

素粒子と宇宙

2011年度 前期

(K302)

理学研究科・物理学専攻・素粒子理論

林 青司

授業のプラン

現代物理学の誕生と基本的な考え方

- 1.古典的物理学
- 2.ニュートン力学の限界
- 3.特殊相対性理論の誕生とその基本的な考え方
- 4.一般相対性理論の考え方と時間・空間の構造
- 5.エネルギーの量子化と量子力学の誕生
- 6.量子力学における新しい概念

素粒子と宇宙

- 7.素粒子とその相互作用
- 8.現代の宇宙論
- 9.ニュートリノと宇宙論、宇宙の暗黒物質
- 10.素粒子相互作用の対称性(CP対称性)と宇宙物質の起源

授業の進行

- 以下の個人ホームページ「講義内容」に、講義ノート、アナウンス等掲載予定：
<http://www2.kobe-u.ac.jp/~lim/sub4.html>
- 月末(祝日の場合は翌週)に、そこまでの授業ノートを配布。
- 質問は大歓迎。私語は厳禁。

成績評価

- 期末試験(自筆ノート持ち込み可) + 感想文(質問)の提出(不定期)
- 期末 : 感想文 = 6 : 4

参考図書

- 村山 斉 “宇宙は何でできているのか - 素粒子物理学で解く宇宙の謎”
(幻冬舎新書)

3

3

授業の進度:

・4/13 p11 ・4/20 p19 ・4/27 p21 ・5/11 p28 ・5/18 p36

第1部

現代物理学の誕生と基本的な考え方

1. 古典物理学

ビデオ#1 : ニュートンの法則 (17分)

ビデオ#2 : リンゴと月 (15分)

(古典物理学)

力学 : 力が働くとき、物体はどのように運動するか

重力の理論 : リンゴが落ちる。月、人工衛星が地球の周りを公転。

電気、磁気の理論 : 下敷きと髪の毛、磁石、電波 (電磁波)、光

(古典物理学における偉大な二人の物理学者)

• 力学 : ニュートン力学 (I. Newton(1642-1727)) , ニュートンの3法則

• 重力の理論 : ニュートンの万有引力の法則

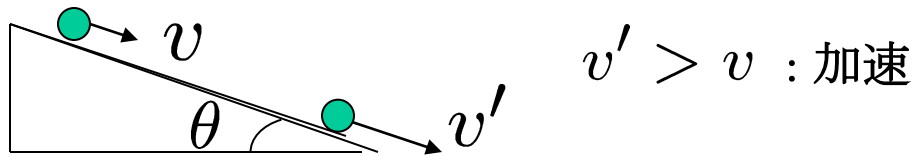
リンゴが地面に落ちるのも、月が地球の周りを公転するのも、普遍的な「万有引力」のため (→ 一般相対性理論)

- ・ 電磁気の理論： マクスウェル(Maxwell)の電磁気学
電気、磁気の法則を集大成 → マクスウェル方程式
→ 電磁波の存在 → ラジオ、テレビ、光（可視光、紫外線、X線、...）

(ニュートンの3法則)

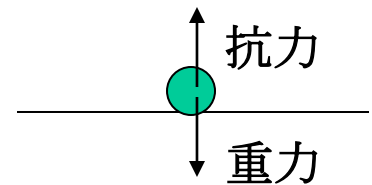
- ・ 第一法則（慣性の法則）：力が働かない物体は、等速直線運動をする。
でも、自動車のエンジンを切れば自動車は止まってしまう！？
→ 現実には自動車には「まさつ力」が働いている

ガリレオの思考実験



傾斜角 $\theta \rightarrow 0$ の極限では、 $v' = v$: 等速運動

ベクトルとして打ち消しあい、力 $\vec{F} = \vec{0}$



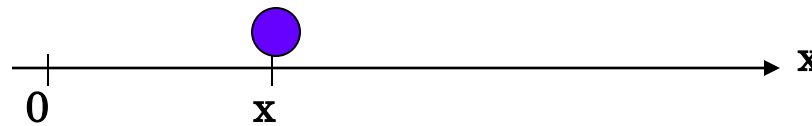
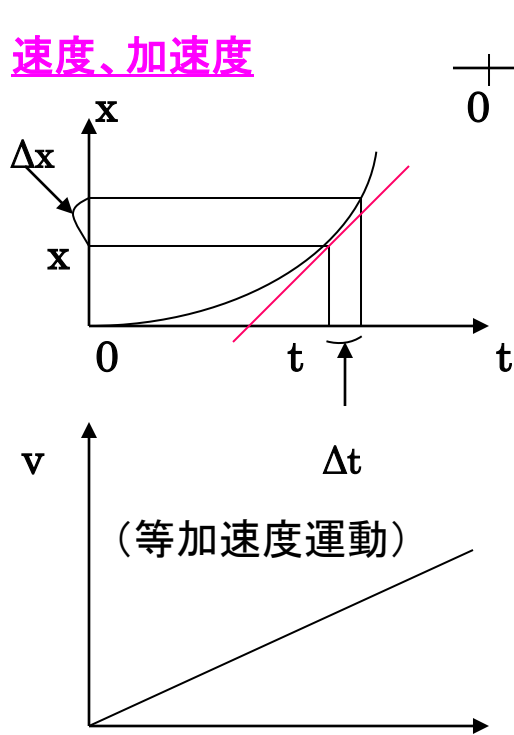
・第2法則： $\vec{F} = m\vec{a}$ (主役！) (m: 物体の質量、 \vec{a} 加速度)

力 \vec{F} をくわえると、物体の速さ(正確には速度 \vec{v} は、その力の方向に変化(加速度 \vec{a})する。その変化は、質量 m が大きい(重い)もの程、小さい。

$$\vec{F} \parallel \vec{a}, \quad a = \frac{F}{m} \quad (a = |\vec{a}|, \quad F = |\vec{F}|)$$

例えば、同じ力で小学生と白鷺を押してみる → 白鷺はほとんど動かない

速度、加速度



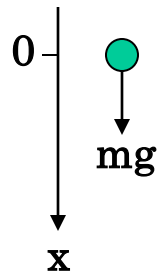
速度 = 単位時間あたりの距離の変化:

$$v \simeq \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad \rightarrow \quad (\Delta t \rightarrow 0) \quad v = \frac{dx}{dt}$$

瞬間的な速度：微分 (接線の傾き)

加速度 = 単位時間あたりの速度の変化
= 速度の微分 = 左図の直線の傾き

(例1) 自由落下 (リンゴの落下、ピサの斜塔での落下実験)



重力 $mg \rightarrow mg = ma \rightarrow$ 一定の加速度 $a=g$ で落下

$$\rightarrow v = g t \quad (t=0 \text{で} v=0)$$

$$\rightarrow x = \frac{1}{2} g t^2 \quad (g = 9.8 \text{ (m/s}^2\text{)} : \text{重力加速度)}$$

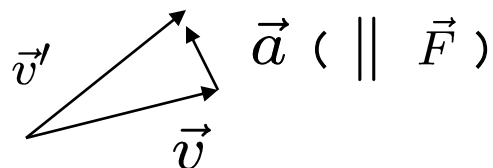
質量(重さ)に依らない(ピサの斜塔)

現実には(3次元)空間での運動 \rightarrow 速度: 運動している方向を向いた

ベクトル \vec{v} ($|\vec{v}| = v$: 速さ) \longrightarrow

加速度: やはりベクトル \vec{a}

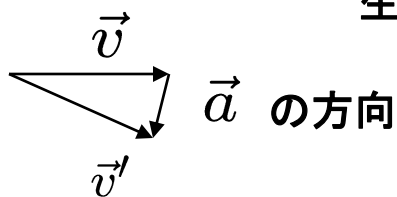
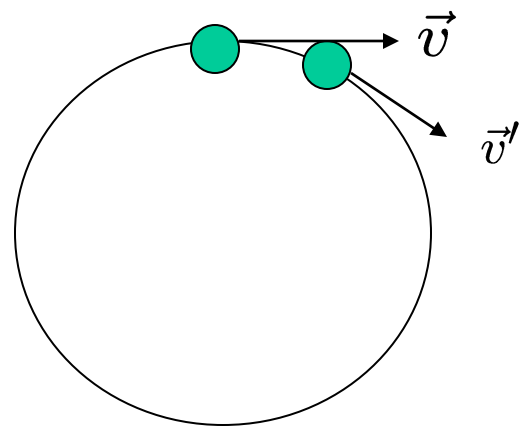
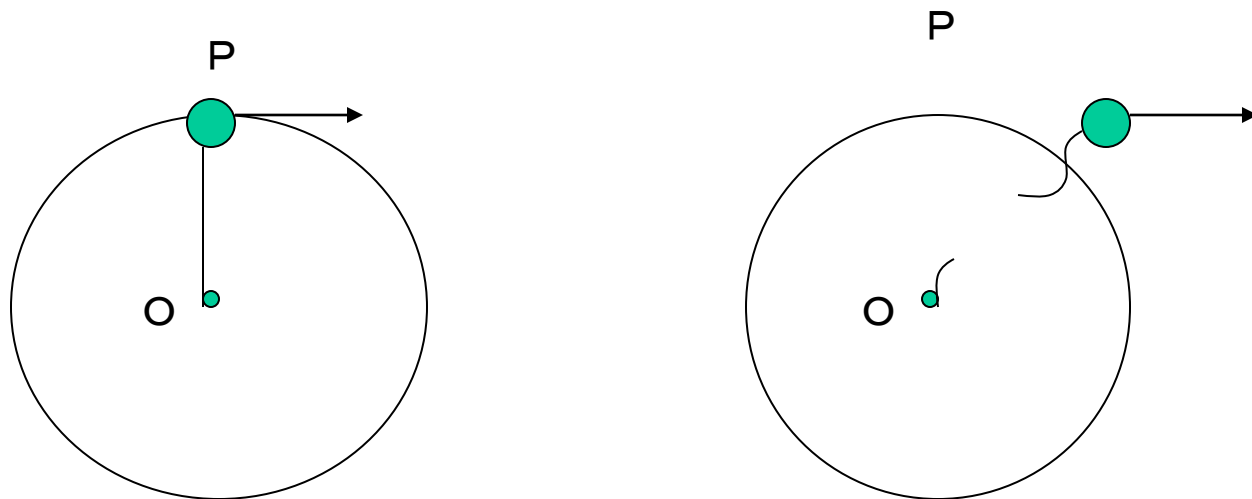
Δt の時間間隔の間に



$$(\vec{a} \simeq \frac{\vec{v}' - \vec{v}}{\Delta t} \parallel \vec{v}' - \vec{v})$$

例2) (等速)円運動

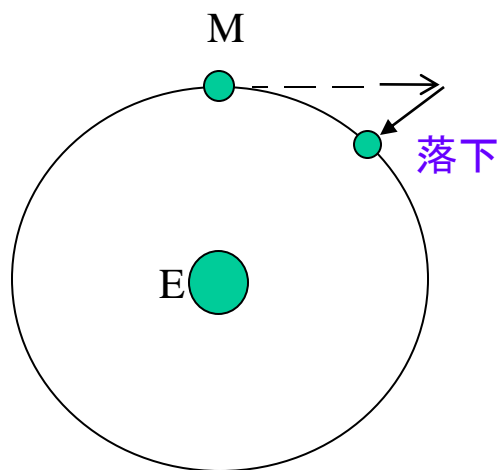
もしもPでひもが切れたら → 接線方向に飛び出し等速直線運動する(慣性の法則)



実際には、ひもによって中心方向に引っ張られるので(向心力)、中心方向の加速度が生じて、速度ベクトルが曲げられる

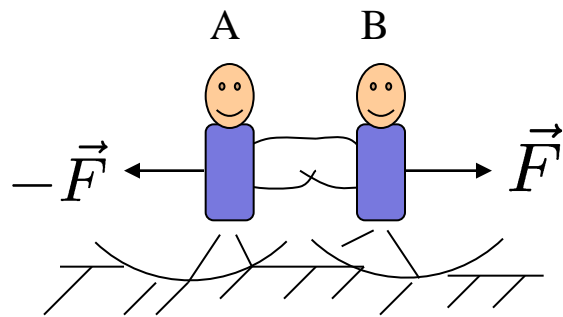
例3) 月、人工衛星の公転

円運動と仮定する。引っ張る力はひもの張力ではなく、地球と月や人工衛星の間の万有引力



月や人工衛星は、地上のリンゴ同様に、
いわば地球に向かって落下している
→ 人工衛星の中では、落下するエレベーター中と同様、
「無重力状態」となる。

・第3法則 (作用・反作用の法則)



AがBに \vec{F} の力を及ぼすと、

BもAに $-\vec{F}$ の力を及ぼす

(ガリレオ・ニュートンの相対性原理)

時速500km でまっすぐ飛んでいる飛行機の中を考える。窓を閉めれば、機内の人には自分がものすごいスピードで飛んでいることは分からない。また、コーヒーも地上と同じように飲める。

→ 飛行機の中の観測者と地上の観測者のどちらに対しても、物理法則は同じように成り立つ

慣性系

上記の飛行機内の観測者の様に、等速直線運動している観測者（静止している観測者も含む）を

「慣性系」

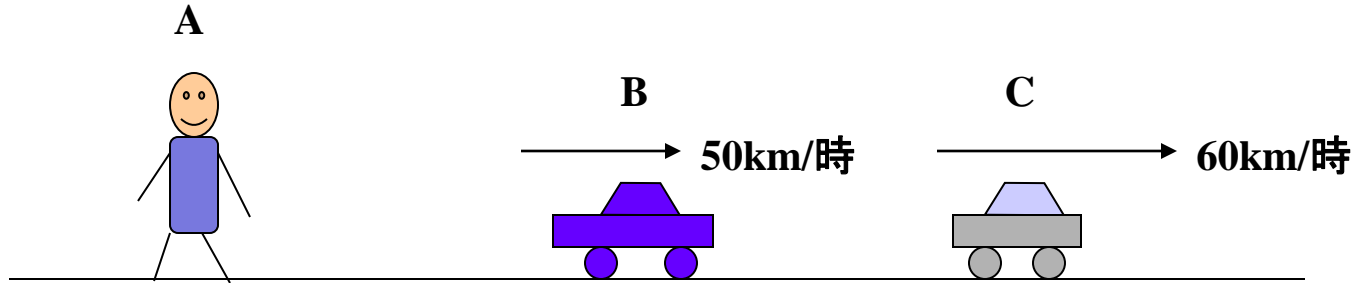
という。

ガリレオ・ニュートンの相対性原理

全ての慣性系は同等であり（どれかが絶対的という事はなく相対的）、
「全ての慣性系において物理法則は同じである。」

例1) 等速直線運動するふたつの自動車

地上の静止している観測者A, 時速50kmで走る自動車B, 時速60kmで走る自動車Cを考える。



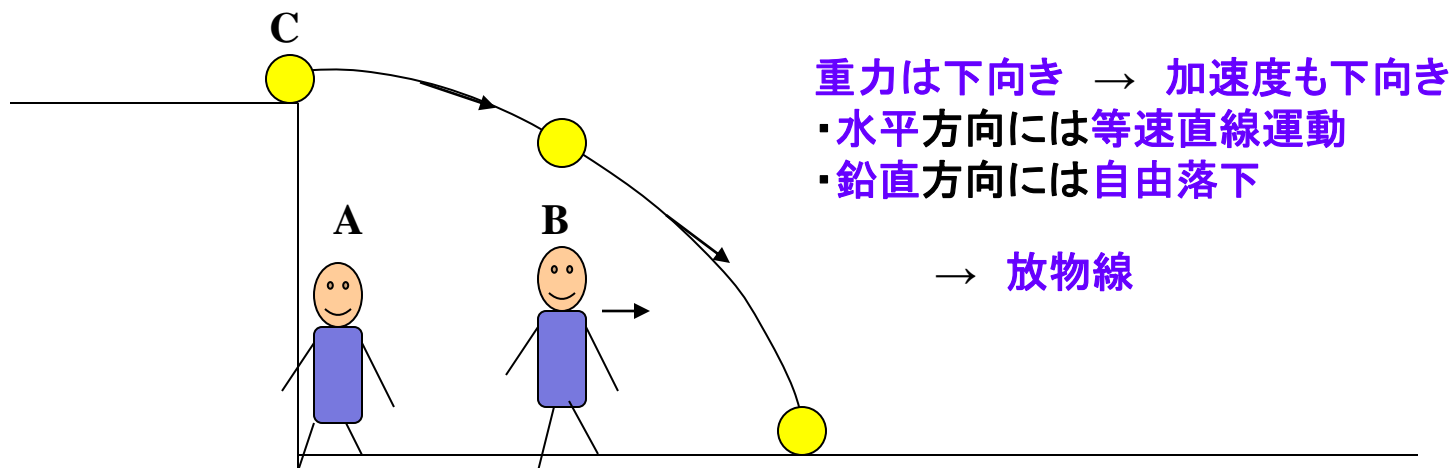
A, B はいずれも慣性系である。A, B からC の運動を見ると、それぞれ時速60km, 10km で運動しているように見えるが、等速である以上、いずれにせよ $a = 0$ であり、またCには力が働いていないので $F = 0$ 。よって、A, B いずれから見ても、C の運動に関して

$$F = m a \quad (m \text{ は } C \text{ の質量})$$

が成立。

例2) 水平投射 (放物運動)

