

物理科学Ⅱ（第7回）

2011/12/05 @K402教室

先々週のまとめ：ニュートンの運動の法則

- ▶ 第1法則：静止している質点は、力を加えられない限り静止を続け、等速直線運動している質点は、力を加えられない限り等速直線運動を続ける（慣性の法則）
- ▶ 第2法則：力 F を受けている質点の位置座標 r は、運動方程式

$$F = m \frac{d^2 r}{dt^2}$$

に従って変化する

- ▶ 第3法則：2個の質点1, 2があり、互いに力を及ぼしあっている時、質点1が質点2から受ける力 F_{12} は、質点2が質点1から受ける力 F_{21} と、大きさが同じで向きが反対 $F_{12} = -F_{21}$ である（作用反作用の法則）



先々週のまとめ：慣性系

- ▶ 慣性系：ニュートンの第一法則が成り立つ座標系
- ▶ もし、一つ慣性系があれば、互いに等速運動している座標系から見ても、ニュートンの第一法則が成り立つ。つまり、慣性系は無数にある
- ▶ ニュートンの第一法則は、「自然界には、“静止している質点は、力を加えられない限り静止を続け、等速直線運動している質点は、力を加えられない限り等速直線運動を続ける”ように見える座標系(慣性系)が存在する」という法則である。
- ▶ 第2法則、第3法則は、慣性系で成り立つ法則である



先々週のまとめ：運動方程式

- ▶ 第2法則：力 F を受けている質点の位置座標 r は、運動方程式

$$F = m \frac{d^2 r}{dt^2}$$

に従って変化する

- ▶ 質点の位置 r が直接定まるのではなく、加速度 $\frac{d^2 r}{dt^2}$ が定められます
- ▶ 位置 r を時間の関数として求めるためには、微分方程式を解く必要があります



先々週のまとめ：落下運動の方程式

- ▶ 空気の抵抗を無視すれば
- ▶ 落下する速度に比例した空気の抵抗が働くなら

$$m \frac{d^2 r}{dt^2} = mg$$

$$r = \frac{1}{2}gt^2 + c_1 t + c_2$$

$t = 0$ で $r = 0$, $dr/dt = 0$ とすると

$$r = \frac{1}{2}gt^2$$

$$m \frac{d^2 r}{dt^2} = mg - K \frac{dr}{dt}$$

$$r = c_1 + c_2 e^{-Kt/m} + \frac{mg}{K}t$$

$$r = \frac{m^2 g}{K^2} \left(e^{-Kt/m} - 1 \right) + \frac{mg}{K}t$$

空気の抵抗 K が小さいときには

$$r \sim \frac{m^2 g}{K^2} \left(1 - \frac{Kt}{m} + \frac{1}{2} \frac{K^2 t^2}{m^2} - 1 \right) + \frac{mg}{K}t = \frac{1}{2}gt^2$$

先々週のまとめ：運動方程式を解くとは

- ▶ 現実には、物体にはたらく力を全て知ることは不可能。「空気抵抗」と一口に言われる力も、実際には速度に比例するわけでも速度の二乗に比例するわけでもなく、場合によっては乱流になってさまざまな力が働いている（例：野球のナックルボール）
- ▶ しかし、自分たちが直面している問題を解決するために必要な精度にまで問題を単純化して運動方程式を立てることは可能
- ▶ 運動方程式の解は、問題をどこまで単純化したかによって異なる（＝いつでも使える「公式」はない）
- ▶ 運動方程式の解は、近似を行うと、最初から近似して得た運動方程式の解に一致する



先週の報告: 国際会議

- ▶ 先週は休講でした
- ▶ 松江市のくにびきメッセで “Cold Antimatter and Precision Physics” という国際会議を開きました





くにびきメッセ



余談：「くにびき」って何？

- ▶ 出雲国風土記(CE 733)にでてくる神話の一つに、「国引き神話」があるそうです



余談：「くにびき」って何？

- ▶ 出雲国風土記(CE 733)にでてくる神話の一つに、「国引き神話」があるそうです

その昔、出雲の国は細く長く未完成の国であったので、八束水臣津野命やつかみずおみづぬのみことがこの国を広く継ぎ足そうと、遠い新羅しらぎの国の余りを「国来、国来」と引き寄せられました。それが杵築の岬で、その時に使われた綱が園そのの長浜ながはま、そして引いてきた国を動かさないようにつなぎ止められた杭が三瓶山さんべさんです。

この展望台から見おろす風景こそ「国引き神話」の風景です。

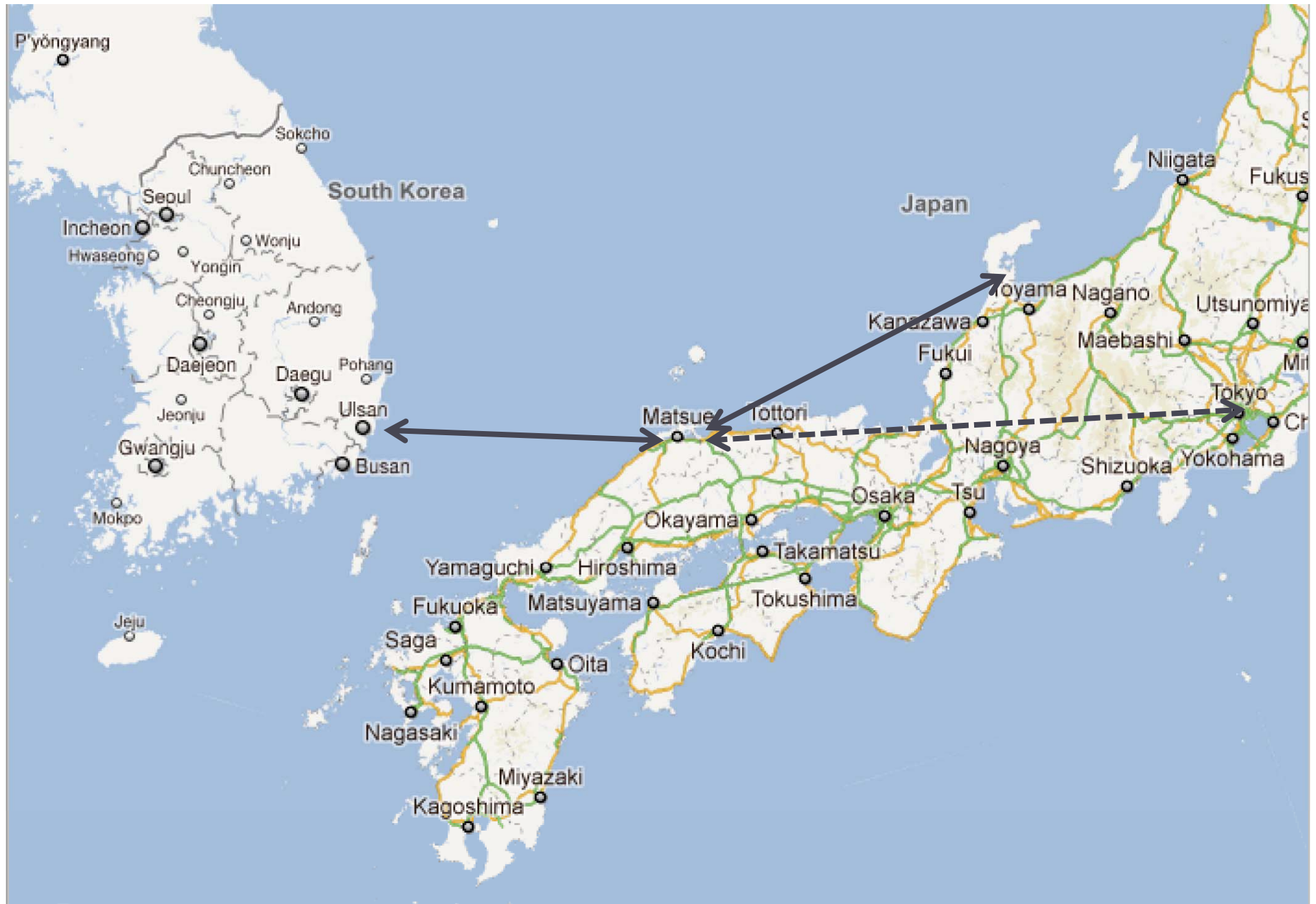


余談：「くにびき」って何？

- ▶ 出雲国風土記(CE 733)にでてくる神話の一つに、「国引き神話」があるそうです



- ▶ 古来から朝鮮半島や越の国との交流が深かったことを反映している神話ですね



先週の報告（国際会議）とイントロ

- ▶ 先週は休講にしてしまいました
- ▶ 松江市のくにびきメッセで“Cold Antimatter and Precision Physics”という国際会議を開きました
- ▶ 参加者 55人
- ▶ 講演 36(うち、外国人研究者によるもの 20)
- ▶ 「反物質」「精密測定」をキーワードにして最近のさまざまな研究について議論しました

