は世界で一番多くのミュオンを作ることができる（＝ミュオニウム原子を作ることができる）実験施設です。現在、20年ぶりに世界記録を更新することを目指して新しい分光実験を J-PARC で準備中です。

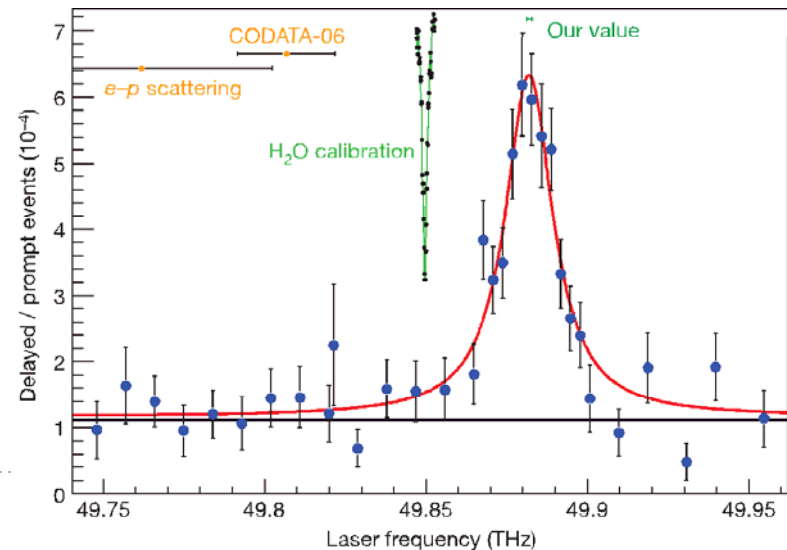
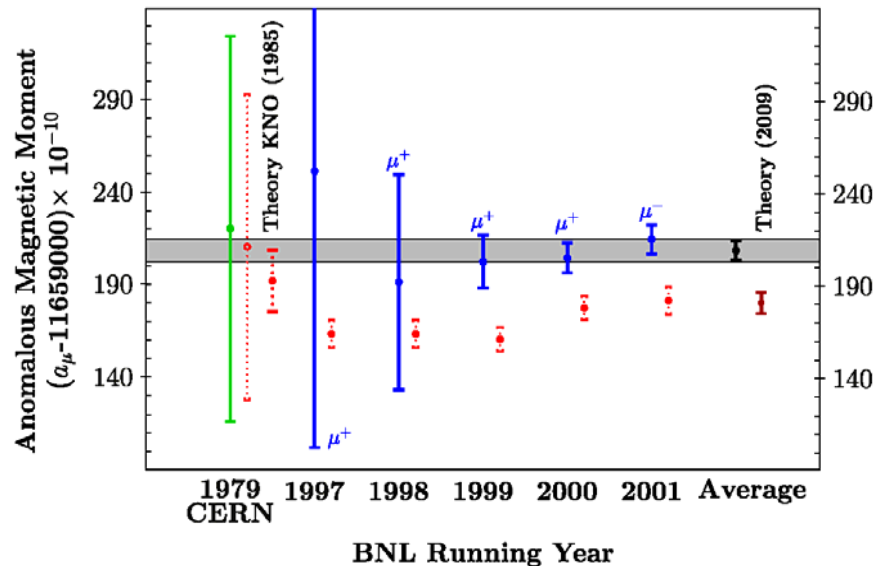


Experimental Setup



ミュオニウム分光実験で分かること

- ▶ 標準理論は目覚ましい成功を修めています、その**予言と合わない実験結果**もいくつかあります
 - ▶ ミュオン異常磁気モーメントの測定
 - ▶ ミュオニック水素原子の分光実験
- ▶ ミュオンに働く未知の相互作用や粒子があれば、ミュオニウム分光実験が見つかるはずです—**乞うご期待**。



ここまでのまとめ

- ▶ ミュオニウム原子は、水素原子の陽子がミュオンで置き換えられた原子です
- ▶ 原子の分光は、原子を作っている粒子の間に働く力を測定していることと同じです。
- ▶ ミュオニウム原子を作っているミュオンも電子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
- ▶ 現在、J-PARC(東海村)でミュオニウム原子の分光実験を行う準備を進めています



来週は

- ▶ 反粒子の話をしたあとで、反水素を用いた分光実験のお話をします
- ▶ また来週お会いしましょう！