高いところから水平に物体Cを投げ出す。地上の静止している観測者Aと、物体と共に水平に等速で運動する観測者Bを考える。



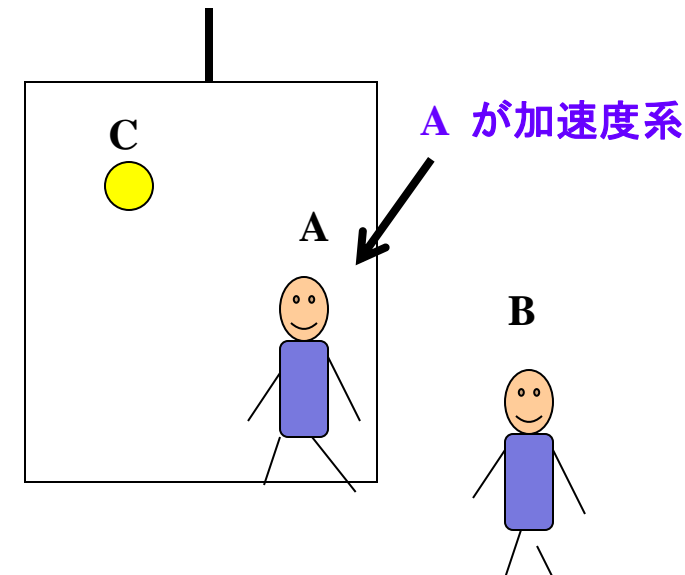
Aにとっては物体Cは水平投射されて運動していると、またBにとっては物体Cは単に自由落下している、と思える。A, B いずれにとっても $\vec{F} = m\vec{a}$ は成立している。

しかし、先ほどの例で、飛行機が加速を始めると、もはや安心してコーヒーが飲めない (!) 力が働いてもいないのに、シートに押しつけられる。

→ 加速運動している観測者、「加速度系」にとっては、 $\vec{F} = m\vec{a}$ は成立しない。

例3) エレベーターの中の観測者

エレベーターを吊るしているロープが切れてエレベーターとエレベーター内の観測者Aが自由落下を始めた。地上の観測者をBとしよう。エレベーター内でAと共に”落下”する物体をCとする。



Bから見るとCは単に自由落下しているだけ。しかし、Aから見ると、Cには重力が働いているはずなのに静止しているように見える。つまり、 $F = ma$ が成り立たない (あたかも無重力状態！) のように見える。)

スペースシャトルも地球に向かい落下していると考え、シャトル内が無重力に成るのが理解できる

2. ニュートン力学（古典的物理学）の限界

1.の自動車の例で見たように、静止している観測者（慣性系）と、これに対して等速で運動している別の観測者（別の慣性系）から見ると、観測しようとする自動車の速度は慣性系に依って異なる（相対速度）が、物理法則（ $F = ma$ ）はいずれの慣性系においても同じ様に成立した（ガリレオ・ニュートンの相対性原理）。

しかしながら、光の伝わる速度（光速度）については、こうした相対速度の概念が成立しないことが、Michelson と Morley の実験から明らかになり、古典物理学は変更を余儀なくされた。

→ A. Einstein による（特殊）相対性理論 の誕生

（Michelson – Morley の実験は何を目指したか？）

光はテレビの電波と同様に空間を波として伝わる： 電磁波

波： 振動を伝える媒質があるはず。例えば、

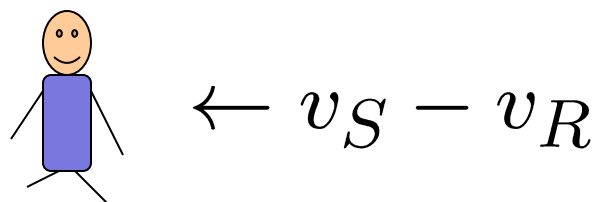
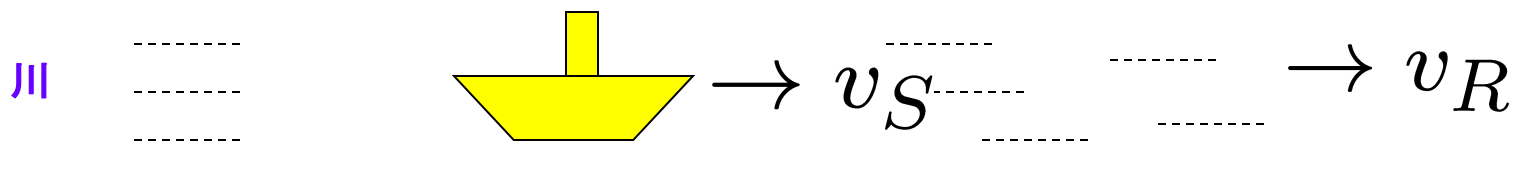
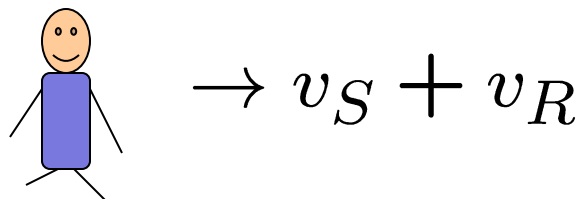
音波 → 空気、 水面に出来る波 → 水

光にもそれを伝える媒質があるはず → 宇宙を満たすエーテル(Aether)

しかし、地球は自転、公転しているので、エーテルに対して運動しているはず。

逆に、地球から見るとエーテルは一定の方向に風のように“流れて”いるはず。

よって、“**相対速度**”の考えに従うと、エーテル上をエーテルの流れと同じ方向に進む光と、エーテルの流れと逆方向に進む光では、地球から見た時の光の伝わる速さは違って見えるはず（速さ v_R で流れる川の上を川と同方向、および逆方向に速さ v_S で進む船の、川岸から見た時の速さは、それぞれ、 $v_S + v_R$ および $v_S - v_R$ → 下図）。



Michelson – Morley は、こうした進行方向による光速の違いを測定することでエーテルの流れる速さを測定しようとした。しかし、何度測定しても光速は、その進行方向に依らず、常に

$$c = 300,000 \text{ (km/s)}$$

である事がわかった。

→ 光の伝わる速度については、古典物理（ニュートン力学）で有効であった**相対速度**の概念が成立しない！

→ **古典物理学の破綻** ！！

(どこが“悪い”のか?)

再び、地上の静止している観測者A, 時速50km で走る自動車B, 時速60km で走る自動車C を考える。A から見ると1時間で、Bは50km、Cは60km 動くので、Bから見たCの移動距離は60 - 50 = 10km になるはず、と考える。良く考えると、この時、A とB に取り付けた時計では**時間は同じように経過**している、と仮定している（**時間の絶対性**）。また、BC 間の距離 10km はA とBどちらにとっても同じとも仮定している（**長さの絶対性**）。

A, Einstein は、大胆にも、こうした「絶対性」を捨て、同一のCの運動を観測してもその時のAとBの時計における時間間隔や、進んだ距離は違い得る、つまり**慣性系に依って相対的に変化する**と主張した。 → 「絶対性」の崩壊！ 「相対性理論」の誕生！ 18

3. 特殊相対性理論の誕生とその基本的考え方

ビデオ# 24 : マイケルソン・モーリーの実験

ビデオ# 28 : 特殊相対性理論 (25分)

A. Einstein は、時間間隔 (時計の進み方) も、2点間の距離 (長さ) も、見る慣性系に依って相対的に変わると考えた :

「特殊相対性理論」の誕生 !

古典物理では時間は絶対的 (どの慣性系の時計も同じ時刻を刻む) で特別であったが、相対性理論では、時間と空間は同様に扱うべき (互いに “混ざり合う”) : 我々の世界での出来事 (事象、event) は、時刻 t と空間の位置座標 (x, y, z) をあわせて

“時空間 (space-time)”

の座標 (x, y, z, t) で表すのが便利である。座標が4つに成ったという事は、時空間は言わば “4次元空間” と見なせる。

新しい理論を作るには指導原理が必要である。

(特殊相対性理論の二つの指導原理)

1. どの慣性系においても物理法則は同じように成立する
(ポアンカレの相対性原理)
2. どの慣性系からみても光速度はその進行方向に依らず一定
(光速度不変の原理)

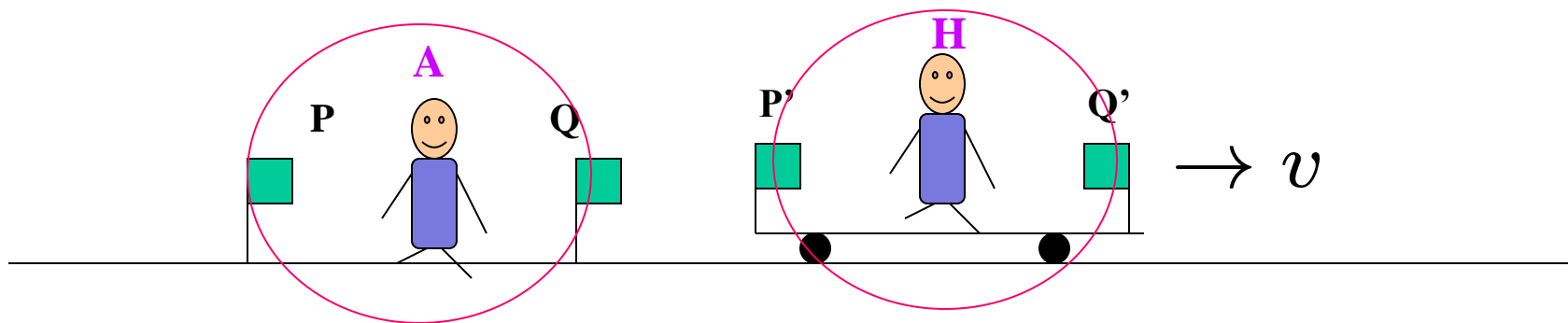
← New !

時間や長さの絶対性の喪失に伴って、色々な“非常識的な”現象が起きる。以下にその典型的な例（ビデオでも紹介）について説明する。

（同時性の喪失）

ビデオにならって、静止している観測者をアルバート（A）,これに対して速さ v で（トラック上を）右に運動する観測者をヘンリー（H）とする。

AとHの位置が一致した瞬間に、その位置で閃光（flush）が放たれたとする。光速度不変の原理から、AとHのいずれにとっても光は常に自分を中心に同心円状に広がる様に見える。しかし、二つの同心円の中心（AとH）は次第に離れていく！それでは、どの様にしてこんな一見矛盾する事が可能であろうか？（図）



更に、それぞれの観測者から見て、光は同時に自分の端の点P, QおよびP', Q'に到達するように見えるはず。一方で、例えばAから見ると、光はP, Qには同時に到達するものの、P', Q'には同時に到達しない（P'に早く到達する）ように見える。

→ 同時かどうかは慣性系に依る（同時性の相対性）！： 同時性の喪失

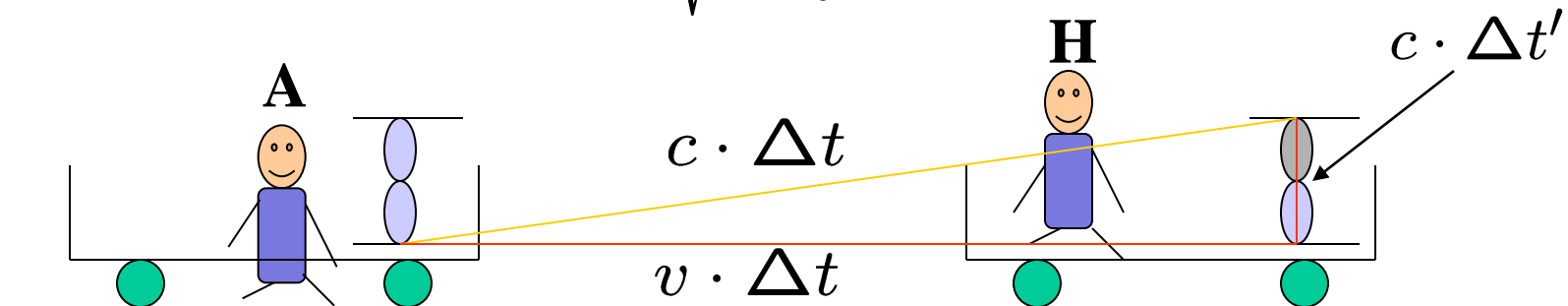
(動いている時計の遅れ)

ある観測者から見て、静止している時計より、動いている時計の方が遅れる（時間間隔が大きくなる）ように見える！

ビデオにならって、A, H に、光が上下に行ったり来たりすることで時を刻む時計をとりつけた場合を考える。Hから見ると自分の時計の下の点から出た光は時間 $\Delta t'$ の間に $c \Delta t'$ の距離だけ上に進む様に見えるが、Aからみると、Hの時計の光は（Hが右に速さ v で運動している為に）斜めに進むように見え、従ってより長い距離進むように見える。しかし光速不変の原理があるので、Aにとっての時間間隔 Δt は $\Delta t'$ に比べて大きくなる、と結論せざるを得ない。つまり下図から分かるように

$$(c \cdot \Delta t)^2 = (v \cdot \Delta t)^2 + (c \cdot \Delta t')^2$$

$$\Delta t = \gamma \Delta t', \quad \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} > 1 \quad (\text{ガンマ因子})$$



例) 素粒子ミューオンの寿命が延びる

宇宙線 (宇宙から降ってくる粒子の流れ、正体は主に陽子 p)

大気にぶつかりミューオン (その他にニュートリノも) を生成する :

このミューオンの寿命は、静止している時には、

$$= 2 \times 10^{-6} \text{ (秒)}$$

このままだと寿命が非常に短いので、例えばワシントン山の山頂で568 (個 / 時) ミューオンがカウントされるとすると、山の麓では、27 (個 / 時) しかカウントされないはず。

しかし、実際には、411 (個 / 時) カウントされ、寿命が延びている、すなわち飛んでいるミューオンの時計はゆっくり進んでいる事が実験的に確かめられた。

(ローレンツ収縮)

動いている物体の長さは、静止している時に比べて短いように

見える。 → ローレンツ収縮

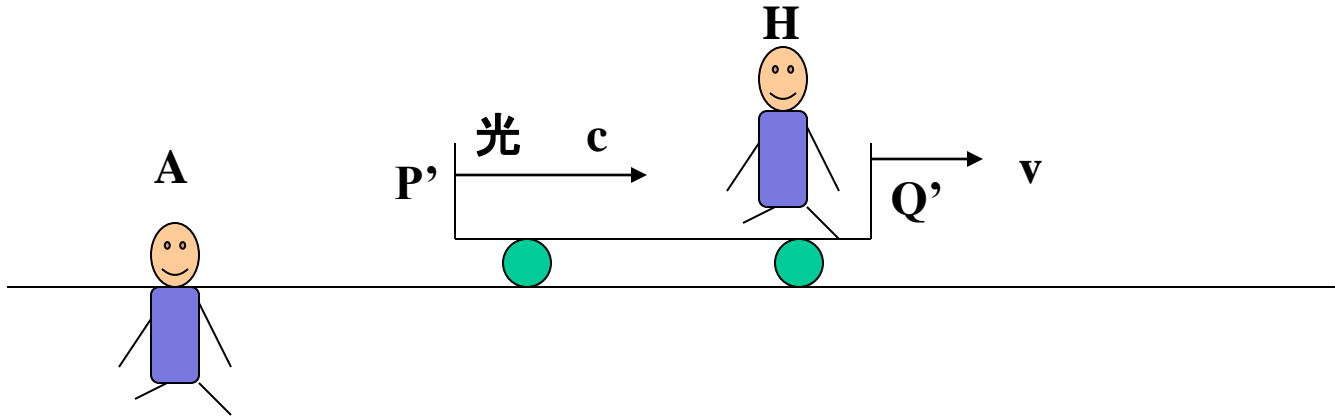
ビデオにならないA, H のそれぞれの検出器の間の距離、PQ, P'Q'

を考える。A, H が共に静止している時には $PQ = P'Q'$ であったとする。H がA に対して速さ v で右に動き出すと、A から見ると

$PQ > P'Q'$ である様に見えるが、H から見ると逆に $PQ < P'Q'$ であるように見える。?????

(ローレンツ収縮の説明)

Hの両端の点P'とQ'の間を光が往復する場合を考える。



Hから見るとP'Q' = L' (“本来”の長さ)に見えるとする、Hにとっては、光は

$$\Delta t' = \frac{2L'}{c}$$

の時間で往復すると思う。一方Aから見ると、行きの時間の方が帰りの時間より長くかかる (“追いかけ算”) ので、LをAから見たP'Q'の長さとする、

$$\begin{aligned}\Delta t &= \frac{L}{c-v} + \frac{L}{c+v} \\ &= \frac{2cL}{c^2 - v^2}\end{aligned}$$

これらの比をとれば、

$$\frac{\Delta t}{\Delta t'} = \frac{1}{1 - \frac{v^2}{c^2}} \cdot \frac{L}{L'}$$

一方、動いている時計は遅れる、という事から、

$$\frac{\Delta t}{\Delta t'} = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

この二つの関係式から

$$\frac{L}{L'} = \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = \frac{1}{\gamma} < 1$$

よって、

$$L < L' \quad \text{ローレンツ収縮}$$

例) 200 (km/時) で走行している長さ100 (m)の新幹線では、
 $L' - L = 1.7 \times 10^{-12}$ (m) (ほぼ原子核のサイズ) だけ縮む。

(速度の合成)

古典の力学では、例えば $v_1 = 70$ (km/時) で走る自動車から $v_2 = 20$ (km/時) で逆向きに走る自動車 (慣性系) から見た時の相対速度 v は、

$$v = v_1 + v_2 = 90 \text{ (km/時)}$$

となり、単純な速さの足し算なので、いくらでも速い相対速度を実現可能。

しかしながら、相対性理論では相対速度は単純な速さの足し算ではなく、**速さは決して光速を超えない**、という驚くべき結論になる。即ち、相対性理論では、相対速度の式は次のように変更される(説明省略)：

$$v = \frac{v_1 + v_2}{1 + \frac{v_1 v_2}{c^2}}$$

(注)

- v_1, v_2 が光速より十分に小さい時には、近似的に $v = v_1 + v_2$ となり、古典物理の結果と一致する。
- 上式は両辺を光速度 c で割ると以下の関係と良く似ている

$$\tan(\theta_1 + \theta_2) = \frac{\tan \theta_1 + \tan \theta_2}{1 - \tan \theta_1 \tan \theta_2}$$

(正確には三角関数でなく、“双曲線関数” $\tanh \theta$ の関係と同じ。)

この関係式より、もしも元の速度 v_1, v_2 が光速 c より小さければ、相対速度 v も必ず光速 c より小さい、という事を示す事ができる（不等式の証明 → 各自トライしてみる）。

例えば、 $v_1 = 0.7c$, $v_2 = 0.8c$ (c は光速) の場合、単純に足すと $1.5c$ となり光速を超えるが、上の正しい式を使うと、 $v = 0.96c$ となって光速を超えない事がわかる。

(質量とエネルギー)

古典の力学では、静止している物体はエネルギーを持たない、つまり $E = 0$ であると考えている。しかし、**相対性理論では静止していても**

$$E = m c^2$$

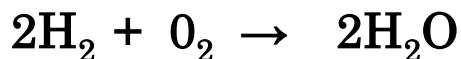
というエネルギーを持つと考えられている（説明省略）：

「質量とエネルギーの等価性」

例えば、 $m = 0.25$ (g) （“天使と悪魔” で盗難にあった“反物質”の量）の場合、そのエネルギー E は、100ワットの電球が1時間に放出するエネルギーの約7500万倍、という膨大なものである。

では、何故こんな膨大なエネルギー を無視していて、古典物理学では問題が生じなかったのだろうか？

その答えは、20世紀初めまでに発見されていた化学反応では、「質量不変の法則」があり、



といった分子の変化（原子核は変化しない）が起こっても、質量の総量は変化しない為。よって、この質量によるエネルギーは変化せず、最初からこのエネルギーが存在しないと考える場合と何ら変わらないのである。

丁度、非常に高い山の上（位置エネルギーは大きい）をスキーヤーが滑る場合でも、高度が変わらなければ、低い平地を滑る場合と同じで運動エネルギーは得られない、というのと同様。

→ 質量が減少するような反応があれば、エネルギーを取り出せるはず（高い所から落下する水により水力発電が可能である様に）。

実際、原子核の反応（核分裂、核融合）では、こうした質量の減少が起こっている → 原子爆弾や原子力発電の原理。

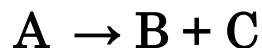
（注）“天使と悪魔”の場合の様に、素粒子の世界では質量が減るだけでなく、完全に消滅する事が可能 → 非常に莫大なエネルギー

例えば0.25グラムの反物質が等量の物質と出会って消滅すると、原爆と同等のエネルギーを放出！

(素粒子の生成・消滅)

既に“天使と悪魔”の例で述べたが素粒子の世界では、質量が減るだけでなく素粒子が完全に消えたり（消滅）、逆に作られたり（生成）する反応が可能 (!)