- ▶ 私たちの研究室では「反水素」を作ってその分光を行い、CPT 対称性を検証しようとしています。



先週の報告（国際会議）とイントロ

- ▶ 先週は休講にしてしまいました
- ▶ 松江市のくにびきメッセで“Cold Antimatter and Precision Physics”という国際会議を開きました
- ▶ 参加者 55人
- ▶ 講演 36(うち、外国人研究者によるもの 20)
- ▶ 「反物質」「精密測定」をキーワードにして最近のさまざまな研究について議論しました
- ▶ 私たちの研究室では「反水素」を作ってその分光を行い、**CPT 対称性**を検証しようとしています。
- ▶ この CPT 対称性って何なのでしょう？



現代物理学の世界

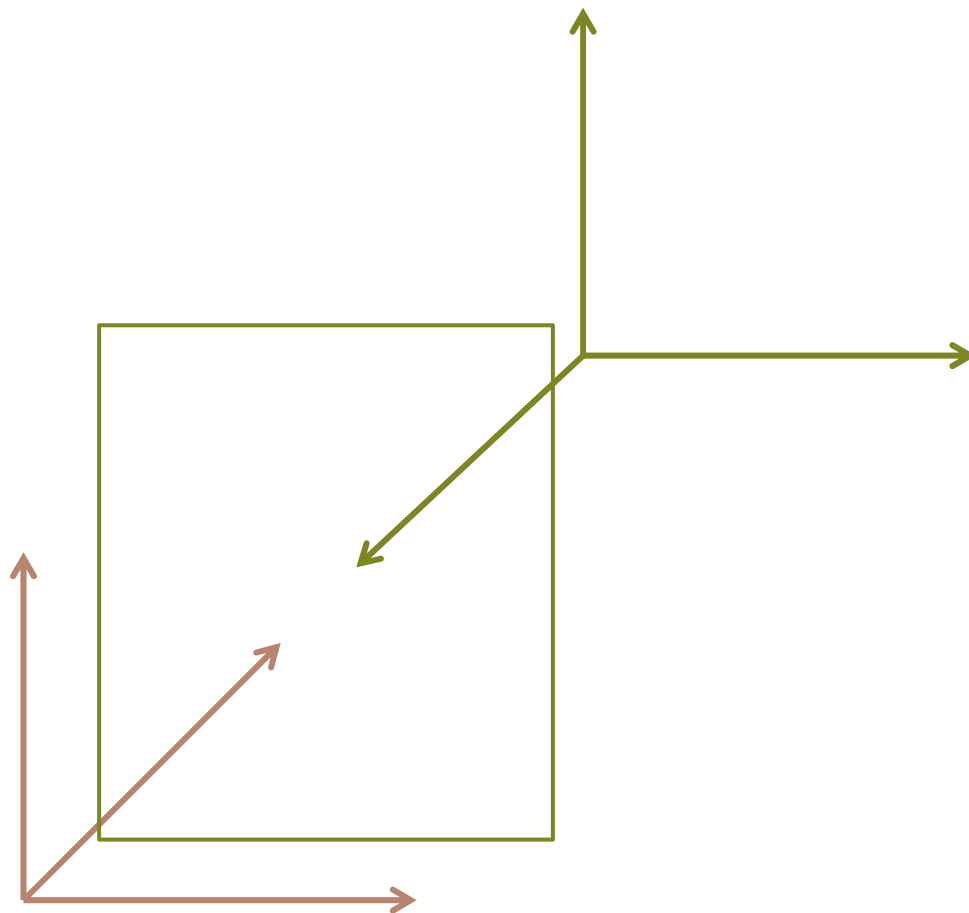
現代物理学といっても、広うござんす。
ぶっちゃけ、私の研究室ではどんな研究をしているの？

ここでクイズです

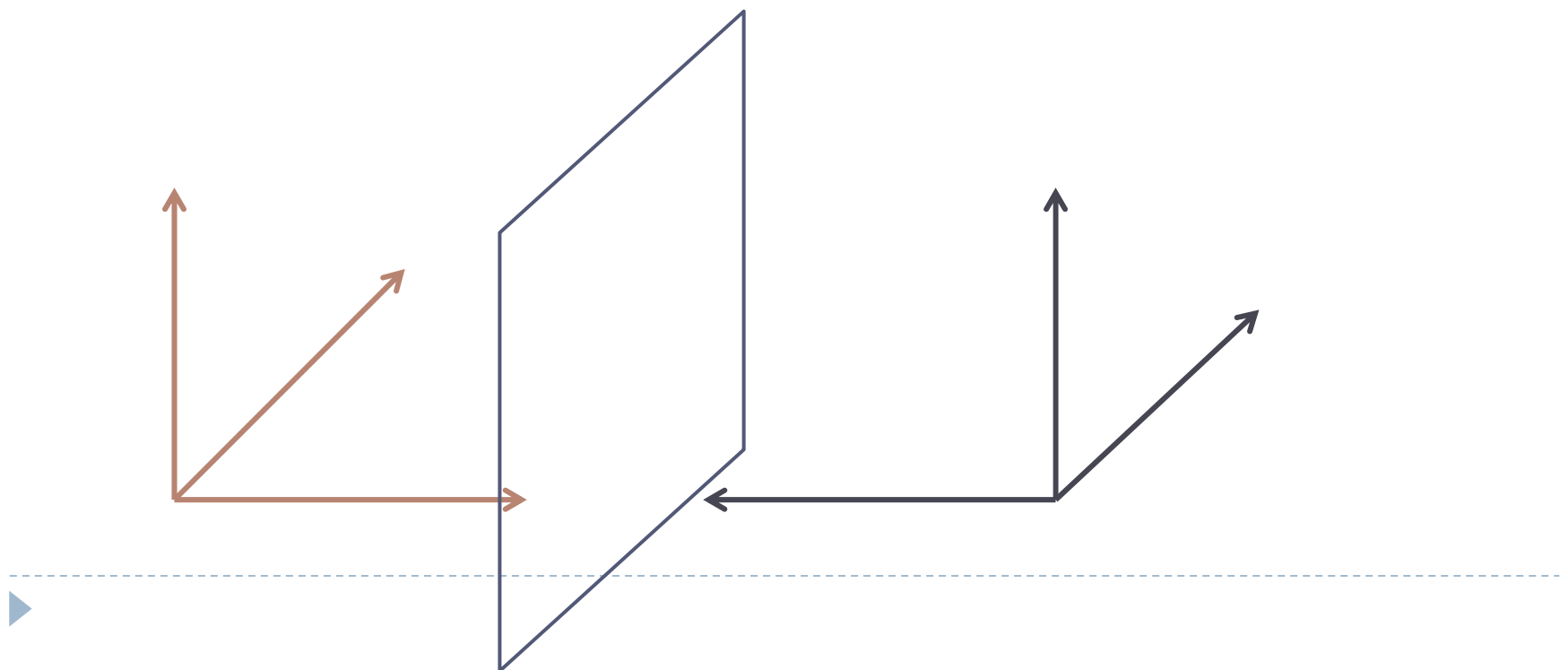
- ▶ 鏡に向かって立つと、左右が逆に写りますが、上下はそのままです。なぜなのでしょう？



