

3年生（情報ゼミ生）各自が興味をもって調べた話題を提供します。

2つの相対性理論 竹井 和也

双子のパラドックス 村田 誠弥

GPS衛星 土出 智也

相対性理論

- 相対性理論はアインシュタインによって発表された特殊相対性理論(1905年)と一般相対性理論(1916年)の総称。
- ニュートン力学の絶対時間や絶対空間の考え方を根本的に変えた。
- マクスウェルの理論を元とし、光速が不変という予測と、ニュートンの運動法則の矛盾をなくし、結果マクスウェルの理論が正確とした。
- なお特殊相対性理論は慣性系にのみ言及した制限付きで、特殊相対性理論を拡張したものが一般相対性理論である。

作成者 C07059 竹井和也

特殊相対性理論の成立

- かつて物体からみた光速は物体の速さにより変化すると思われた。そこで「エーテル」という媒質により光速が変化すると考えられた。しかし光速の差をはかるマイケルソン・モーリーの実験で光速の変化はエーテル説が否定された。光速が不変であり、時間・空間が相対的であるとされた。

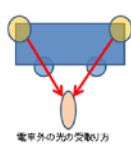


- 光速不変と相対性原理を原理としている。
- 光速不変は「光速は、どんな座標系で見ても一定」であるということである。
- 相対性原理は全ての物理法則は、任意の慣性系で同一の表現を持つという原理である。

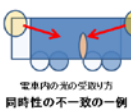
作成者 竹井和也

同時性の不一致、時間のおくれ、ローレンツ収縮

- ローレンツは「高速度で動く座標系では、2点間の距離は縮む」というローレンツ収縮を唱えた。「縮む」とは物体の中の観測者にとっての物体の進行方向の長さに対して、静止している観測者にとっての長さが小さくなることである。



- 特殊相対性理論により早く運動する物体では静止している物体に比べて時間が進む。これを時間の遅れという。



- 同時性の不一致とは同時刻に起こった現象が別の系では別時刻に起こること別の時間をもつ。例えば電車の先頭と最後尾から光が発射された時、電車内の人は先頭の光を先に受け取る。

作成者 竹井和也

一般相対性理論の内容

- 一般相対性原理いかなる座標系においても物理法則は不変である
- 一般共変性原理一般座標変換によって物理法則は不変である
- 等価原理 重力が働いている系でも、座標変換をすることで、慣性系にすることができる。
- 重力(質量)により時空は曲がっており重力が大きいほど時空が曲がる。
- 重力により時間の進む速度が変わる。



作成者 竹井和也

双子のパラドックス

- 特殊相対性理論より動いているほうが時間がゆっくり進むことが分かっている。
- 双子の兄弟がいて、弟は地球に残り、兄は光速に近い速度で飛ぶことができる宇宙船に乗って、宇宙の遠くまで旅行したのちに地球に戻ってくるものとする。
- このとき地球から見れば運動するのは宇宙船だが、宇宙船から見れば運動しているのは地球になる。
- では、時間が遅く進むように見えるのは宇宙船？それとも地球？また、双子が宇宙船と地球に別れて再会した時に、どちらがどれだけ年を取っているか悩むところである。このような疑問を『双子のパラドックス』という。
- ※パラドックス...「逆説」

特殊相対性理論のみで考える

- 例えば双子の兄が宇宙船で旅して、宇宙船の速さを光速の60%とし、星までの距離は片道3光年、往復で6光年とする。そうすると、宇宙船は10年で往復できる。※1光年、光が1年間に進む距離と定義され、その長さは約 9.46×10^{12} kmに相当する。
- そして、時間の遅れを求める式(1)を用いて計算すると差からみると宇宙船の中の時間が20%遅くなること分かる。つまり、弟が10年経っている間に兄は2年しか経っていないことになる。
- 双子なのに再会した時兄が弟より歳若いという矛盾が生じる。
- しかし、特殊相対性理論のみでは宇宙船が全て等速度運動という考え方なので現実的ではない。

$$T = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \dots(1)$$

特殊相対性理論+一般相対性理論で考える

- 兄が地球を飛び立ち、再び帰ってくるには、宇宙船を加速して地球を飛び立ち、その後減速して星を折り返し、地球で停止するなど何度も速度を変える必要がある。
- このような加速度運動をする場合には、等価原理よりその度ごとに兄は慣性力(見かけの力)を感じるはずである。一方、弟は地球にいる慣性力(見かけの力)を感じず、静止していたか等速度運動していたと考えられる。

- ※等価原理、ニュートンによると「加速しながら運動している場所から見ると、加速の向きと逆方向に『慣性力』という見かけの力が働く」となる。しかし、アインシュタインは慣性力を見かけの力と差別することなく「慣性力と重力は同じ」と考えた。

まとめ

- わかりやすく考えるために宇宙船のルートをも4等分して考える。
 - 期間A: 地球から地球と星の中間点まで加速する。
 - 期間B: 地球と星の中間点から星まで減速する。
 - 星を速度ゼロで折り返す。
 - 期間C: 星から地球と星の中間点まで加速する。
 - 期間D: 地球と星の中間点から地球まで減速する。
- 等価原理を使うと...
 - 期間A: ロケットの加速度運動によって地球方向への「見かけの重力」が生じる。すると、兄は強い重力にさらされるので、時間の進みが遅くなる。
 - 期間B: 重力の方向が逆転し、減速運動により星方向への「見かけの重力」が生じる。すると、兄は強い重力にさらされるので、時間の進みが遅くなる。
 - 期間C: 期間Bと同様に考えると全ての期間において兄は強い重力にさらされるので、時間の進みが遅くなる。

よって、特殊相対性理論のみで考えた時と同様に宇宙船に乗っている兄の時間の進みの方が遅くなり、地球で再会すると兄の方が若いという矛盾が起こる。

GPS衛星とは

- Global Positioning System(全球測位システム)の略で、元々は軍事用に開発された
- 高度20200kmに位置し、6種類の軌道面にそれぞれ4個、合計24個を基本としている
- GPS衛星は現在の航行位置と送信時間を受信機に送り、受信機は受け取った航行位置と送信時間、受信時間から受信機の現在位置を計算する
- 3つのGPS衛星との距離がわかれば、受信機の位置を計算できるが、実際には時間の誤差もあるため、4つのGPS衛星が使用される



GPS衛星

画像引用: Wikipedia

相対性理論とは

相対性理論には特殊相対性理論、一般相対性理論があり、それぞれ1905年、1916年にアインシュタインによって発表された

特殊相対性理論
『高速で移動するものは時間の進み方が遅れる』



GPS衛星は秒速約4000kmという高速で運動をしているため、特殊相対性理論により、1日に7.3マイクロ秒遅れる

一般相対性理論
『重力の弱い場所では時間の進み方が早くなる』



GPS衛星の航行している高度20200kmでは地上に比べて重力が弱くなるため、一般相対性理論により、1日に45.7マイクロ秒進む

合わせて(-7.3)+(45.7)=38.4マイクロ秒も進んでしまう計算になり、この間に電波は11kmも進んでしまう

この2つを考えないと
GPS衛星の運用に誤差が生じる



この誤差をなくすために、GPS内部の時計は1日に38.4マイクロ秒遅れるように設計してある



GPS衛星の運用には、相対性理論が大きく関係している