例として、ある素粒子A が別の素粒子 B とC に崩壊(decay)する (Aが消滅し、BとCが生成される) 反応



(例: $\pi^- \rightarrow \mu + \bar{\nu}_\mu$ 宇宙線が大気にぶつかり起きる。パイは素粒子ではないが)

を考える。A, B, C の質量をそれぞれ m_A, m_B, m_C と書く。すると、もしも

$$m_A > m_B + m_C$$

であれば（反応で質量の総和が減少）、質量のエネルギーがこの反応で減少するので、その分だけ運動エネルギーが放出される。逆に言えば、この条件が成り立つ時にのみ崩壊が起こり得る事がわかる。

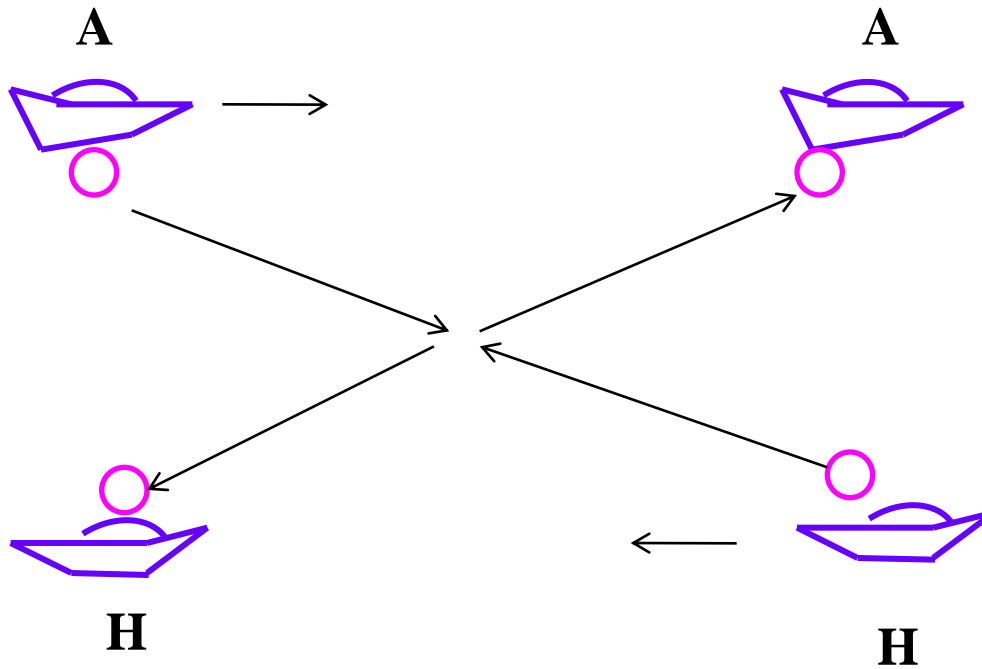
→ 軽い素粒子は重い素粒子には崩壊出来ない！

(スロープの途中で静止したスキーヤーは下ることは出来るが登れない)

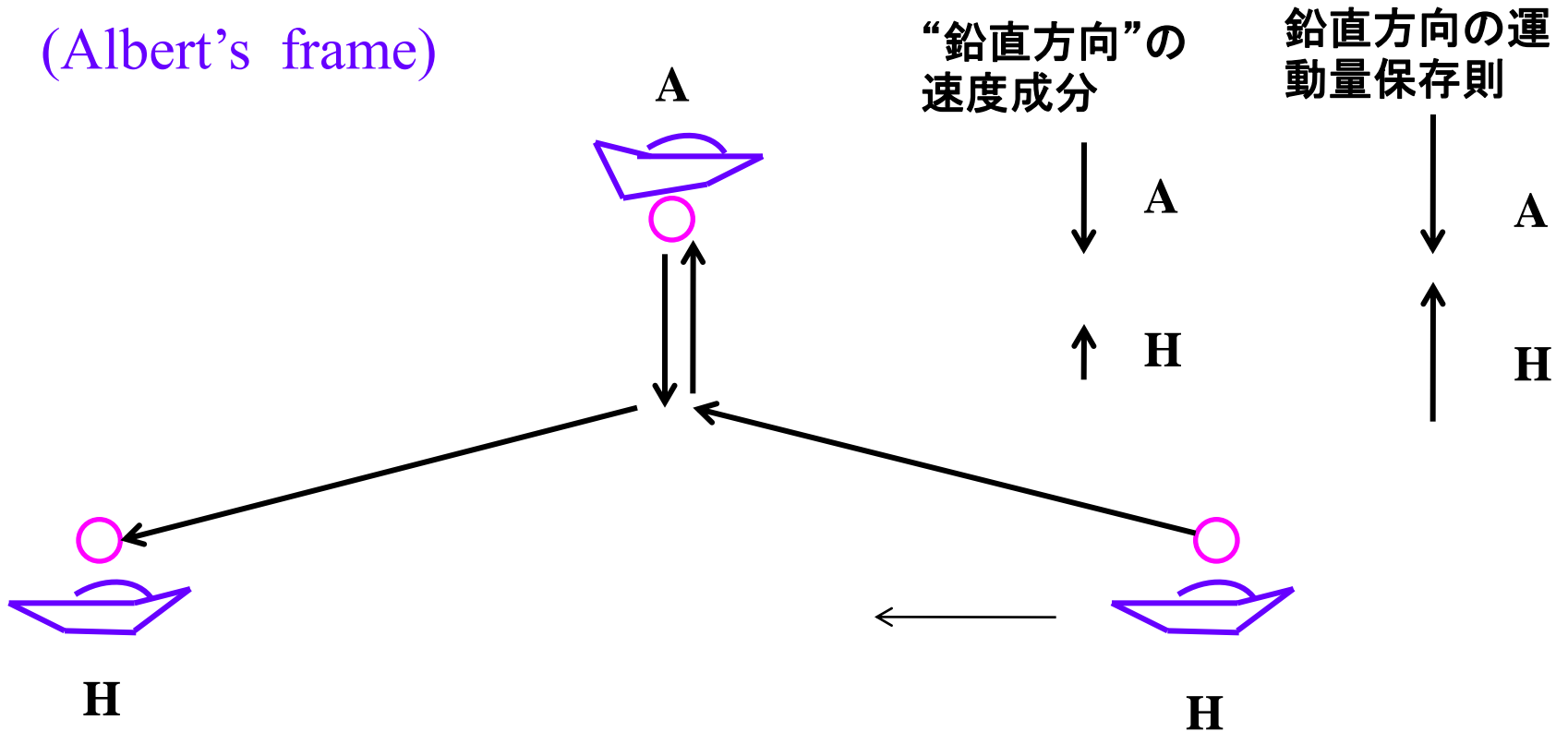
(動く物体の質量の増加)

ビデオで説明されていたように、動いている物体の質量は大きくなる（重くなる）と考えられる。

“宇宙玉突きゲーム” (spectator's frame)



(Albert's frame)



Albert から見ると、Henry のボールの往復時間の方が、自分のボールの往復時間よりずっと長い(動く時計の遅れと同じ)

- 自分に対し運動しているHenry のボールはあまり曲がらない
- Henry のボールの方がずっと重いと結論せざるを得ない !

速さ v で動いている物体の質量は

$$\frac{m}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} = \gamma m$$

のようにガンマ因子の分だけ大きくなる。（ v が c に近づくと非常に大きな質量になる。）

これに c^2 をかけると、運動している物体の持つエネルギーは

$$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$$

となる。 $v = c$ とすると、エネルギー E は無限大となる

→ 物体を光速まで加速できない

（例外： 質量ゼロの粒子（光子、ニュートリノ？））

→ 物体の速さは光速を越える事は出来ない。

4. 一般相対性理論の考え方と時間・空間の構造

特殊相対性理論の問題点：

- a. 慣性系（一定の速度で運動する観測者）についてのみ適用可能
- b. 万有引力の法則と相入れない

実際、太陽と惑星（水、金、地、火、、、）の間の万有引力は、遠く離れた2点間に瞬時に働く力（遠隔作用）であると思われていたが、「瞬時」という事であれば力は光速を越えて伝わる事になってしまう

→ 相対性理論の考えと矛盾

アインシュタインはこうした問題を解決するために、特殊相対性理論を一般化し、

「一般相対性理論」

を作り上げた。

この理論（一般相対論と略称）では、

- ・物理法則は（加速度系を含めた）全ての一般の観測者に対して同じように成立する。

- ・古典的な万有引力の法則を修正し、

「物体に働く重力は、それを観測する観測者が加速度系であることによって生じる

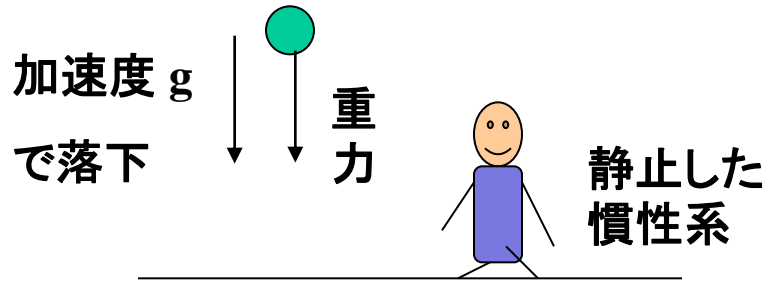
“見せかけの力”（慣性力）と等価である」

と考える。これを

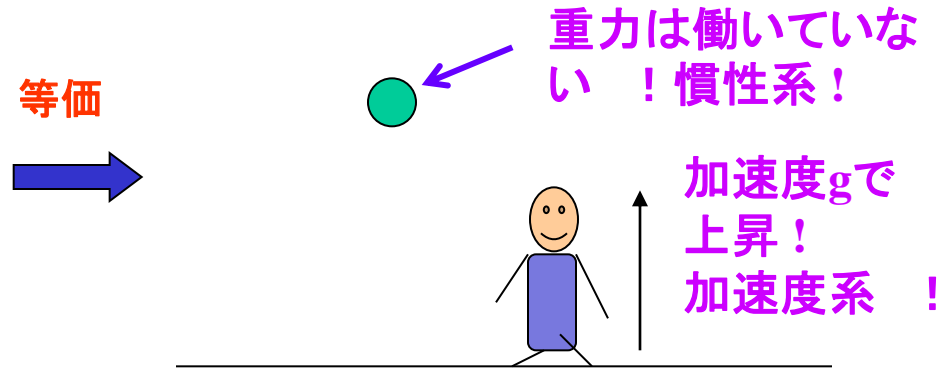
「**等価原理**（equivalence principle）」

という（図）。

(万有引力による見方)



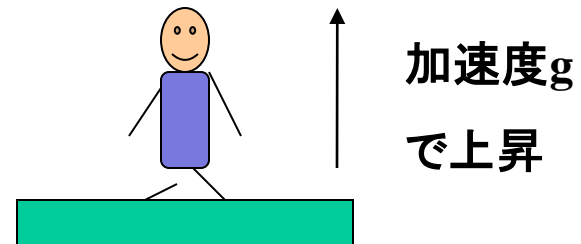
(一般相対論の見方)



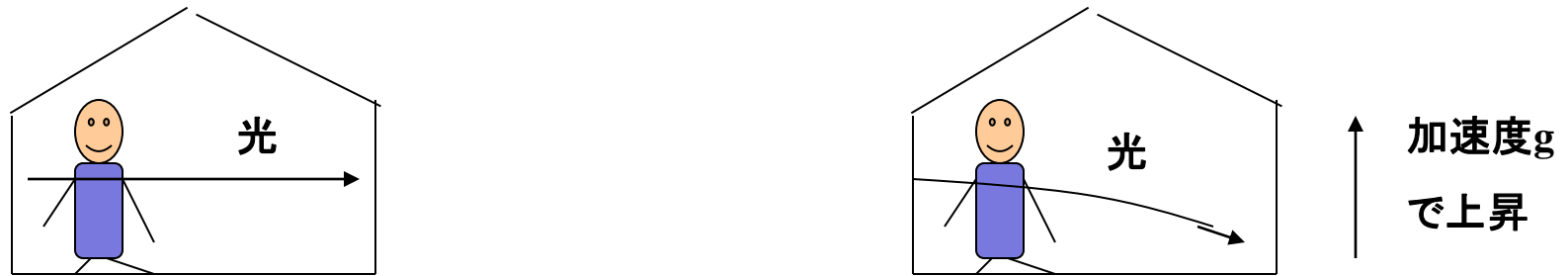
等価原理とピサの斜塔

等価原理によれば、ピサの斜塔から落下する物体がすべて同じように（同じ加速度で）落下するのは当然。

← 上向きに加速度 g で上昇する観測者（加速度系）から見ると
当然全ての物体は下向きに加速度 g で落下する、という事（下図）：



こう考えると、地上の観測者(加速度 g で上向きに加速している加速度系)から見ると、光さえも“地球に向かってわずかに落下”するはずである。即ち、あたかも重力で地球に引っ張られる様に見える。これは、例えば、宇宙空間に浮かぶ宇宙船中で直進していた光が、宇宙船が上向きに加速を始めると下向きに曲がるのと同じ現象、と考えられる(下図):



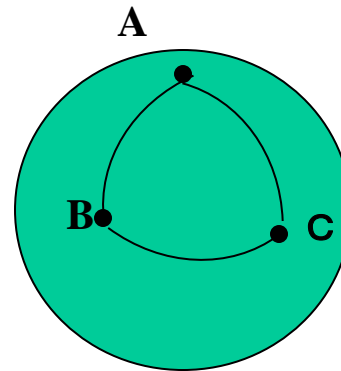
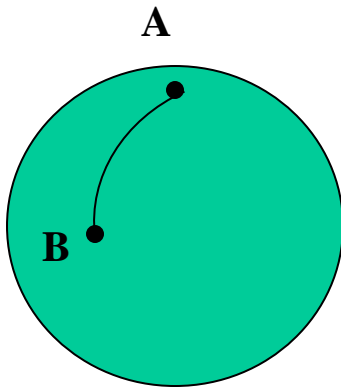
しかし、光のような質量の無いもの(量子力学(後出)では光は光子という質量ゼロの粒子として振舞う)が何故重力の影響を受けるのか「万有引力」では理解できない。不思議。

アインシュタインは、これは地球のような質量を持った物体の周りでは空間(時空)が歪む、即ち平坦な空間でなく曲がった空間になる為と考えた。

そこで、以下少し曲がった空間について考えてみよう。

例) 曲がった平面 (2次元の球面、“地球儀上の空間”、風船の表面)

例えば、地球儀の上で生まれて以来ずっと暮らすアリがいたとすると、アリにとっては、地球儀上の2点を結ぶ直線は、これを結ぶ最短の線、いわゆる大円に沿った曲線であり、2点間の距離は、この曲線の長さである、と考えるであろう (下図左) :



(注) 大円とは、2点と地球の中心を含む面で“切った”時に出来る円

すると、地球儀上に書いた“直角”3角形 (上図右) の3辺の長さ、AB, BC, CA については、

$$AB^2 + BC^2 \neq CA^2$$

つまりピタゴラスの定理が成立しない

また、球面上の三角形の内角の和は180度ではない。上の例では、内角の和は270度。 → 球面が曲がった空間であることを示している

こうした球面上の“異常な”幾何学： 非ユークリッド幾何学

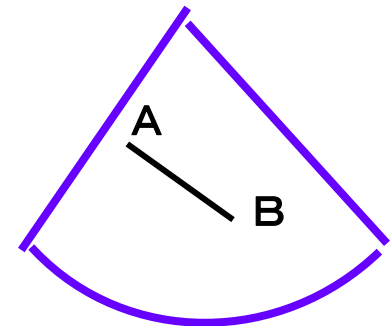
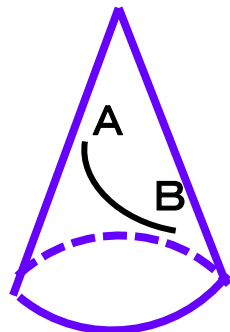
曲がった空間(curved space)と平坦な空間(flat space)の本質的違い