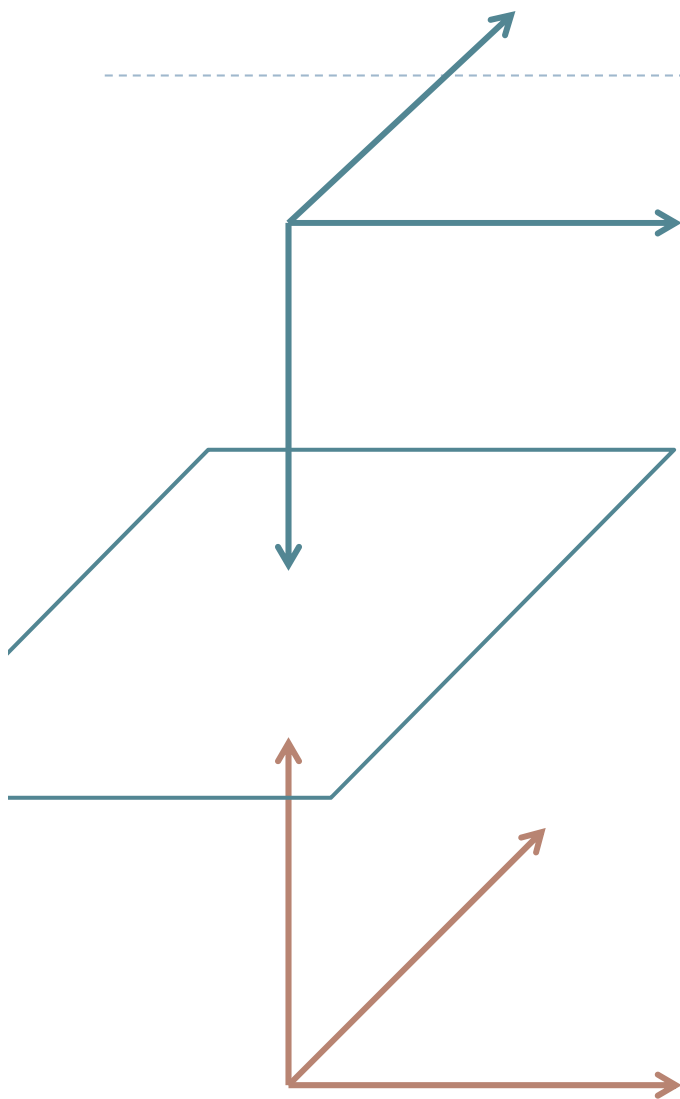
鏡に映すと



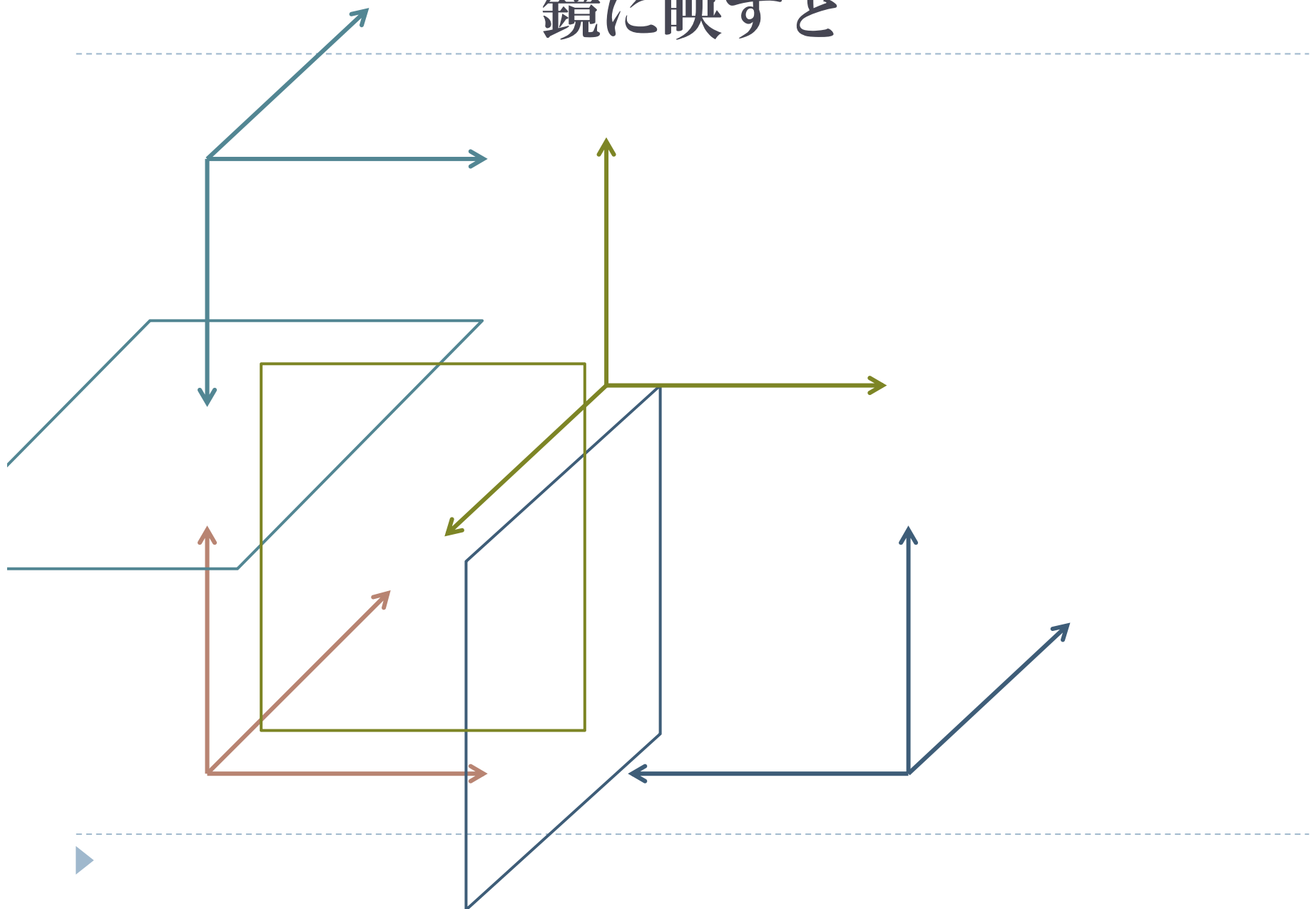
鏡に映すと



鏡に映すと

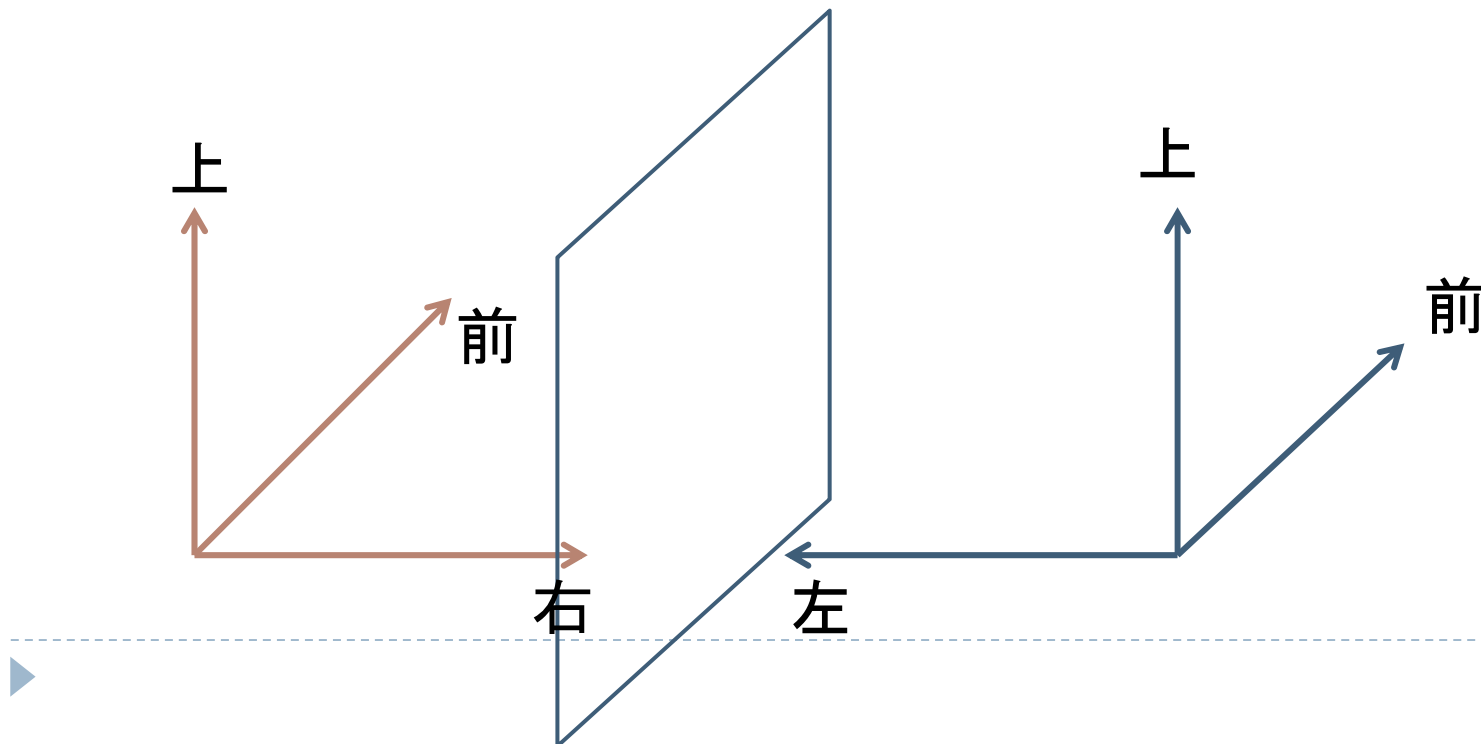


鏡に映すと



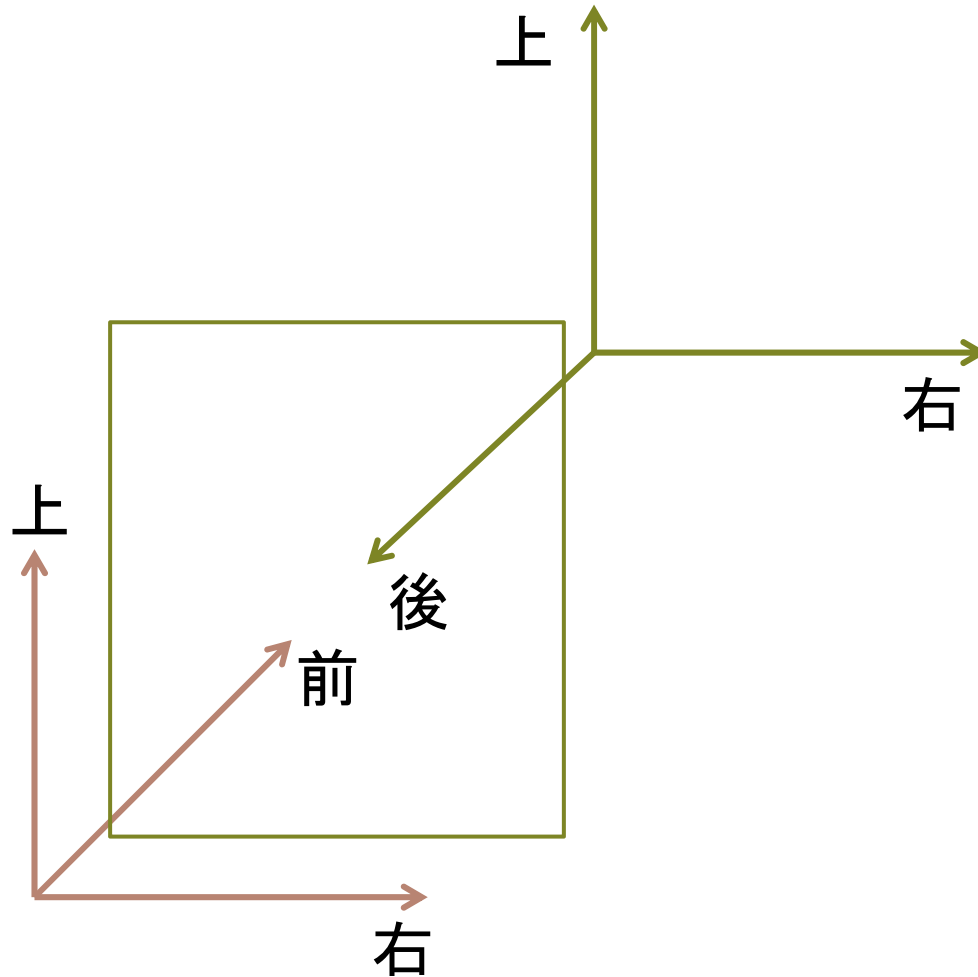
鏡に映すと

- ▶ 鏡に向かう向き(鏡に垂直な向き)が反転している



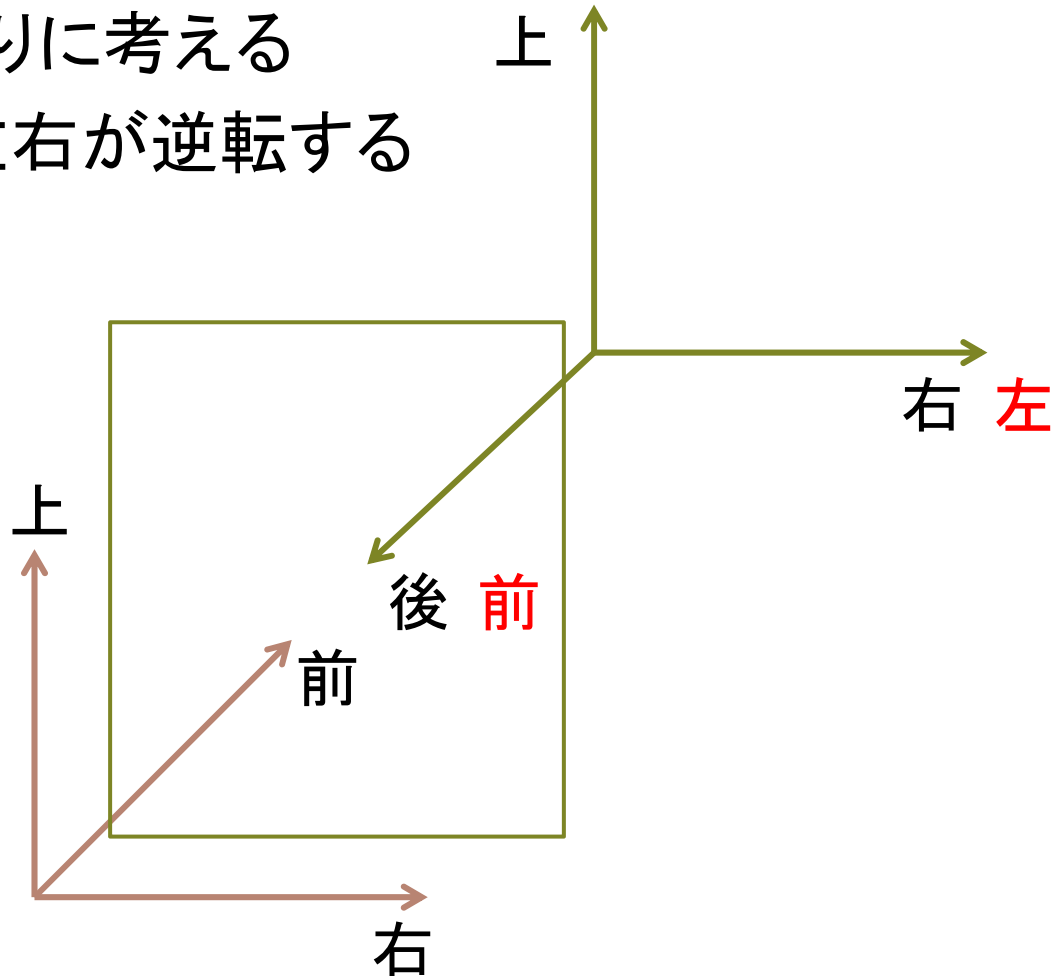
鏡に映すと

- ▶ 鏡に向かう向き(鏡に垂直な向き)が反転している

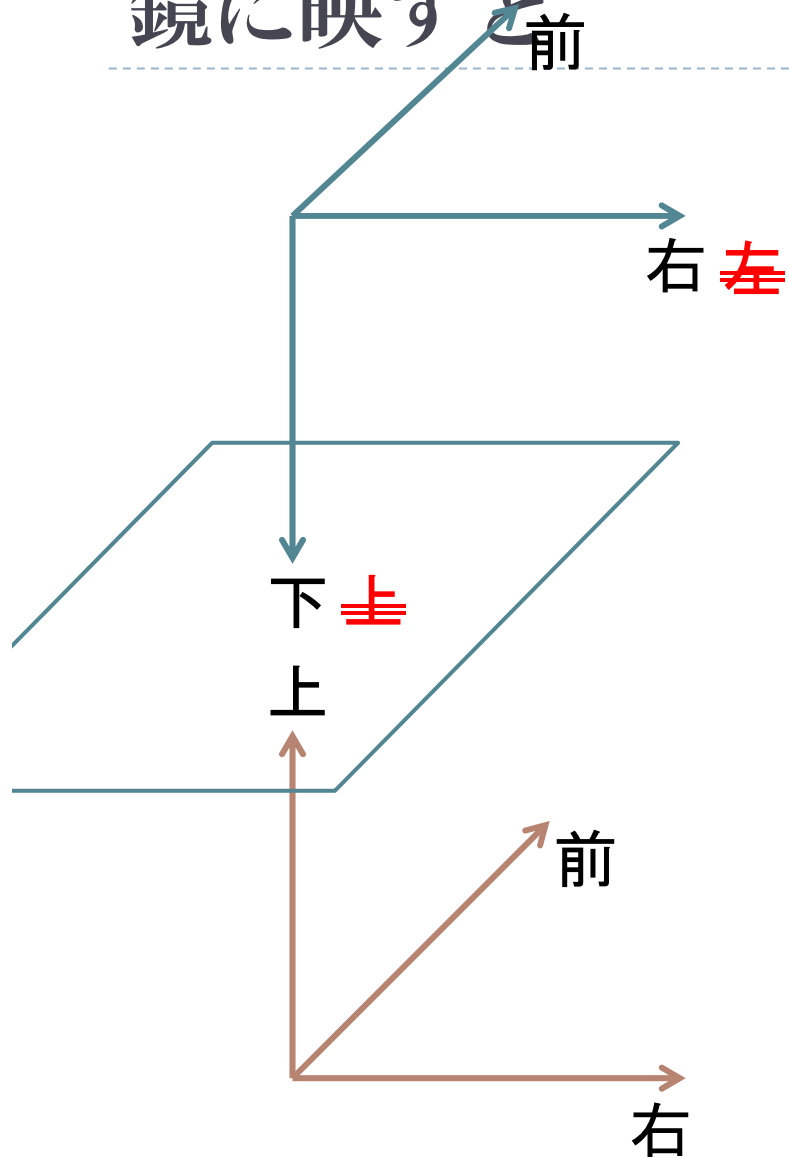


鏡に映すと

- ▶ 鏡を前後に置いたときは、鏡の中の世界の人になったつもりで考える
→ 左右が逆転する

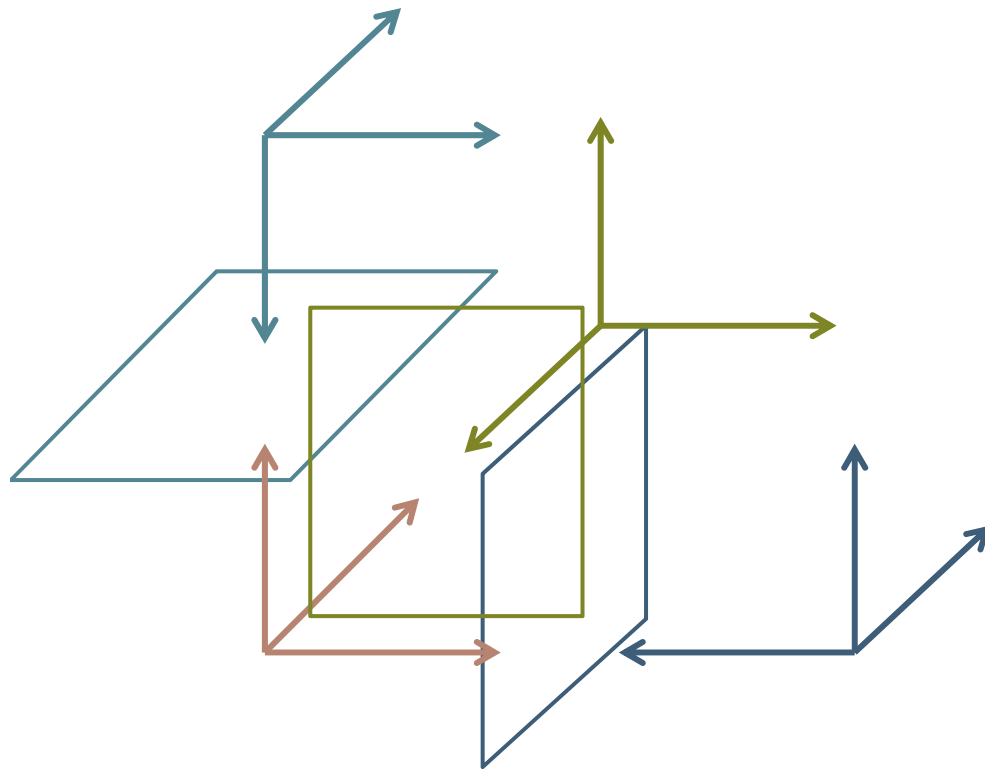


鏡に映すと



- ▶ 鏡を上下に置いたときにも、鏡の中の世界の人になったつもりで考えると、左右が逆転しています
- ▶ でも、そうは考えないで、上下が逆になっていると私たちは表現するようです

クイズの答（まつだの説明）



- ▶ 鏡を置くと左右が反転するのではなく、鏡に垂直な方向が反転します
- ▶ 並んでいる人、向かい合っている人は日常生活で見かけるので、鏡に映る像を見たときに、鏡の中の世界の人の気持ちになって、前後上下左右を名づけるのでしょう。その結果、前後に鏡を置いても、左右に鏡を置いても、左右が反転していると私たちは表現します。
- ▶ 上下さかさまになっている人は日常生活で見かけることがないので、素直に上下さかさまだ、と表現するでしょう。
- ▶ サルや鳥に言語があったらどう表現するのかな…
- ▶ 宇宙ステーションで生まれ育った人はどう表現するのかな…

つづいて、またもやクイズです

- ▶ 宇宙人と音声のみで通信している時、右と左を教える方法はあるのでしょうか？
- ▶ この問題は、鏡のように反転した映像を見せられたとして、その違いに気付くことができるのでしょうか？という問題として考えることもできます