・球面(曲がった空間)

展開出来ない

・円錐(平坦な空間)

展開出来る



展開可能



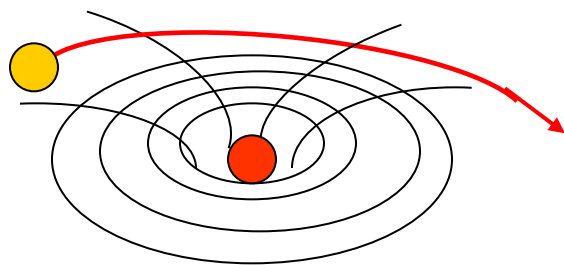
- ・ピタゴラスの定理が成立
- ・三角形の内角の和は180°

一般相対論では、質量（エネルギー）の存在する空間（時空間）は一般にピタゴラスの定理の成立しない曲がった空間である、と考える：

（古典物理で重力の存在する空間 → 一般相対論では曲がった空間）

質量をもった物体のまわりの空間は曲がり、“くぼみ”が出来る。

→ その傍らを通過する物体（光さえも！）の進路は曲げられる（下図）：



古典物理

質量を持った2物体間に働く万有引力の為に進路が曲げられた、と考えた



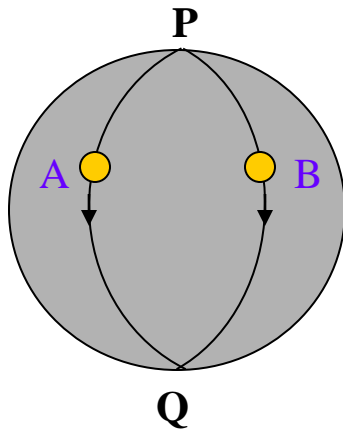
一般相対論

通過する物体には力は働いていないので、（慣性の法則同様）単に曲がった空間での“直線”（測地線）に沿って運動

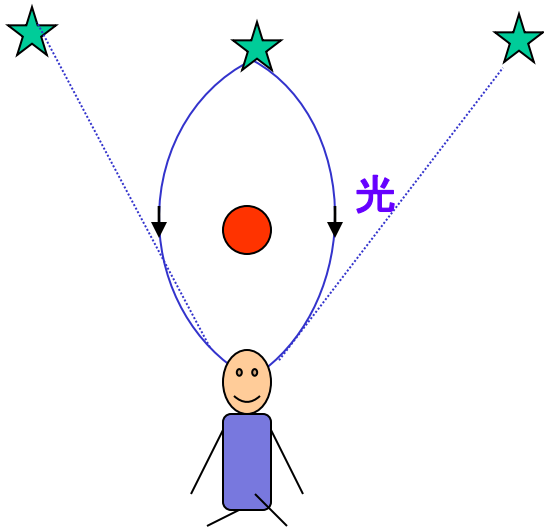
（注）曲がった3次元空間をイメージすることは難しい（出来ない）

(違う方向に投げ出されたボールがぶつかる?!)

曲がった空間の例として、(2次元)球面(地球儀の表面)を考えよう。ある点Pから違った方向に二つのボールA, Bが投げ出されたとする。A, Bはそれぞれ大円(球面上での“直線”)に沿って運動するが、二つの大円は必ず交わるので、**A, Bは又再びQで再会する!**(下図) :

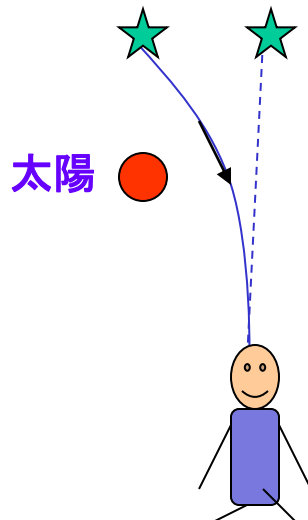


同様に、ある星から異なる方向に出された光線が重い星の両脇を通過したとき、重い星による重力の為に空間が曲がり、通過後に光線が交わることがある(下図) :



こうした現象を「**重力レンズ効果**」と言い、実際に星が2個に分裂して見えることがある事が確認されている。

(有名な一般相対性理論の検証) 皆既日食の時に、太陽付近に現れる星の位置は、太陽の重力による光の湾曲で、太陽がない時の位置からずれる様に見える事が期待される (図) :



一般相対性理論により **1.75 秒** の角度だけ星の位置がずれる事が予言され、実測によりこの予言が正しい事が示され、一般相対性理論を有名にした。

ブラックホール

ビデオ#16： 「曲がった空間とブラックホール」

非常に重くて高密度の星の場合には、その周りの時空間が大きく歪められ、星の中心から一定の距離 a (“粒子の地平線”) 以内には光が入り込めない (その距離まで到達するのに無限の時間がかかってしまう！)。

また逆にその“地平線”内から出発した光は決して外部には出て来れない。つまり遠くから見ると星の中心からの距離 $r < a$ の部分 (地平線の内部) は暗黒の穴の様に見える

→ ブラックホール

「一般相対性理論」：

- 曲がった時空上を物体 (光を含め) がどのように運動するか (進むか) を決定：

測地線方程式

時空 → 物体 (光)

- 逆に、物体や光の存在で時空がどのように曲がるかを決定：

アインシュタイン方程式

物体 (光) → 時空

我々の宇宙も、一般相対性理論によって決定される !

アインシュタイン方程式：

時空間の構造（曲がり方）やその時間変化（“進化”）を決定する方程式

→ 我々の存在する空間全体である「宇宙」の構造、およびその“歴史”
と“運命”をも決定 !

“Big Bang 宇宙論”： アインシュタイン方程式の解として得られる

我々の宇宙は、（ほぼ）1点に集中した膨大な質量の、超高温の物質が爆発的に膨張し、急激に冷えて（クーラーの原理と同じ）形成された。

（注）

宇宙の膨張は、ちょうど上方に投げ出されたボールが重力を受けながら運動するのに似ている。宇宙の運命（膨張が止まり収縮に転ずるか、膨張を続けるのか）は宇宙に存在する物質の密度により決まる。

実際には、**ダークマター、ダークエネルギー**も強く関与。

宇宙（少なくとも生まれたての“初期宇宙”）は、膨大な質量の物質による非常に強い重力で空間が大きく曲がり、風船のような曲がった空間になる（ただし3次元）。宇宙（“風船”）のサイズや曲がり方、膨張の仕方はアインシュタイン方程式によって決まる

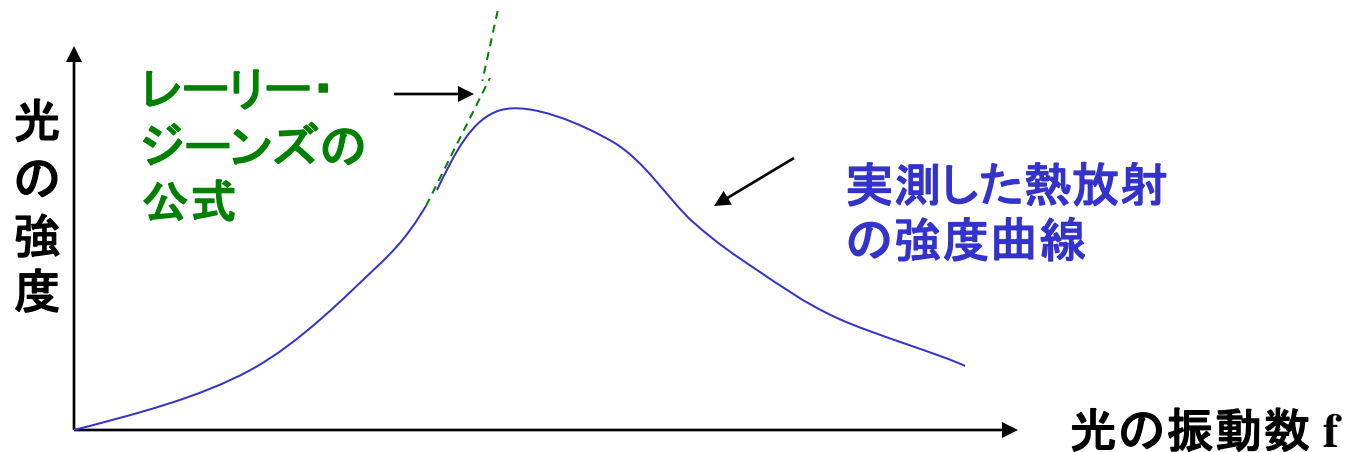
5. エネルギーの量子化と量子力学の誕生

ビデオ# 25 : 光の波動性、ビデオ# 26 : 波動と粒子の二重性

熱放射と古典物理学の破綻

熱せられた熱い物体（白熱電球のフィラメント、遠くの恒星、等）からは、その温度に応じた色（振動数）の光が発せられる：**熱放射（黒体輻射）**

19世紀末のドイツで、「溶鉱炉の温度を、炉中の光の色から判断する」という問題が提起され、物理学者が取り組んだが、古典物理学を用いた結果（**レーリー・ジーンズの公式、等**）では現実をうまく説明出来なかった。特に高い振動数の光の強度が何故弱く成るのか説明が出来なかった。また、振動数が高い極限で光の強度が発散する！（下図）。



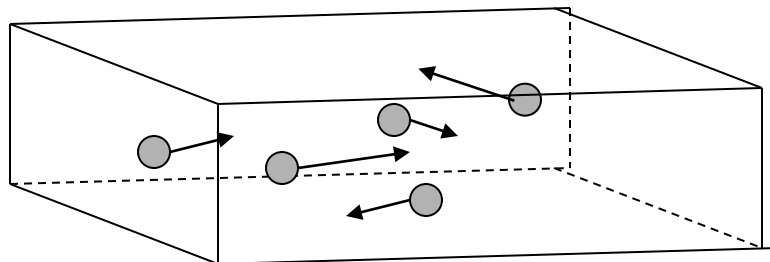
M. Planck の公式 (1900年) とエネルギー量子の考え方

—量子力学の誕生—

(温度とは?)

気温が高い、と我々が感じるのは、空気をつくっている酸素と窒素の分子の運動がそれだけ激しい、つまり運動エネルギーが高い、という事。例えば、容器に入った気体の分子の運動を考える (下図) と、実は勝手ばらばらに運動していて、個々の分子は色々な大きさの運動エネルギーを持っているが、その平均値は、絶対温度 T に比例する：

$$\langle E \rangle \sim k T \quad (k: \text{ボルツマン定数})$$

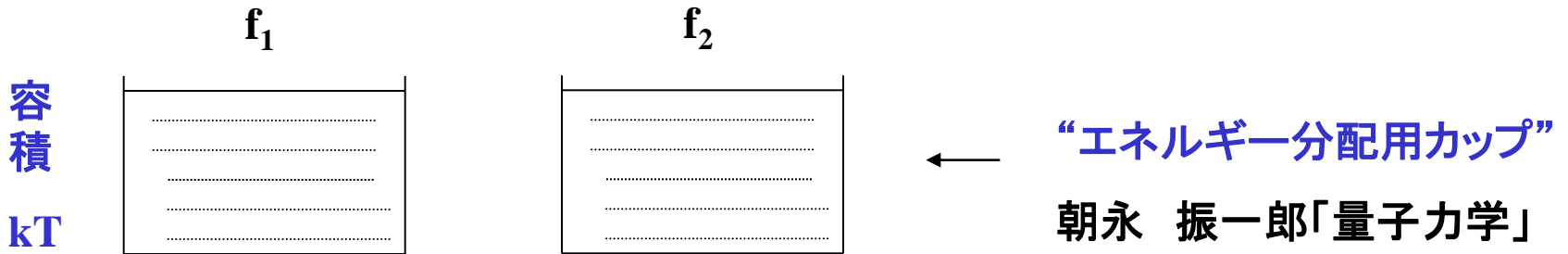


つまり、絶対温度ゼロ度（摂氏 -273 度）の時は、分子は運動しない。

言葉を換えると、古典物理学では、絶対温度 T の場合には、気体の分子には、分子の種類によらず、平均ほぼ kT のエネルギーが分配される、と考えられる：

「等分配の法則」。

光についても、その振動数 f （色）に依らず、どの様な振動数(f_1, f_2, \dots)の光でも、ほぼ kT ずつエネルギーの分配を受ける、と考えられた（下図）：



光のエネルギーは連続的に増え、振動数に依らず、分配用カップが一杯（容量 kT ）になるまでエネルギーを“もらえる”

M. Planck の公式 と エネルギー量子の考え方

M. Planck は実測された熱放射の強度曲線を見事に再現する「Planck の公式」を導いただけでなく、この公式の元になる考え方として

「エネルギー量子」

という考え方を導入した（1900年、Planck 50歳）

→ 量子力学（量子物理学）の誕生

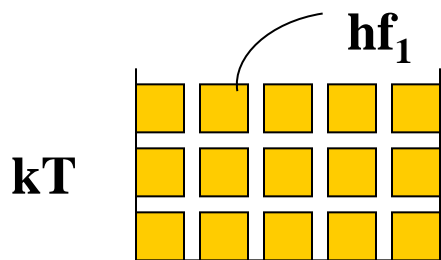
これは、光のエネルギーは連続的に変化できず、振動数が f の場合には、“基本単位” hf （“エネルギー量子”）の整数倍のみをとりうる

$$E = n(hf)$$

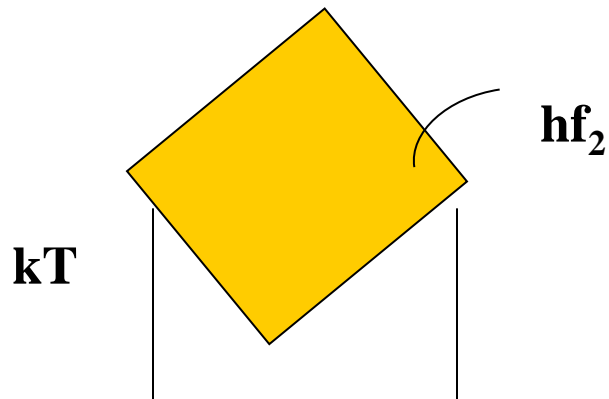
$$(h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ (J}\cdot\text{s)} : \text{Planck 定数}, n = 0, 1, 2, \dots)$$

という画期的な考え方であった（エネルギーの“つぶつぶ”化）。

こう考えると、特に振動数 f の高い（大きい）光の場合には、エネルギー分配用の“コップ”にエネルギーのつぶ（最小単位 hf ）が入りきらずに、当分配の法則が崩れる（下図）：



f_1 : 小

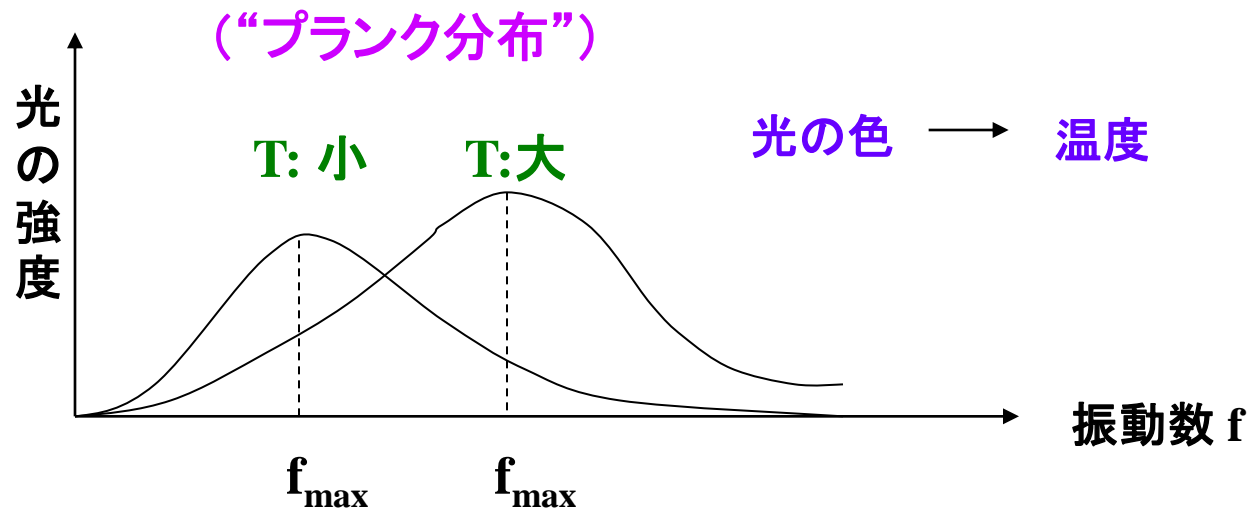


f_2 : 大

こうして、M. Planck は、なぜ高い振動数の光の強度（エネルギー）が弱いのかを説明する事が出来た。また、一番強度の強い光の振動数 f_{\max} は、エネルギー量子が分配カップの容積とほぼ等しく成る時の振動数になる：

$$h f_{\max} \sim kT \quad \rightarrow \quad f_{\max} \propto T$$

よって、温度が高くなると f_{\max} も増加するので、熱放射している物体の色（ f_{\max} で決まる）も赤から徐々に青っぽくなって行く（下図）：



（注）宇宙から来る光（正確には電波、“宇宙背景放射”）を観測するとプランク分布に従っている！また、その分布から現在の宇宙の温度は $T = 2.7$ 度である事が分かっている（後出）

(“光” (電磁波) の種類)

振動数が高い → 波長が短い

波長 (m)

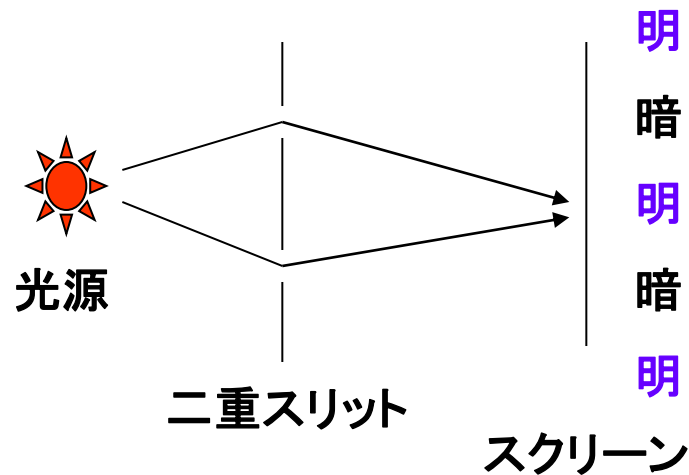
電波	$10^{-3} \sim 10^4$
赤外線	$10^{-6} \sim 10^{-4}$
可視光 (光)	10^{-6}
紫外線	10^{-7}
X線	10^{-10}
γ 線	$< 10^{-10}$ (放射性原子核の γ 崩壊、素粒子の崩壊)

よって、可視光より紫外線の方が振動数が高く、従ってエネルギー量子 hf が大きい → 紫外線は肌に良くない

6. 量子力学における新しい概念

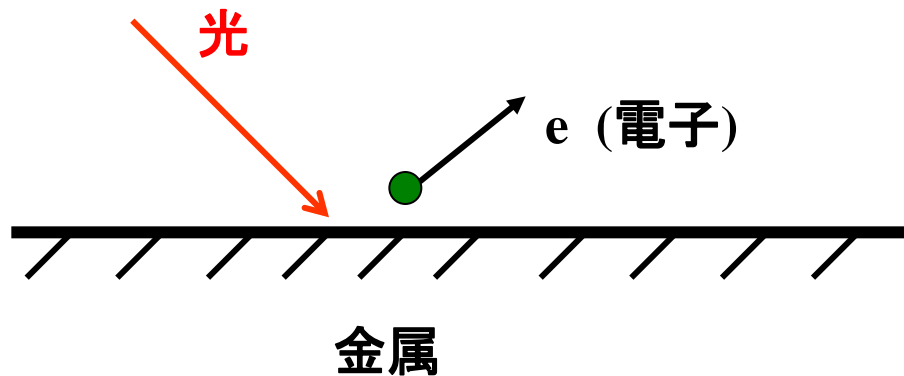
光の粒子性

Newton の時代に、光は波（波動）であるか、或いは粒子であるか、について論争があったが、**ヤングの実験**（二重スリットを通過した光の干渉によってスクリーン上に明暗の模様が出来る）によって、光りの「波動性」が確立した、と思われていた（ビデオ# 25：光の波動性）：



(「光電効果」 と Einstein による光子仮説)

光電効果： 紫外線やX線のような振動数の高い（波長の短い）光を金属に当てると、金属から電子が飛び出す現象。



特徴：

ア． 光の振動数 f がある振動数 f_0 より小さいと、いくら強い光を当てても電子は飛び出さない。

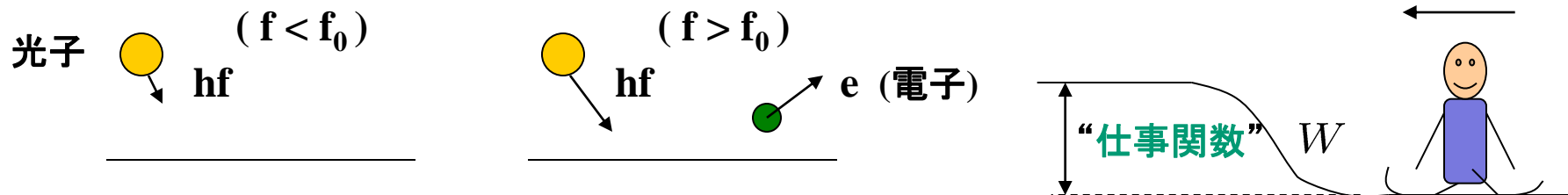
イ． 飛び出した電子の（運動）エネルギーは、光の強さに無関係で、光の振動数にのみ依存。

こうした特徴は、古典物理では説明が難しいが、これを、**A. Einstein** は、

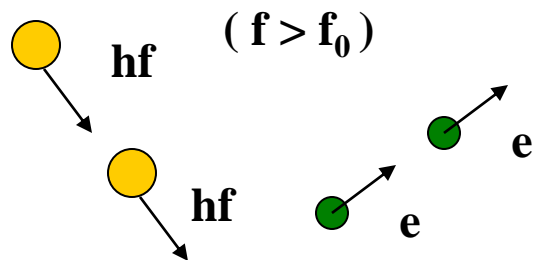
「振動数 f の光は、 $E = hf$ (h : プランク定数) のエネルギーを持った粒子、光子 (photon)、の集まり」

という**光子仮説**によって見事に説明した (これによってノーベル賞) (下図) :

(ア)



(イ)



$$W = hf_0 \quad \text{と書くと}$$
$$hf > W \quad \leftrightarrow \quad f > f_0$$

だと電子(光電子)が飛び出す

(注) こう考えると、Planck の言った $E = n(hf)$ は、光子が n 個ある、という事になる。

光： 波動 → 粒子性 !

電子の波動性

では、今まで粒子と考えられていた電子などの“物質”も逆に波動性、を持つのではないか？： de Broglie (ド・ブロイ) による“物質波”の仮説

この仮説の正しさは、実験的に確かめられた (ヤングの実験での光源を電子源に置き換えても、2重スリットを通すと光の場合と同じ干渉模様が出現)。

物質波の振動数 f と波長 λ は、以下の関係で与えられる：

$$f = \frac{E}{h} \quad (E = hf \text{ と同じ関係})$$

$$\lambda = \frac{h}{p} \quad (p: \text{運動量の大きさ})$$

(注)

1. 運動量の大きい速い電子ほど物質波の波長は短くなる
→ ミクロの世界 → 電子顕微鏡の原理
2. 上式のそれなりの説明。光速で運動する粒子については $E = cp$ (相対論)。一方、 $c = f\lambda$ (波の基本式) よって

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{c}{\frac{E}{h}} = \frac{h}{\frac{E}{c}} = \frac{h}{p}$$

粒子性と波動性はどう両立し得るか？

波動性： 広がりがあある、直進しない（回折）、干渉

粒子性： 広がりがあない、直進する、干渉しない

全く異なる！ どのように両立可能 ？

→ 電子が検出される時はあくまで広がりのない粒子として検出されるが、古典物理の時と違い、その運動の径路は一意的でなく、確率的に分布する。その確率の分布の様子が波動（確率波、複素数！）として表される、という事。

しかし、アインシュタインは、自身が量子力学の建設に大いに寄与したにも関わらず、「神がサイコロを振るとは思わない」と言って、この確率的な解釈に最後まで納得していなかった、という。

ボーアの原子模型

ビデオ# 27 : 原子モデル

原子核の周りを回る電子は光を出してだんだん半径の小さな軌道に

→ 原子はつぶれてしまう！ なぜ原子は安定でいられるか？

(原子のスペクトル)

また、水素原子からは特定の振動数の光（スペクトル）だけが放出されている事が知られていた。なぜ振動数が連続的に変化しないか不可解であった。

(ボーアの原子模型)

ボーアは、電子のエネルギーは連続的には変化せず、特定のエネルギー、つまり特定の半径の軌道のみを採ることが出来ると主張。軌道が“急に”変わる時にそのエネルギーの差に応じた特定のエネルギーの光子を放出する、と考える、スペクトルの説明に成功した：

$$E_n - E_m = h f \rightarrow f = (E_n - E_m) / h \quad (\text{エネルギー保存則})$$

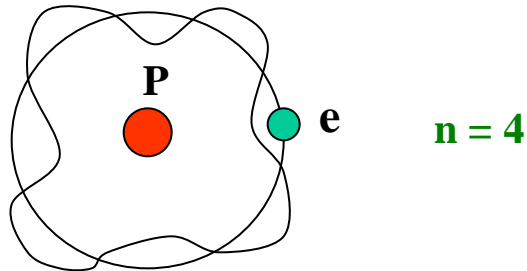
(E_n : n 番目の軌道の時の電子のエネルギー)

de Broglie は“物質波”の考えを用いて、何故特定のエネルギーのみを採るのか、について解明した。

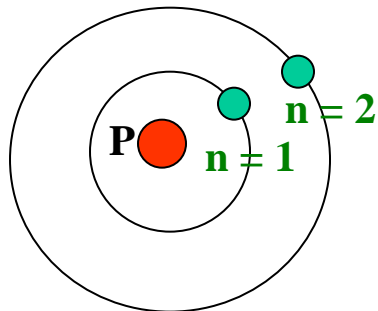
電子が陽子を中心とする半径 r の円軌道を回っているとすると、この時、軌道にそって物質波が生じるが、その波長 λ が

$$2\pi r = \lambda \times n \quad (n=1, 2, \dots)$$
$$r \times p = \frac{h}{2\pi} \times n \quad (\text{ボーアの量子化条件})$$

の関係を満たす時にのみ、物質波が消えずに残る（そうでないと、何度も円周上を回るうちに物質波が干渉して消えてしまう）（下図）：



→ この関係を満たす特定の軌道（特定の半径 r ）、特定のエネルギーのみが許される（下図）：



(注)実際には軌道は確定せず、ある半径の周りに確率的に分布

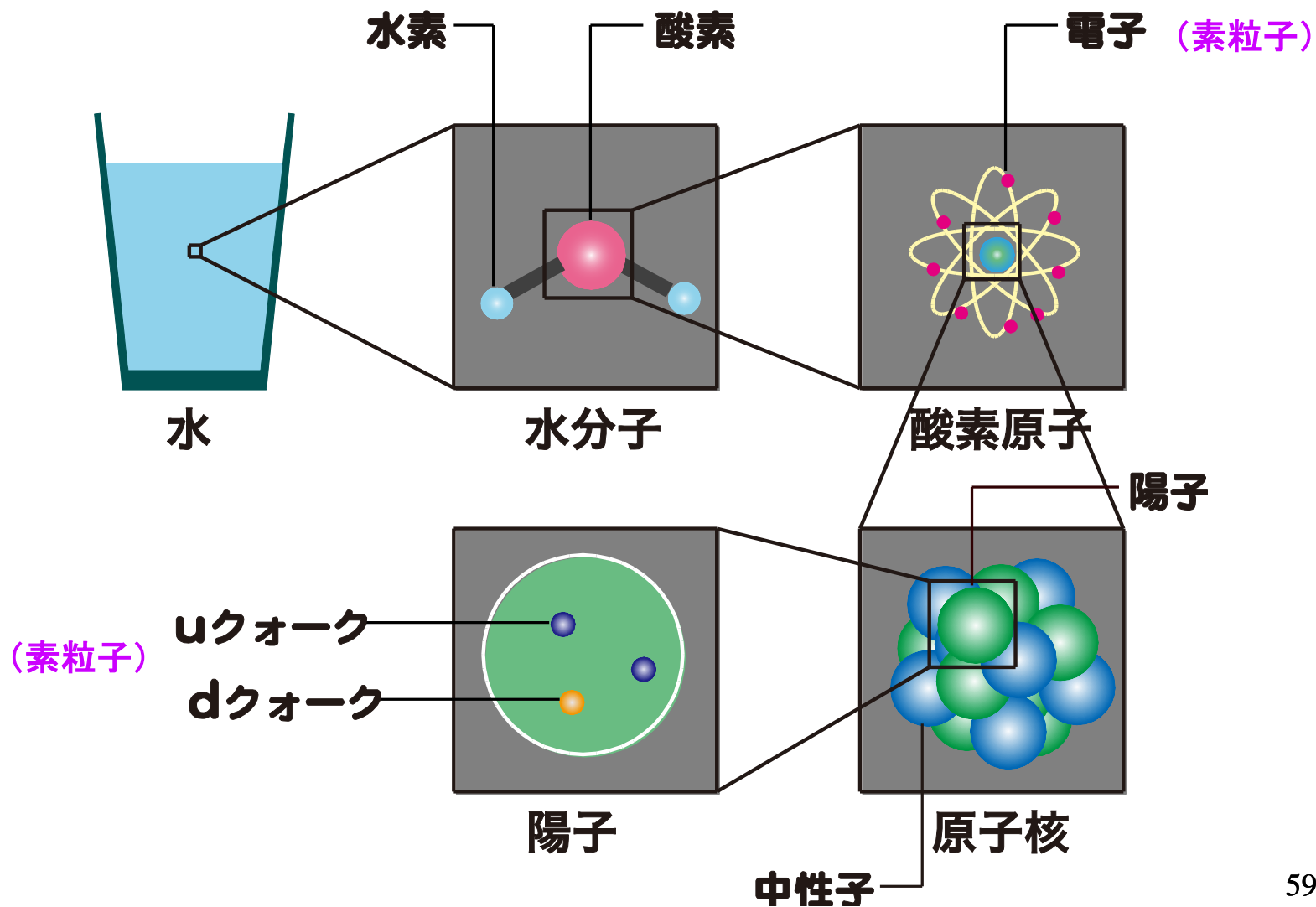
→ 量子力学でメンデレーエフの「**周期律**」を説明可！

第2部

素粒子と宇宙

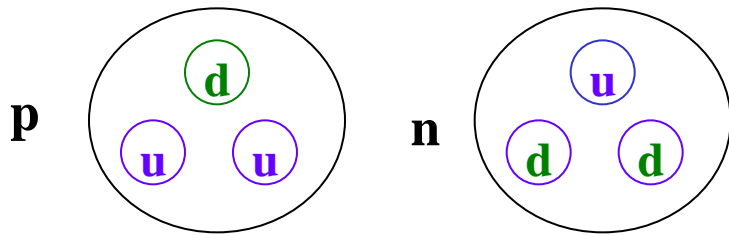
7. 素粒子とその相互作用

素粒子とは：全ての物質を構成する、それ以上分割不可能な粒子（最小の単位）



素粒子は（人智に限界があるため）時代と共に変化する。

例) 40年前までは「素粒子」と考えられていた陽子(p)と中性子(n)は、今やより基本的な素粒子、クォーク、が3つ結合して出来たもの（束縛状態, bound state) であることが分かっている: $p = uud$, $n = udd$



電子の電荷を $-e$ とすると、クォークの電荷は“分数電荷”となる:

$$u : \frac{2}{3}e, \quad d : -\frac{1}{3}e$$

すると、陽子、中性子の電荷が正しく再現さ

れる: $\frac{2}{3}e + \frac{2}{3}e + (-\frac{1}{3}e) = e$

$$\frac{2}{3}e + (-\frac{1}{3}e) + (-\frac{1}{3}e) = 0$$

何故より基本的な「素粒子」を追い求めるのか? :

その時点で素粒子と考えられていた物質の種類があまりに多くなり過ぎた時に、それらをより少数の基本的な新たな「素粒子」の組み合わせで表す事が出来る（還元主義）。例えばa,b,cの3個の組み合わせを考えると、(a,a,a), (a,a,b), (a,a,c),..... のように10個の組み合わせが可能 → 10個を3個に還元

(例)

- 原子 (atom) は、メンデレーエフの周期律

H He

Li, Be, B, C, N, O, F, Ne

.....