（違いに気付くことができるならば、その違いを音声で説明して、どちらが右なのか左なのかを定義することができます）



つづいて、またもやクイズです

- ▶ 宇宙人と音声のみで通信している時、右と左を教える方法はあるのでしょうか？
- ▶ この問題は、鏡のように反転した映像を見せられたとして、その違いに気付くことができるのでしょうか？という問題として考えることもできます

(違いに気付くことができるならば、その違いを音声で説明して、どちらが右なのか左なのかを定義することができます)

「右」を国語辞典で引くと…

- ▶ 広辞苑：南を向いた時、西にあたる方
- ▶ 大辞泉：東に向いたとき南にあたる方
- ▶ 旺文社国語辞典(昭和38年) 箸を持つ手の方
- ▶ 新明解国語辞典：アナログ時計の文字盤に向かった時に、一時から五時までの表示の有る側
- ▶ 岩波国語辞典：この辞書を開いて読む時、偶数ページのある側

パリティとパリティ変換

- ▶ パリティという言葉はいろいろな分野で使われます
 - ▶ 通信、コンピュータ: パリティビット、パリティチェック
 - ▶ 投資: パリティ価格
 - ▶ その他: NFL に関する英字新聞の記事で、混戦になっていることを「パリティ」と呼んでいたのを見たとあります。
- ▶ 物理の世界ではパリティ変換 (P) とは「空間を反転すること」という意味です。さきほどの問題はパリティ変換された世界を我々の世界と区別できるか？という問題です

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} -x \\ -y \\ -z \end{pmatrix}$$



パリティ変換されると？

- ▶ スカラー(大きさだけを持つ量)は何も変わりません
 - ▶ 質量、時刻、エネルギー、電荷…
- ▶ ベクトル(大きさと向きを持つ量)は、その符号が替わります
 - ▶ 位置ベクトル、速度ベクトル、加速度ベクトル、力、運動量…



ニュートンの運動方程式とパリティ変換

▶ 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

→ 左右の区別はできない



万有引力の法則とパリティ変換

▶ 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

→ 左右の区別はできない



クーロンの法則とパリティ変換

▶ クーロンの法則

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

▶ パリティ変換しても成り立っている

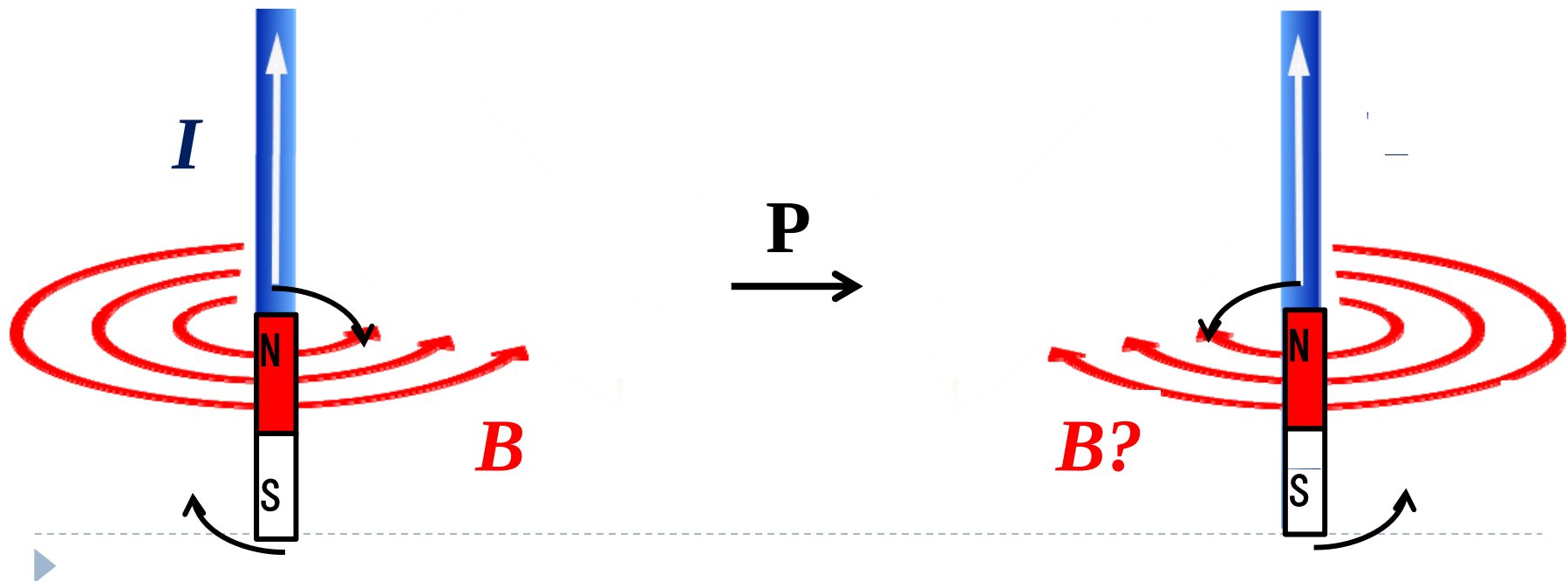
→ 左右の区別はできない



電流の周りの磁場とパリティ変換

▶ 「アンペールの右ねじの法則」

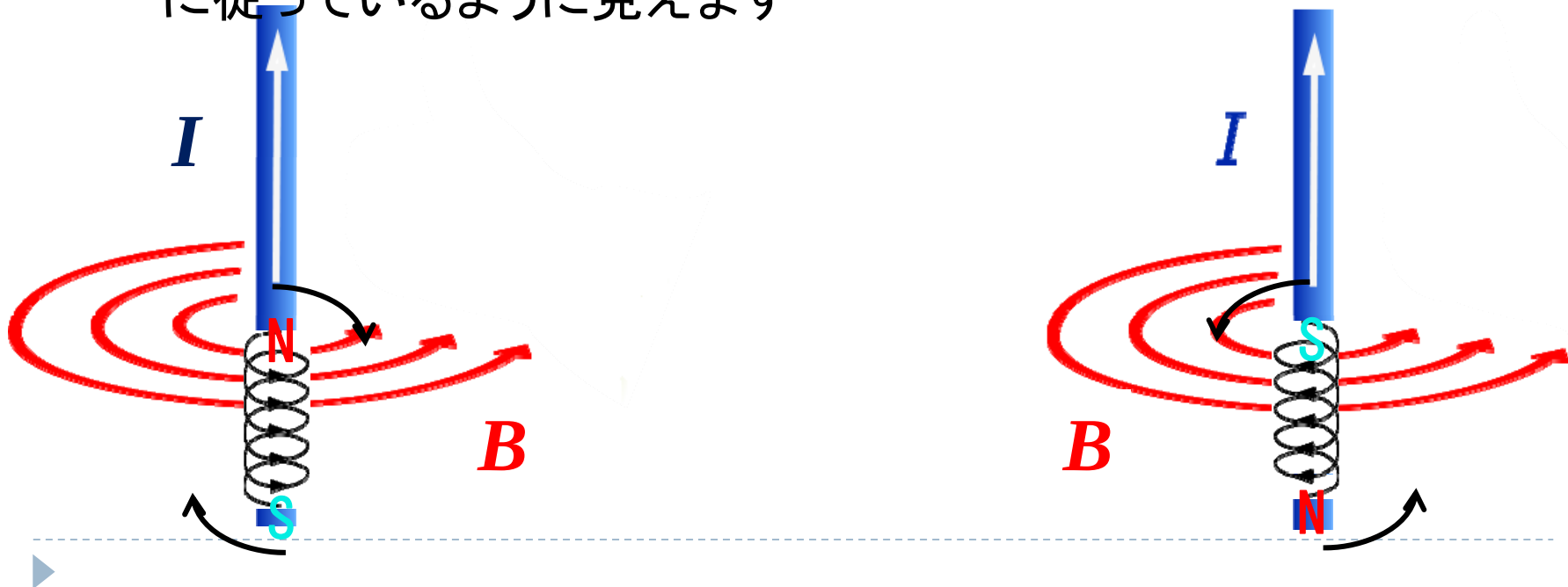
- ▶ 電流を右ねじの進む方向に直進させると、磁場は右ねじの回転方向に生じる
- ▶ 鏡の中の世界では成り立たない？