で表現されるように、ある規則性を持ちながらも、その数は非常に多い。

→ 全ての原子はp, n, e (電子) の3個 (の組み合わせ)

に還元出来、「周期律」は電子の原子核の周りの運動に関して量子力学を

用いる事によって説明できるようになった (シュレディンガー方程式を用いて計算すると、n番目の軌道には $2n^2$ 個の電子が入る)。

- p, n や湯川のパイ中間子の仲間をハドロン (強い相互作用をする粒子) というが、非常に多くのハドロンの存在が実験的に明らかになってきた。

→ u, d, s という3個のクォーク (の組み合わせ) に還元

(ゲルマン・ツバイクのクォーク模型)

(注)その後、小林・益川に依り、CP対称性の破れを説明するために、6個のクォークに拡張された。

- 電子 e やニュートリノの仲間を **レプトン** (強い相互作用をしない粒子) というが、レプトンの種類はそれほど多くなく、**電子やニュートリノはそのまま素粒子と考えられている**が、クォークと同様に、以下の様な6個のレプトンが存在する事が知られている：

$$(e, \nu_e) \quad (\mu, \nu_\mu) \quad (\tau, \nu_\tau)$$

(注) u, d, c, s, t, b → 6個の異なる フレーバー のクォーク。

それぞれのフレーバーのクォークは、更に3種類のカラー (r, b, g) を持つ事が知られている (韓・南部)。ハドロンを構成する時には“無色”になる：

$$p = (u_r, u_b, d_g) \text{ etc. } (u_r \text{ は赤色のアップクォーク, etc.})$$

(3原色をあわせると無色になる)。

ただし、このフレーバーやカラーは、実際にクォークがそうした香りや色を持つ、という事を意味しない。あくまでもアナロジー。

世代： クォークとレプトンは他の性質は全く同じだが質量（重さ）の違う**3つの世代**に以下のように分類される事が知られている：

クォーク :

$$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}$$

3世代の存在を理論的に
予言： **小林・益川 理論**

レプトン :

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau \end{pmatrix}$$

第1世代 第2世代 第3世代

—————→ 質量大

反粒子：

全ての素粒子には質量や（不安定な場合には）その崩壊の寿命等が全く同じであるが、電荷の符号が逆の「反粒子」(anti-particle) が必ず存在（電荷を持たず、粒子、反粒子の区別のない粒子もある。例えば光子 γ ）
(P.A.M. Dirac による相対論的量子力学の必然的帰結)

例)

粒子	反粒子
p 陽子(proton)	\bar{p} 反陽子 (anti-proton)
n 中性子(neutron)	\bar{n} 反中性子 (anti-neutron)
e^- 電子	e^+ 陽電子 (positron)
ν_e 電子ニュートリノ	$\bar{\nu}_e$ 反電子ニュートリノ
u アップクォーク	\bar{u} 反アップクォーク

- “天使と悪魔”を例に時説明したように、粒子と反粒子（物質と反物質）が出会う（ぶつかる）と、両方とも完全に消滅

“対消滅”

し、エネルギーを担う光子などが生成される。

- また逆に、この光子から、違う種類の粒子と反粒子の対が生成可能：

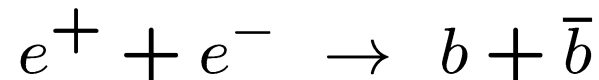
“対生成”

- ・加速器で十分なエネルギー

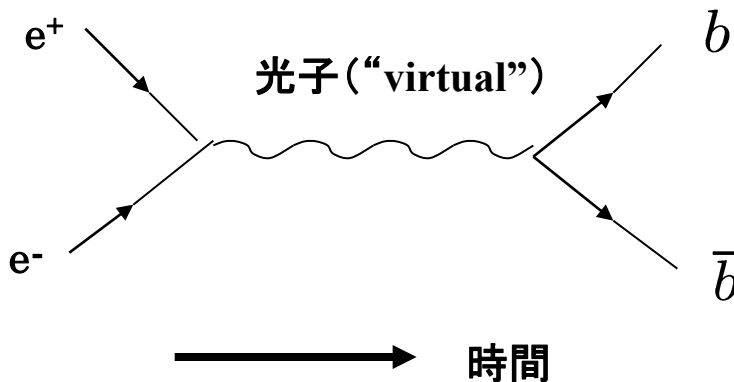
$$E > 2m_b c^2 \quad (m_b : b\text{クォーク質量})$$

を作り出せば、bクォークの様な比較的

重い粒子も、人工的に作り出せる：



- ・高エネルギー加速器研究機構(KEK)の“B-factory (工場)”実験では、この素粒子反応により、小林・益川理論を検証 → ノーベル賞を後押し



ファインマン図 (Feynman diagram)

初期宇宙 (Early Universe) は非常な高温、高エネルギー：天然の加速器！

トップ(t) クォークといった重い粒子を含め、全ての粒子が存在していたはず。
しかし、我々の原子は **u, d, e** のみで出来ている。それ以外の重い粒子はどこに行ったのか？

← 例えば、重い t クォークは、より軽いクォークにすぐに崩壊してしまう：

$$t \rightarrow b + e^+ + \nu_e$$

こうして、一番軽い第 1 世代のみが自然界に残った。

(注)

- **初期宇宙(Early Universe)** では、粒子と同じ質量の反粒子も、対生成で同数生成されたはず。何故、現在の宇宙には、半原子、反星、反銀河、が存在しないのか？
- “消えた反物質” の謎？

反粒子 (反物質) が生成されたとしても、物質と出会うと対消滅してしまう。何故、反物質のみが消えて、物質のみが残ったのか？

宇宙を論ずる**宇宙論の大問題** (← **CP対称性の破れ**：後述)

素粒子に働く 4 つの力（4 種類の相互作用）

ビデオ # 8 : 4 つの力

素粒子に働く 4 種類の力（相互作用） :

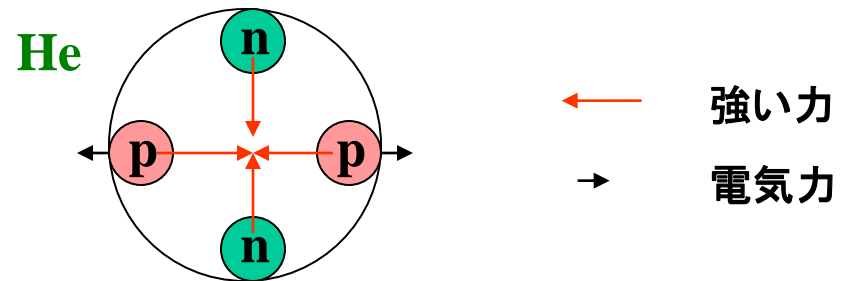
- 重力相互作用（万有引力）
- 電磁相互作用（電磁気力）（バネの力、摩擦力、....）
- 強い相互作用（原子核内で核子（陽子、中性子）を束縛している力）
- 弱い相互作用（放射性原子核の β 崩壊を引き起こす力）

力の大きさの比較 :

重力 < 弱い < 電磁 < 強い

強い相互作用

強い相互作用は電磁相互作用より強いので、例えばヘリウムの原子核中の2個の陽子の間に引力（“核力”という）として働き、陽子を束縛する（図）



(強い相互作用による核融合、核分裂)

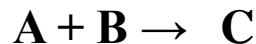
強い相互作用は原子核に作用する力 → (電磁気力により原子が集まって分子に成るのと同様に) 二つの原子核を結合させたりすることが出来る。

その際、原子核の質量の合計が減る(質量欠損)が起こり、

$$E = mc^2$$

より、欠損した質量に相当する大きなエネルギーが放出される

核融合: 二つの原子核が融合して、より重い別の原子核になる
(水素爆弾)



核分裂: 原子核が分裂して、より軽いいくつかの別の原子核になる
(原子力発電、原爆)



弱い相互作用

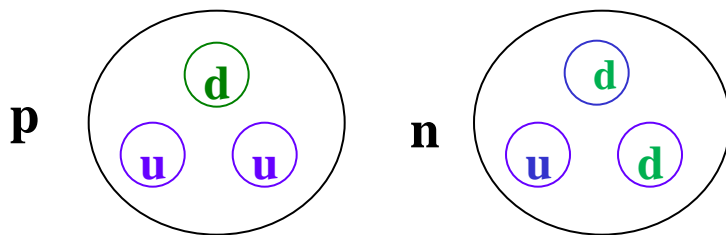
典型例は“ β 崩壊”。

放射線を出して（放射能）別の原子核に崩壊する放射性原子核が存在。放射線として β 線を出す“ β 崩壊”は原子番号が1だけ増えるので

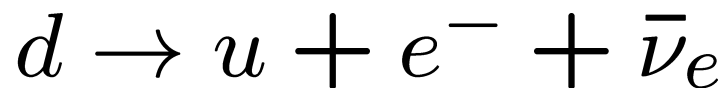


という崩壊。中性子 n が陽子 p より少し重いため起きる。電子が放射線である β 線の正体。

しかし陽子と中性子は実は素粒子ではなく、それぞれ3つのクォークで出来ている：



→ β 崩壊は、素粒子であるクォークのレベルで見ると次の反応



2、3世代においても同様に、各世代の“**上下のパートナー (doublet)**”の間で同様の崩壊が可能:

$$t \rightarrow b + e^+ + \nu_e \quad (\text{tの方がbより重い})$$

更に、世代を“**またぐ**”様な崩壊も可能

$$t \rightarrow s + e^+ + \nu_e$$

世代が混ざる: **世代間混合(フレーバー混合)**

→ **一番軽い第1世代まで崩壊し、宇宙には第1世代のみ残った**

(注) 世代間混合は、小林・益川理論においてCP対称性を破る際に必要条件

19世紀まで、何故重力相互作用と電磁相互作用のみが知られていたのか？

- ・ 重力は素粒子の世界では一番“弱い力”なのに、何故昔から知られていた？

→ マクロな物体は電氣的に中性（原子の総電荷は0）なので電磁相互作用はマクロな物体間には働かない（弱い）。

一方で、重力は電荷の正負に関係なく、質量（エネルギー）を持った物の間で普遍的に働く（万有引力）のでマクロの世界で重要。

- ・ 重力相互作用と電磁相互作用の力は遠方にまで届く遠距離力である

→ マクロの世界で重要。しかし、強い相互作用と弱い相互作用はいずれも原子核サイズ以下の短距離でのみ働く短距離力であり、ミクロの世界で初めて重要になる。 → 見つかりにくい。

全ての相互作用につき、力を伝える(媒介する)粒子が存在する。

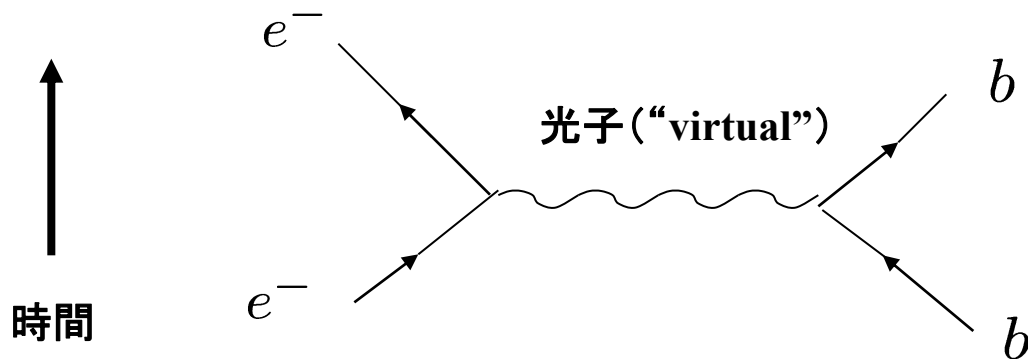
湯川による中間子論にこうした考え方のオリジンが !

(中間子論) 核子の間に働く核力は、パイ中間子が“キャッチボール”のように核子の間で交換(やり取り)されて働く。湯川は、核子の到達距離から、パイ中間子には(光子と違い)質量があるとして、質量を予言

← 存在が実証された(宇宙線中で)

(電磁相互作用の場合: 媒介する粒子は光子)

例えば、電子とbクォークの間には、次のような光子の交換で電磁相互作用が働く:



(注) 電子、陽電子の消滅と本質的に同じファインマン・ダイアグラム
素粒子反応では以下の様に“移項”が可能

$$e^+ + e^- \rightarrow b + \bar{b} \quad \longrightarrow \quad \text{移項} \quad e^- + b \rightarrow e^- + b$$

(陽電子の消滅は、電子の生成と同様)

その他の相互作用を媒介する粒子は？

- ・強い相互作用： 8種類のゲージボソン： **グルーオン** (gluon)
(パイ中間子の交換は実効的)
- ・弱い相互作用： 3種類のゲージボソン： W^\pm , Z^0
- ・重力相互作用： **重力子** (graviton) : **未発見**

(力の源)

- ・重力相互作用： **質量** (正確にはエネルギー) $F = G (m_1 m_2) / r^2$ (古典的)
- ・電磁相互作用： **電荷** $F = k (q_1 q_2) / r^2$ (電気力)
- ・強い相互作用： **カラー** (カラーを持つクォークのみに働く)
- ・弱い相互作用： (弱い) **アイソスピン**

太陽における核融合と太陽ニュートリノ

強い相互作用、弱い相互作用： 他の2力と違い、日常生活ではあまり顔を出さない（知らなくてもすんでしまう）。

しかし、実際には我々が地球上で生活できるのは、この二つの相互作用のおかげ：

太陽中心で起きている核融合によって生み出される膨大な（熱）エネルギー（ 4×10^{26} (W)）によって太陽は輝いていて、この太陽光のおかげで地球上の生物は生存出来ている。

強い相互作用 → 核融合

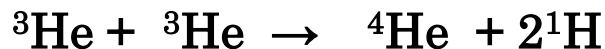
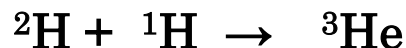
弱い相互作用 → 核融合の反応速度が遅く、太陽は“ゆっくり”長く

輝く

→ 地上の生活が安定して長く維持できる

(太陽中心部における核融合反応と太陽ニュートリノ)

太陽中心部は非常に高温で、核融合反応を起こしているが、その際に弱い相互作用も関与しているため、ベータ崩壊と同様にニュートリノも（陽電子と並んで）太陽から放出される：



結局、4個の ${}^1\text{H}$ （陽子）が融合して1個のヘリウム ${}^4\text{He}$ を生成する反応：



(N.B.)

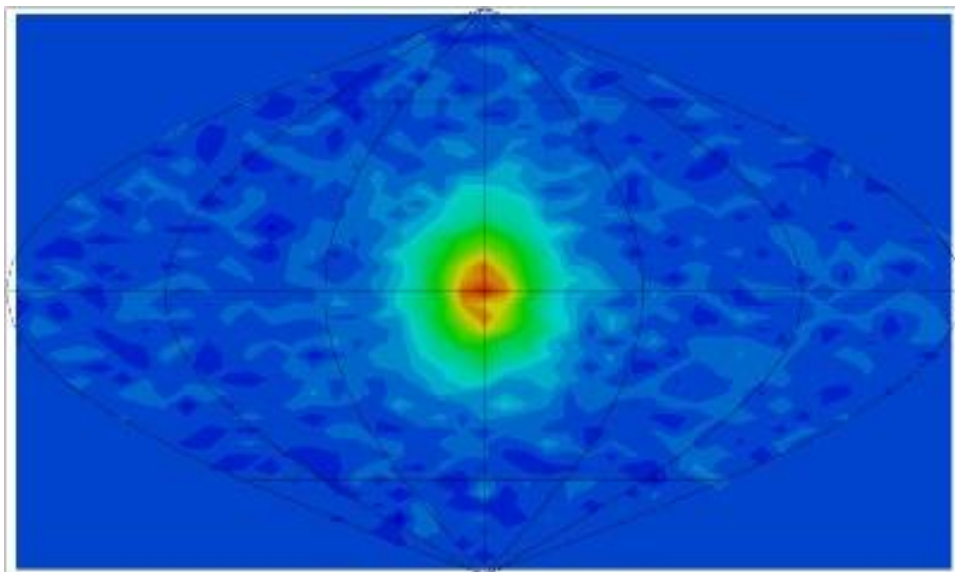
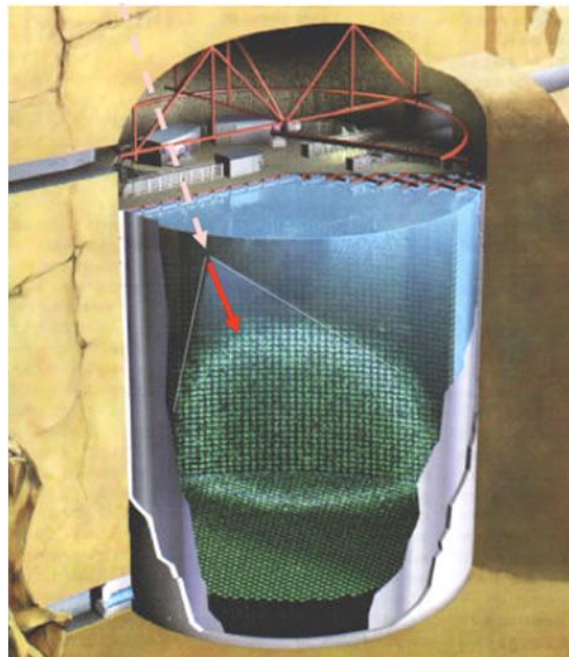
太陽で生成され地球に“降り注ぐ”ニュートリノを太陽ニュートリノ (solar neutrino) と言う。

太陽ニュートリノは日本の神岡鉱山にある**Super-Kamiokande** 実験において検出されている。

スーパーカミオカンデの検出器にニュートリノが入ってくると、電子が弾き飛ばされて



リング状の**チェレンコフ光**を発し、**光電子増倍管**で観測される。跳ね飛ばされる電子の方向から入射するニュートリノの方向が分かる



ニュートリノで“見た”太陽。太陽中心からニュートリノがやってくるのが分かる：
(レントゲン写真と同様)

相互作用（力）の統一

・弱い相互作用の力は、エネルギーが高くなると次第に強くなる。一方電磁相互作用の力は、エネルギーが変わってもあまり変化しない → 二つの力を統一する事が出来る（Einstein の夢の実現に向けて第一歩）：

素粒子の標準模型（Standard Model）：現在確立している最も進んだ理論
（Glashow - Weinberg - Salam, 南部, 小林・益川）

（注）2008年度ノーベル物理学賞



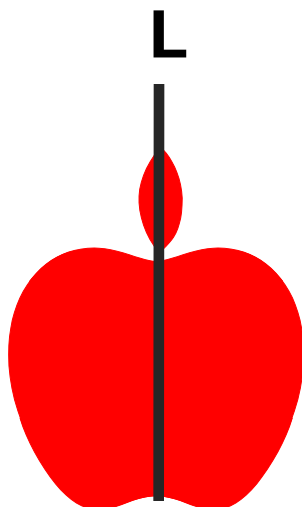
南部：“自発的対称性の破れ”

小林・益川：“CP対称性の破れ”

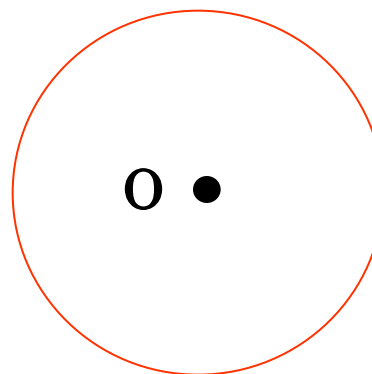
key word: 対称性の破れ

そもそも対称性とは？ → ある種の変換の下での“不変性”

(線対称性を持った図形)



(回転対称性を持った図形)



Lに関する折り返しやOの周りの回転の下で、図形が不変

対称性の破れ: 対称性が損なわれること(部分的に、あるいは完全に)

南部教授の業績： 自発的対称性の破れ

- ・電磁相互作用： 遠方まで届く → 光子には質量がない
- ・弱い相互作用： 非常な短距離力 → W, Z は非常に重い (質量が大きい)

一方で、標準模型には“ゲージ対称性”という回転対称性に似た対称性があるために、そのままではW やZ といった弱い相互作用を媒介する粒子(ゲージボソン)、および物質を構成するクォークやレプトンは質量を持つことができない。

この重大で困難(繰り込み可能性を損なわず以下に質量を与えるか)な問題を解決したのが南部教授による“自発的対称性の破れ”というアイデアである。

(自発的対称性の破れとは?)