電流の周りの磁場とパリティ変換

▶ でも磁場って何だろう？

- ▶ 磁場は電流の流れによって生じます（棒磁石の中の原子にミクロな電流が流れています）。全ての磁石は電磁石なのです
- ▶ 鏡の中の世界では磁石のN極とS極も入れ替わってしまいます。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



うんちく：ベクトルと擬ベクトル

- ▶ スカラー(大きさだけを持つ量)は何も替わりません
 - ▶ 質量、時刻、エネルギー、電荷…
- ▶ ベクトル(大きさと向きを持つ量)は、その符号が替わります
 - ▶ 位置ベクトル、速度ベクトル、加速度ベクトル、力、運動量…
- ▶ 擬ベクトルは、ベクトルと同じように大きさと向きを持ちますが、その符号は替わりません
 - ▶ 角運動量、磁場…



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しても区別できません
 - ▶ 重力(万有引力の法則)はパリティ変換しても区別できません
 - ▶ 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)はパリティ変換しても区別できません
 - ▶ 電磁力の法則は他にもたくさんありますが(マクスウェル方程式としてまとめられています)、すべてパリティ変換しても区別できないことが知られています
 - ▶ 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
 - ▶ つまり、P対称性が成立しているとき、宇宙人に左右の区別を通信で伝える方法はありません
-



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

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

- ▶ これらの変換は「少しずつ」変換することができません。そこで「離散変換」と呼び、こうした変換に対する対称性を「離散対称性」といいます
- ▶ P対称性は離散対称性の一つです。同じようにC対称性、T対称性も考えることができます



自然法則と離散対称性

▶ ニュートンの運動方程式と離散対称性

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

$$\mathbf{F} = m \frac{d^2 \mathbf{r}}{dt^2} \xrightarrow{C} \mathbf{F} = m \frac{d^2 \mathbf{r}}{dt^2}$$

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

- ▶ ニュートンの運動方程式においては P対称性だけでなく、C対称性もT対称性も成立しています



自然法則と離散対称性

▶ 万有引力の法則と離散対称性

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

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

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

- ▶ 万有引力の法則においては、P対称性だけでなく、C対称性もT対称性も成立しています



自然法則と離散対称性

▶ クーロンの法則と離散対称性

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

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

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

- ▶ クーロンの法則においては、P対称性だけでなく、C対称性もT対称性も成立しています



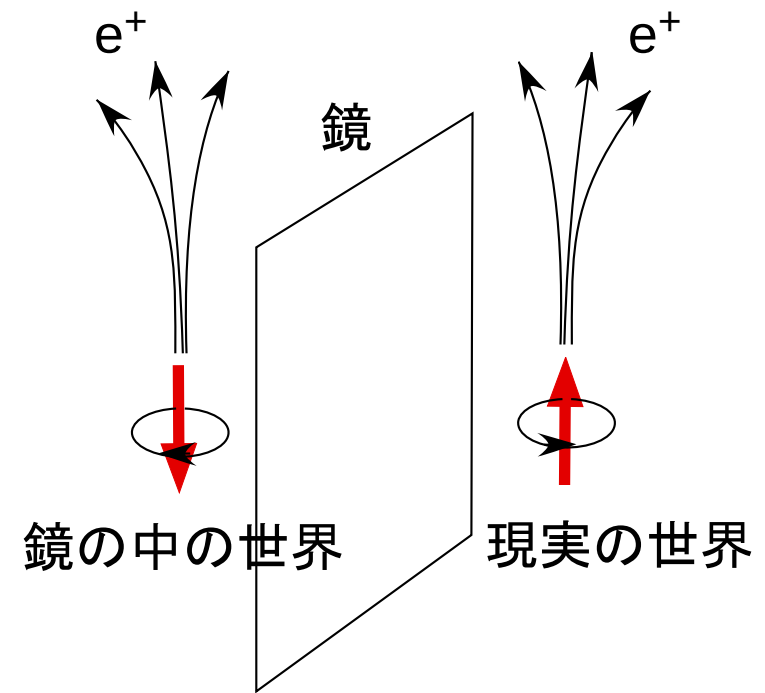
自然法則と離散対称性

- ▶ 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
- ▶ 重力と電磁力の法則については、P対称性、C対称性、T対称性のすべてが保たれています。
- ▶ つまり、重力と電磁力によって起こる現象だけを考えている限り、宇宙人に右と左の区別を伝えることも、電荷のプラスとマイナスの区別を伝えることも、時間の向きの区別を伝えることもできません（時間の向きが逆ならば会話はできないでしょうから、最後は問題にならないでしょうが）
- ▶ 「強い力」「弱い力」でもこれら3つの対称性はすべて保たれていると考えられてきました



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、くるくると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。

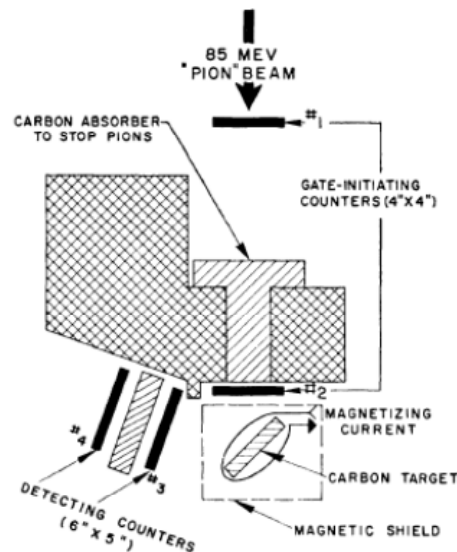


FIG. 1. Experimental arrangement. The magnetizing coil was close wound directly on the carbon to provide a uniform vertical field of 79 gauss per ampere.

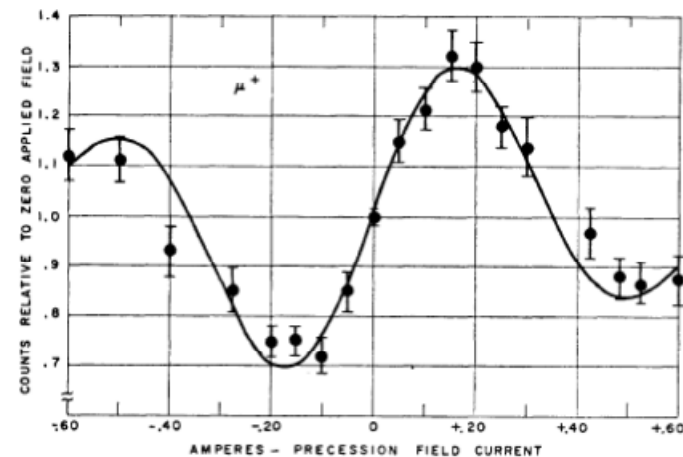
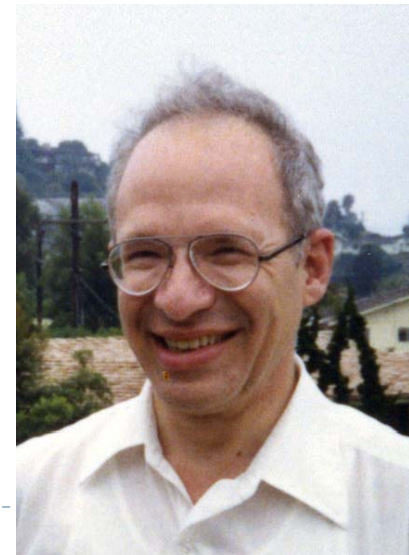
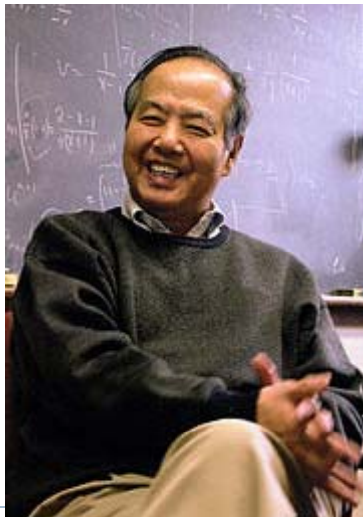


FIG. 2. Variation of gated 3-4 counting rate with magnetizing current. The solid curve is computed from an assumed electron angular distribution $1 - \frac{1}{3} \cos \theta$, with counter and gate-width resolution folded in.

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
 - ▶ Garwin はミューオンの弱い力による崩壊で

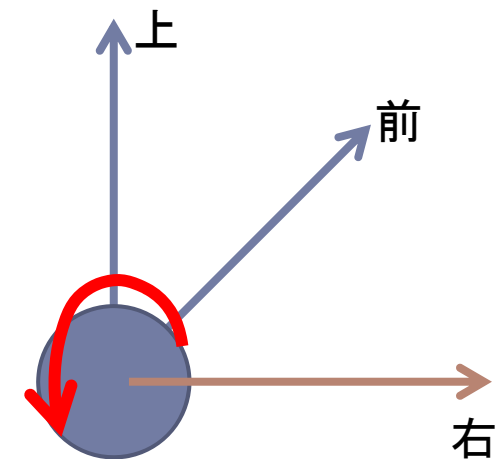


クイズその2の答

- ▶ 宇宙人と音声のみで通信している時、右と左を教える方法はあるのでしょうか？

可能です

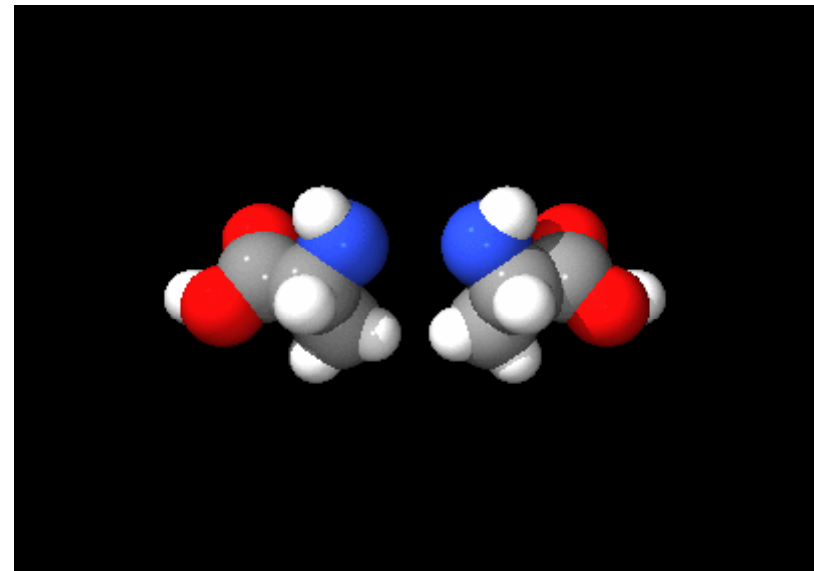
- ▶ 上と下を決めます
- ▶ 前と後を決めます
- ▶ 前から上の向きへ回っている方向に自転しているミュオンを持ってきてください
- ▶ ミュオンが崩壊して陽電子が出てきます。陽電子が出てきやすい向きが右です



自然界における対称性

- ▶ 物理の法則では、「ほとんど」パリティが保存されています。パリティが破れているのは「弱い力」だけで、その大きさは電磁力の 10^{-6} 程度でしかありません。
- ▶ にも関わらず、私たちの周りには左右非対称なものがたくさん存在しています。
- ▶ 代表例：生体分子の鏡像異性体
- ▶ 地球上の生命が利用できることができる有機化合物は、鏡像異性体のうち L-旋光性のみ
- ▶ 味の素の中に含まれるのは “L-グルタミン酸ソーダ”
- ▶ 普通に化学合成すると、L- も R- も同じ量だけ出来てしまう(化学反応はパリティを保存している)
- ▶ 地球上の生命体がなぜ L-旋光性をもつ分子だけを選択するように進化したのかは、今も謎です

アラニンの二つの鏡像(光学)異性体



クイズその2の答へのつっこみ

宇宙人：でも、ミューオンって何？

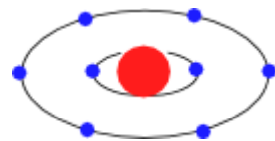
地球人：電子の仲間で、質量が電子のおよそ200倍の粒子で、電荷は電子の反対のものだよ

宇宙人：電子って何？

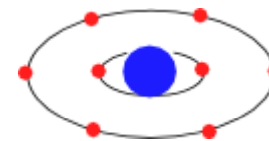
地球人：原子の中には真ん中に大きな塊（原子核）があって、周りを小さな粒子（電子）が回っているでしょ。その周りを回っている粒子だよ

宇宙人：ふーん…

ぼくらが考えている原子

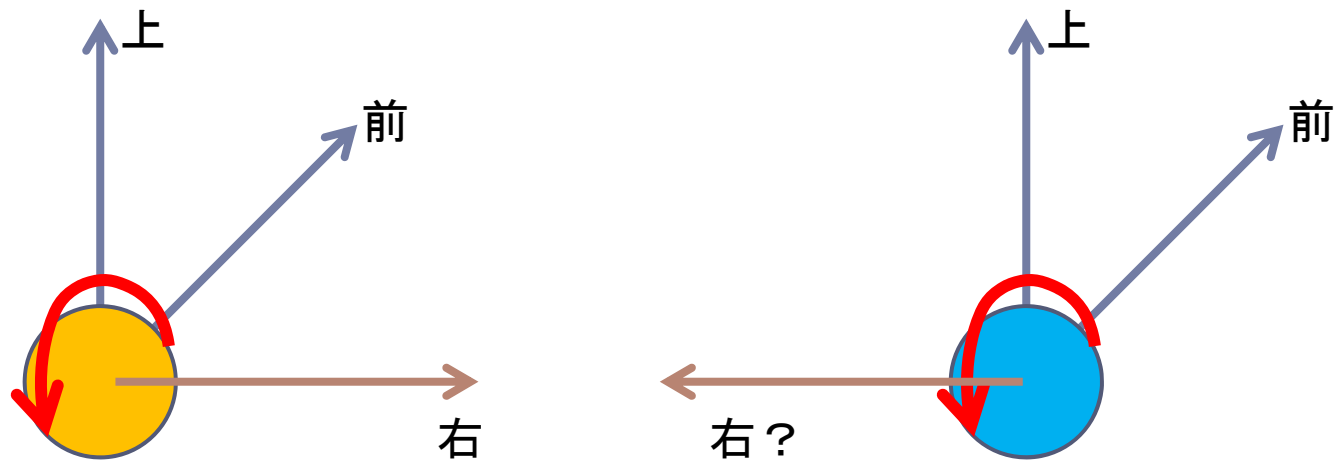


宇宙人が考えている原子



反粒子

- ▶ すべての粒子には「反粒子」が存在します
- ▶ 反粒子は粒子の反対の電荷を持ち、質量は等しい粒子です
- ▶ 反ミューオンから弱い力で放出される反陽電子(=電子)は、自転の向きと反対に放出されます
- ▶ もし、宇宙人が私たちと違って、反粒子から出来ている世界にいたとしたら…右と左を取り違えてしまう？
- ▶ 結局宇宙人に音声だけで右と左を教えるのは無理??



続きは来週

- ▶ 来週は CP対称性、CPT対称性の話をします
- ▶ 再来週(12/19)のこの時間は、私が教養学部の基礎科学学科の4学期リレー講義にあたっています。正式には「休講」の扱いになりますが、是非このリレー講義を聴講して感想を提出してください。リレー講義では、私たちの研究室がどんな研究をしているのかを紹介するつもりです。場所は来週お伝えします