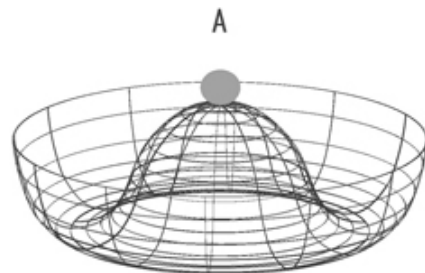
理論そのものは対称性を持っているが、真空状態(エネルギーが一番低い状態)では対称性が破れている

日常生活におけるアナロジー



箸は左右対称に置かれている。しかし、誰かが右の箸を取ると全員右の箸を取ることになり、左右の対称性が“自発的に”破れる。

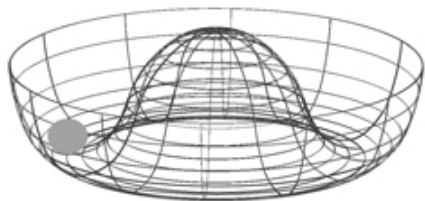
より素粒子の場合に近いアナロジー (ワインボルの底、メキシカンハット)



A

ワインの空ビンの底(ビンを回転しても不変。つまり回転対称性がある)にパチンコ玉を落としてみる。

・Aの状態は回転対称性を保持するが不安定。



B

・Bの状態は安定で“真空状態”にあるが、回転対称性は“自発的に”破れている：“等しい真空”の一つを採った。

ゲージ対称性が自発的に破れると、W, Z やクォーク, レプトンも重さ(質量)を持つ。
このメカニズムを実現するためにヒッグスという粒子が導入される
→ LHC 実験(スイス・ジュネーブ)で探索中

小林・益川教授の業績: CP対称性の破れ

弱い相互作用の世界でのCP対称性の破れを実現するためには

3世代(以上)のクォークが必要 (後述)

・更に、強い相互作用まで含めて統一しようという

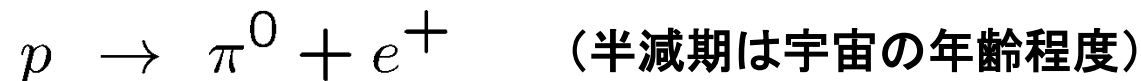
大統一理論 (Grand Unified Theory, GUT)

や、より野心的な、重力まで含めた全ての4つの力全ての統一理論である

超弦理論 (Superstring Theory)

も議論されている。

(N.B.) 大統一理論は一般に陽子の崩壊を予言する。例えば最もシンプルなGUTでは



を予言。小柴教授のKamiokande (Kamioka Neutron Decay Experiment) は
この崩壊の探索を目的にスタート。しかし未検出。

→ 最もシンプルなGUTは排除

8. 現代の宇宙論 — ビッグバン（膨張）宇宙論

現代の物理学では、我々の宇宙はどの様に誕生、発展し、これからどうなる、と考えられているのだろうか？

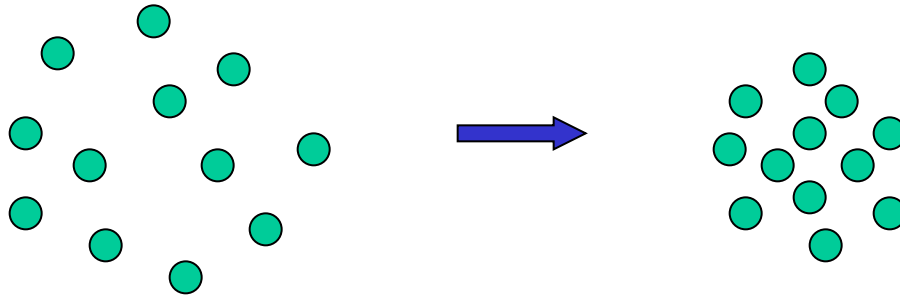
我々の宇宙には、星、銀河、銀河団のように、大量の物質が、従って質量が存在する。上で見てきたように、「一般相対性理論」に依れば、そうした質量やエネルギーによって生じる重力によって、我々の空間は一般に曲がった空間と成っているはずで、その曲がり方、および時間的变化（宇宙の歴史と運命）をきちんと決める方程式が

「アインシュタイン方程式」

であるが、ここでは、これに言及せずに、直感的に我々の宇宙を理解していこう → 結構“古典物理学的理解”が可能。

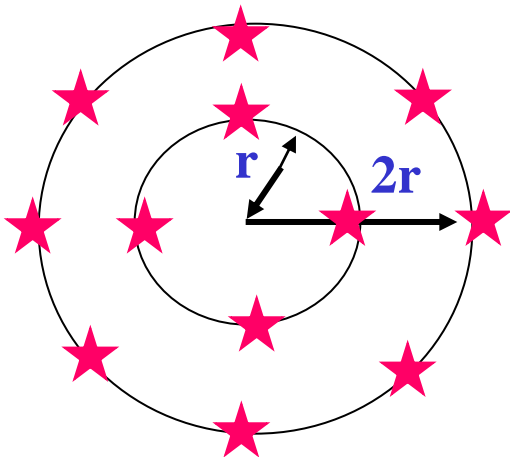
（我々の宇宙に関するパラドックス）

（1）宇宙に存在する物質の間には引力である重力が働くので、お互いに引っ張り合い宇宙は収縮してしまわず（下図）。何故、現在のような安定した（ほぼ静止したように見える）宇宙が可能なのか？アインシュタインはこの問題に悩んだ。

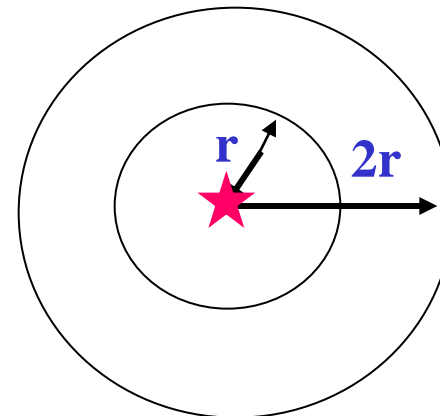


(2) オルバースのパラドックス (夜空は無限に明るい!?)

宇宙には、星がほぼ一様に分布しているように見える。地球から見て半径 r の球面上 (球殻内) と、半径 $2r$ の球面上の星からくる光の光量 (光のエネルギー) を比較して見よう (下図)。



半径が2倍に
成ると星の数は4倍に



半径が2倍に
成ると光量は4分の1に

まず、球面上に存在する星の数は、（球面の面積は $4\pi r^2$ なので）半径 r に比べ $2r$ の球面の方が4倍になる。一方ひとつの星から来る光の光量（強さ）は光源からの距離が2倍になると4分の1に減少する。よって、二つの球面上の星から来る全光量は全く同じである。

→ 遠くの星からの光量も近くの星からのそれと変わらない！？

つまり、全ての星からの光量を足し合わせると無限大に成ってしまい、夜空は無限に明るいことになってしまう！？

こうした矛盾は、我々の宇宙が膨張している、と考えると自然に解決する：

（1） 例えば、最初手で静止させられていた（初速度0）ボールは、手を離せば地球からの重力で落下する。しかし、上向きの初速度を最初に与えておけば落下せず上昇し、最高点では静止する事も出来る。 → 宇宙も誕生したときに膨張する初速度を与えられれば、収縮する事無く、現在の（ほぼ）静止した宇宙も実現可能。

(2) 宇宙が膨張していると、全ての星は地球に対して遠ざかって行く。このときには「ドップラー効果」によって星から出される光の振動数が減少する（遠ざかる救急車と同じ。red shift と呼ばれる）。量子力学で学んだように光子のエネルギーは hf で振動数 f に比例するので、red shift によって、光（光子）のエネルギー、即ち光量は減少する。 → 夜空は暗くなる

(フリードマンの膨張宇宙モデル)

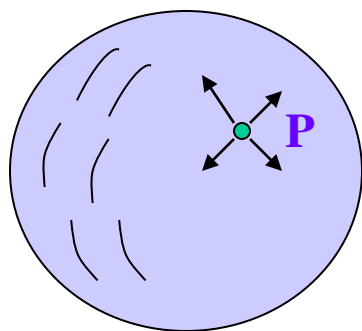
フリードマンは、こうした膨張宇宙を数学的に記述できるモデルを、一般相対性理論を用いて(アインシュタイン方程式を解いて)作り上げた。

このモデルは、以下のような“宇宙原理”と呼ばれる仮定に基づいている：

- ・ 宇宙は一様である： 宇宙には中心はなく、すべての空間の点は同等である。
- ・ 宇宙は等方的である： 宇宙の任意の点から見たときに、どの方向を見ても宇宙は同じように見える。

(注) 現実の宇宙では、地球の周りには惑星や星座などがあり、とても等方的とは思えないが、この「宇宙原理」は、そうした細かい“でこぼこ”を平均化してより大きなスケールで宇宙を見たときに一様・等方である、と言っている。

こうした、**一様・等方の宇宙**を直感的に（しかもエッセンスを失う事無く）理解するには、風船の表面を我々の宇宙になぞらえる、“**風船宇宙**”を考えるのが良い（ただし、風船の表面は2次元空間だが、実際の宇宙の空間は3次元）：



すぐ分かる事は、風船には特別な点は無く（一様）、ある点Pから見たときに全ての方向は同等である（等方）、という事である。

（宇宙が膨張している事の検証 — **ハッブルの法則**）

ハッブルはウィルソン天文台の口径100インチの反射望遠鏡を用いて、1919～1929年までに、計18個の銀河（星雲）の、**red shift**（即ち、地球から見た銀河の遠ざかる早さ v ）と、地球からその銀河までの距離 d の間の関係を調べ上げた。

その結果、両者は比例している事

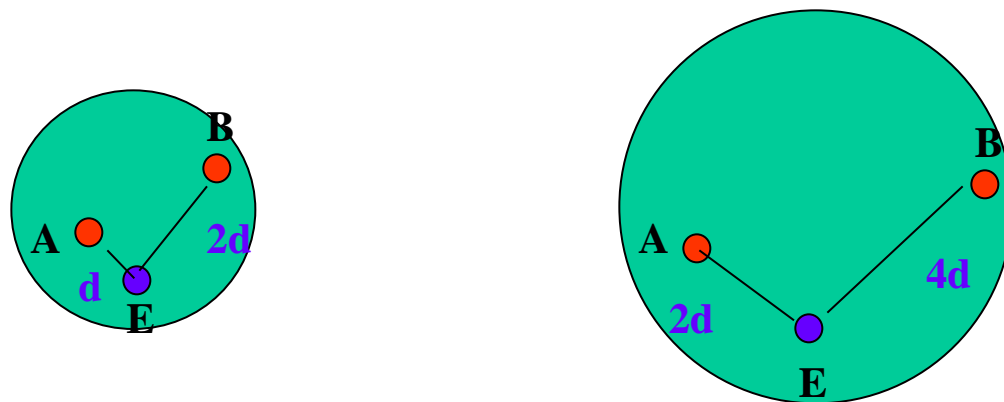
$$v = H d \quad (H: \text{ハッブル定数})$$

を見つけた。この関係を

「ハッブルの法則」

という。

この法則は、風船宇宙を考えると容易に理解できる（下図）：



地球Eから、二つの銀河 A と B を観測する。E から B までの距離 $2d$ は、E から A までの距離 d のちょうど 2 倍だとする。宇宙、即ち風船が膨張して風船の大きさ（半径）が 2 倍に成ったとすると、E から A までの距離は $2d$ に、そして E から B までの距離は $4d$ になる。この間に、A と B はそれぞれ、 d および $2d$ だけ地球 E から遠ざかったことになり、よって、遠ざかる速度は A より B の方が 2 倍大きい、という事になる。

(ビッグバン宇宙論とその検証)

今宇宙が膨張している、と考えると、時間を逆に戻せば、最初宇宙は1点 (!?) から出発した事になる。その時、全ての物質や光 (光子)、また全てのエネルギーは非常に小さな所に集約されていて、宇宙は非常な高温であったはず。これが、爆発的に膨張を始め、(断熱) 膨張する気体が急激に冷える (エアコンの原理) ように、宇宙は急激に冷えて、現在の宇宙が出来あがった、と考えられている :

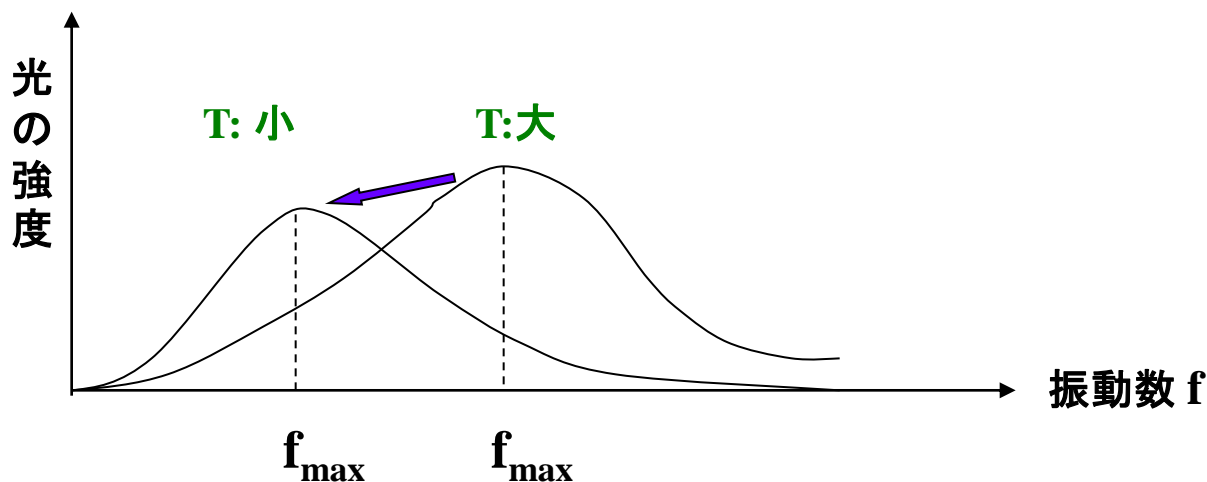
Big Bang 宇宙論

(現在の宇宙の温度)

このBig Bang 宇宙論を強力に指示する観測事実として、

“宇宙背景輻射 (cosmic background radiation)” というものがある。

Big Bang 宇宙論では、宇宙初期は非常に高温のいわば“溶鉱炉”のような状態であったはず。従って、量子力学で学んだように、光の強度は熱放射に関するPlanck 分布に従う。宇宙が膨張すると宇宙の温度が冷えるため、最高強度となる光の振動数 f_{\max} はPlanck 分布に従いながらも減少して行く（下図）（これは、ガモフ（不思議の国のトムキンスの著者）によって予言された）：



1964年、ベル研究所（USA）の、Penzias と Wilson は、宇宙から電波（波長の長い電磁波、“光”）が降り注いでいる事、アンテナをどの方向に向けてもほぼ等方的に、Planck 分布に従う電波が来ていることを発見。

その最高強度の電波の波長 λ_{\max} はほぼ1 (mm)であった。量子力学で、最高強度となる光の振動数 f_{\max} は、絶対温度T に比例する事をみたが、波長と振動数は反比例するので、最高強度の波長 λ_{\max} は絶対温度T に反比例する：

$$\lambda_{\max} \times T = \text{一定}$$

実験室の実験から、例えば、 $T = 6000 \text{ (K)}$ の時に、

$\lambda_{\max} = 5 \times 10^{-7} \text{ (m)}$ と分かる。よって、 $\lambda_{\max} \times T = \text{一定}$ の関係を使えば、

$$1 \times 10^{-3} \times T = 5 \times 10^{-7} \times 6000$$

より、 $T = 3 \text{ (K)}$ と決まる。正確には、現在の宇宙の温度は

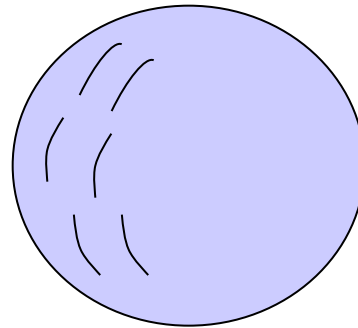
$$T = 2.73 \text{ (K)}$$

であることが分かっている。この宇宙背景輻射の発見は、一様・等方な膨張する宇宙、というBig Bang 宇宙論を強く指示する観測事実である。

宇宙の運命

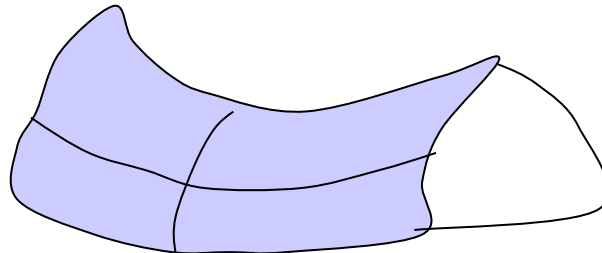
・閉じた宇宙

現在の宇宙は膨張している、と思われているが、**余りに宇宙に存在する物質が大量**にあると、重力が大きくなり、宇宙はある点で膨張をやめ、収縮に転じるはずである。また、重力が大きいので宇宙は風船の様に丸まって有限の大きさになる。こうした宇宙を“**閉じた宇宙**”といい、“**風船宇宙**”がこれに当たる。



・開いた宇宙

物質量があまり多くないと、宇宙は膨張を続ける。また、重力が小さいので宇宙は丸まらずに無限に広がった空間になる。こうした宇宙を“**開いた宇宙**”という。その形状は、風船宇宙と違い、“**鞍形**”であると思われている：

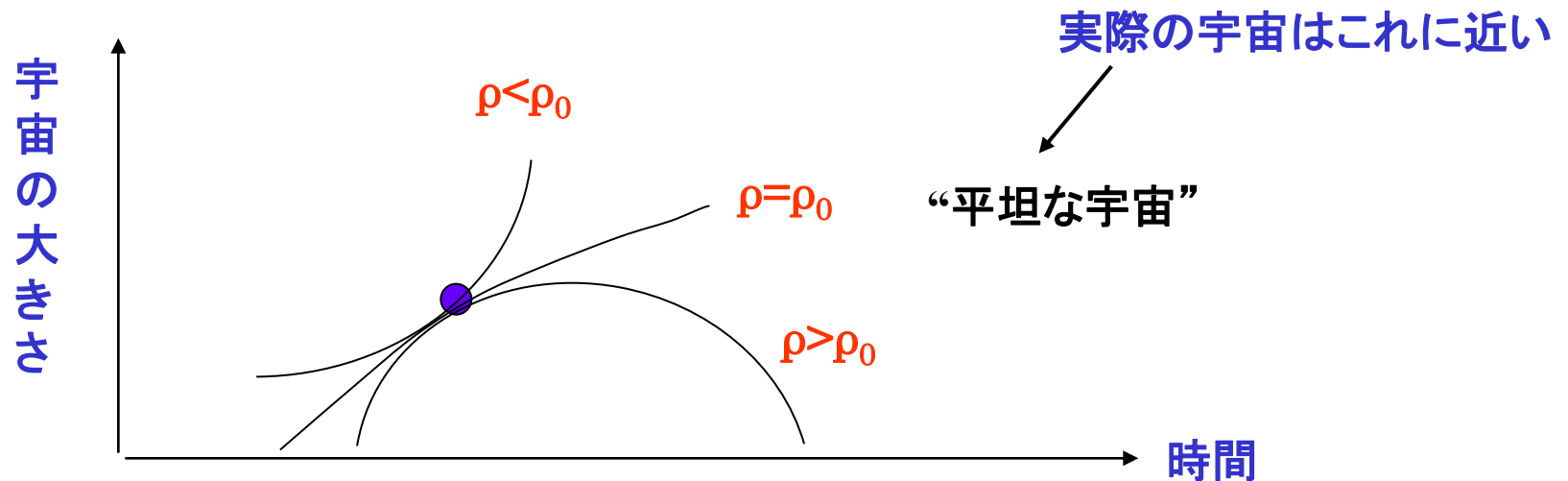


今後の宇宙の運命、即ち膨張が止まる（閉じた宇宙）か、或いは膨張を続けるか（開いた宇宙）は宇宙の物質密度 ρ で決まる。

ρ が、“臨界密度”

$$\rho_0 = 10^{-26}(\text{kg} / \text{m}^3) \quad (1 \text{ m}^3 \text{ に陽子が } 6 \text{ 個})$$

より大きい小さいかでその運命が決まる（下図）：



9. 素粒子と宇宙論、宇宙の暗黒物質

素粒子（クォーク、レプトン）の様なマイクロのものが、何故、宇宙のようなマクロなものの「進化」に関わるのか？

- ・ **Big Bang** 宇宙論では、宇宙初期（Early Universe）には、宇宙は非常に小さくマイクロであった。
- ・ 宇宙初期は非常に高温であったので、原子核を構成する陽子や中性子も3個のクォークにバラバラに分かれていた。→ クォークとレプトン、および光子といった素粒子の“スープ状態”。

そうした関わりの典型的な例として、ニュートリノが宇宙の進化に与える影響について考えてみよう。

宇宙初期における元素合成

宇宙に存在する元素の内、水素H やヘリウムHe などの軽い元素は、宇宙初期に（宇宙誕生から数分の内に）合成され(Nucleosynthesis)、一方、より重い炭素C, 鉄Fe 等は、ずっと後に星が形成されてから、星の中の核融合反応（太陽中心でのそれと同様）によって作り出された、と考えられている。

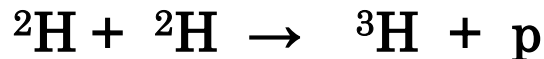
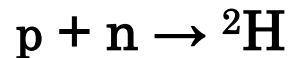
(宇宙初期における元素 (特にヘリウムHe) 合成のシナリオ)

- ・ 宇宙誕生から1万分の1 (秒) 後、バラバラであったクォークは強い相互作用によって互いに結合し、陽子 p と中性子 n になる。この時、陽子と中性子は、

$$n \leftrightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e, \quad \nu_e + n \leftrightarrow p + e^-, \quad e^+ + n \leftrightarrow p + \bar{\nu}_e$$

といった弱い相互作用による“反応”を通じて互いに行き来してバランスし (平衡状態)、**等量存在**。

- ・ 宇宙誕生から1 (秒) 後、陽子と中性子は次のような核融合を開始し、ヘリウムを合成する：



この時、中性子 n は陽子 p よりほんの少し重いためベータ崩壊

($n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$) し、**陽子の方が多く存在する**： $n_n : n_p \simeq 1 : 6$

こうして、水素 $\text{H}(p)$ とヘリウム He が混合した状態が作られる。

水素は p 1 個、又ヘリウムは p 2 個と n 2 個で出来ているので、核融合の結果残る H と He の個数をそれぞれ a 、 b とすると、

$$n_n : n_p = 2b : a + 2b \simeq 1 : 6$$

よって、 $a : b \simeq 10 : 1$ 。この比は、観測された H と He の個数（重量）の比と良く一致している → この元素合成のシナリオの正しさを示している

(ニュートリノの数に対する情報)

もしも、ニュートリノの数が、現在知られている ν_e 、 ν_μ 、 ν_τ の 3 種類（3 世代）より多いとした場合には、宇宙の進化や元素合成にどのような影響が出るであろうか？

- ・ ニュートリノの数が多くなると、宇宙のエネルギー密度 ρ が大きくなり、重力が大きくなる。

- ・ 大きな重力にうち勝って宇宙が膨張する為には、宇宙の膨張の初速度は大きくなる必要がある。すると宇宙がすぐ膨張してしまう為に、中性子 n は十分なベータ崩壊が出来ず、中性子の数が相対的に増える (n_n/n_p が大きくなる)。よって、Heの個数がHに比べ相対的に増えてしまい、観測値と合わなくなってしまう。

こうして、(軽い)ニュートリノの数 N_ν には厳しい制限が付く：

$$N_\nu \simeq 3$$

このように、小林・益川の3世代模型は、宇宙論の観点からも支持されているのである。

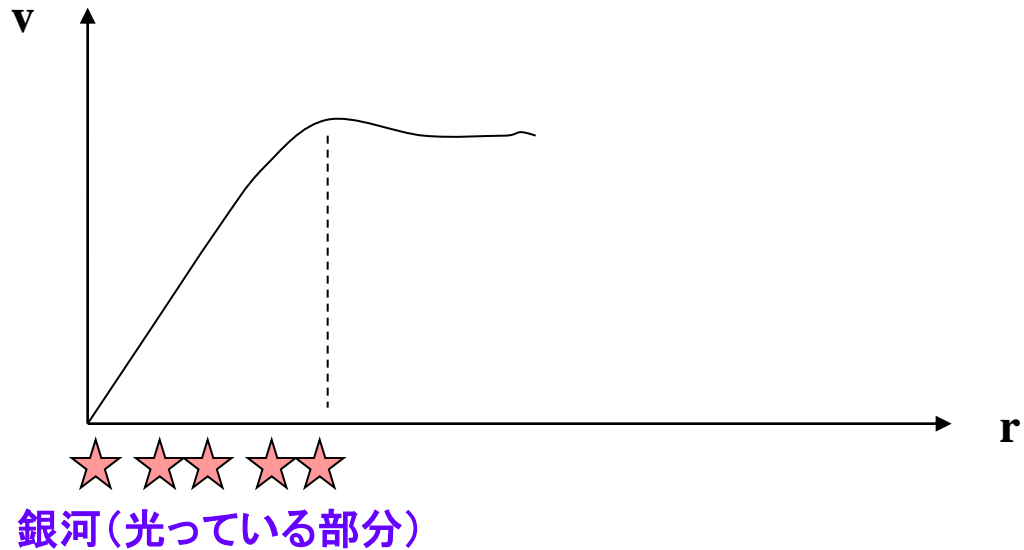
(注) スイスのCERNでの加速器実験からも同様の結果が得られている。

宇宙の暗黒物質

宇宙には、星のように光りを発してはいないが質量を持った暗黒物質 (dark matter) が大量に存在する事が観測事実から示唆されている。

(暗黒物質の存在を示唆するもの)

銀河中の星の回転の速さ v を銀河の中心からの距離 r の関数としてグラフに描いたものを、「回転曲線」という(下図)：



特徴的な事は、星がほとんど存在しない暗い部分の星の速さが、中心から離れてもほぼ一定をキープする事。

(注) もしも暗い部分には物質がほとんど存在しないとすると、中心から離れるにつれて星の受ける重力は減少するため、これと釣り合う遠心力も小さくなり、従って、星の速さも減少するはず (v は $1/r$ に比例して減少)。

→ 暗黒部分にも、光らないけれど質量を持つ

「暗黒物質、dark matter」

が存在するに違いない。

暗黒物質は他の物質と相互作用をほとんどしない物質である必要あり

→ 弱い相互作用のみするニュートリノが一つの候補

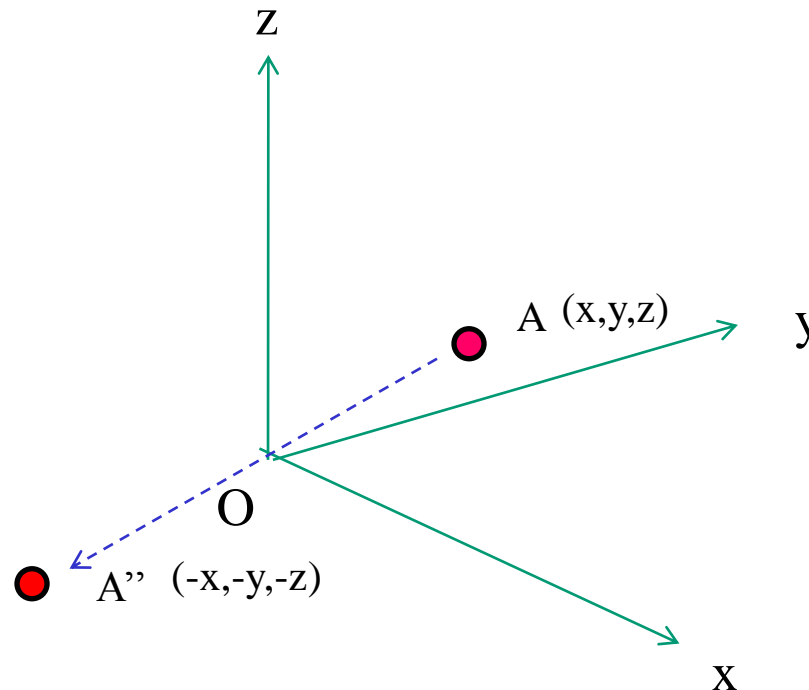
しかし、他にも“標準模型を越える素粒子理論”から示唆される色々な可能性(超対称理論の予言する“スーパーパートナー”等)が指摘されていて、「暗黒物質」の正体については決着が付いていない。

10. CP 対称性の破れと消えた反物質の謎

10.1 パリティ (P) 対称性

平面上の線対称性と似た(3次元)空間の対称性としてパリティ(P)対称性がある。

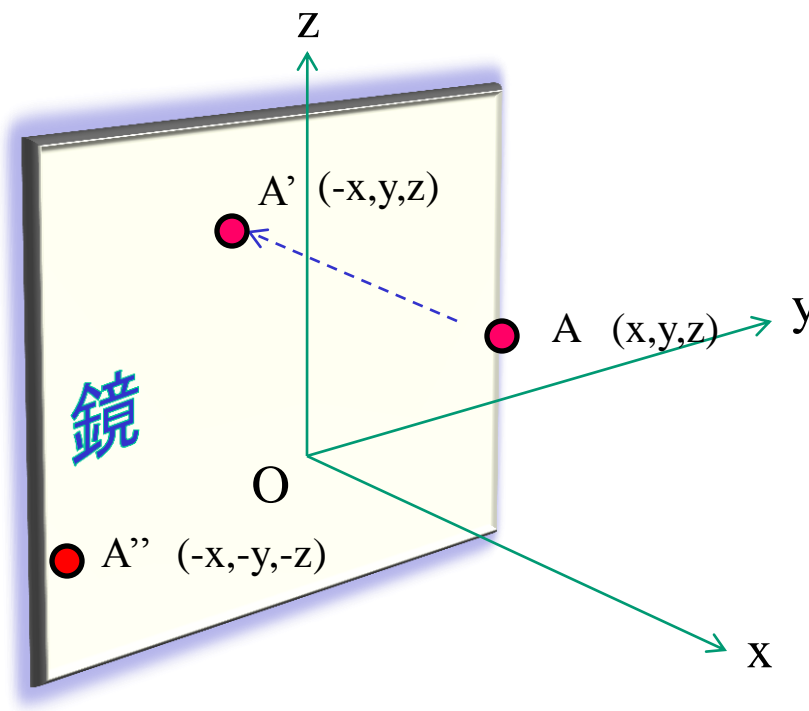
P 変換: 原点に関して対称な位置への変換



P 変換と同等のものとして、鏡に映す変換

「鏡像変換」: $A \rightarrow A'$

を考える。



(注) 本来のP 変換: $A \rightarrow A''$

P 変換をすると、右手は左手に変わってしまう :



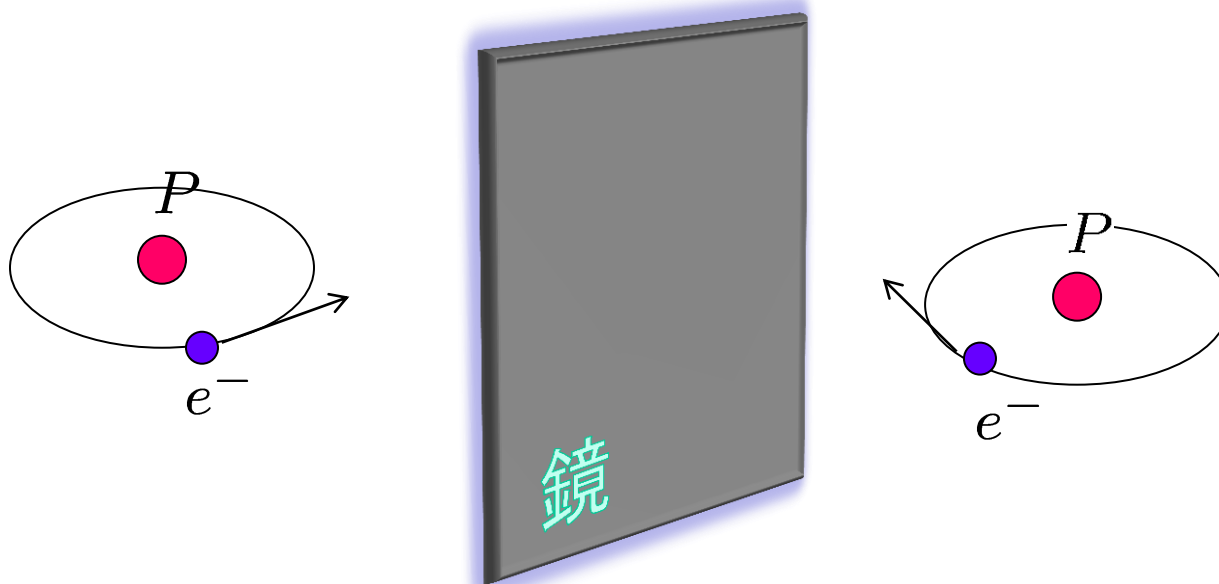
P対称性: 左右の対称性

物理における対称性:

変換しても物理法則が不変という事

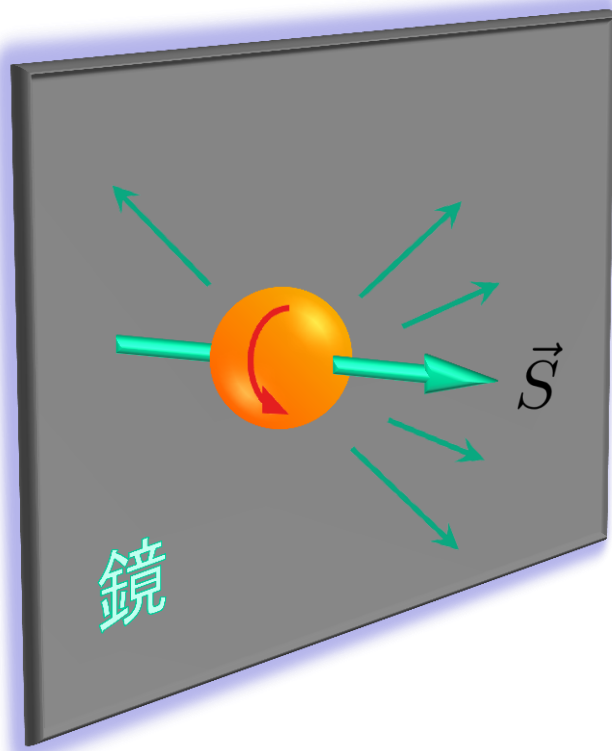
相対性理論: ローレンツ変換の下での不変性 → ローレンツ対称性

例えば、電磁相互作用においてはP 対称性が有る:

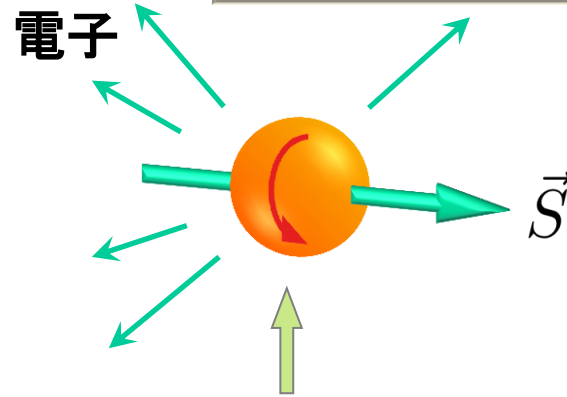
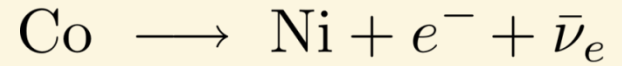


鏡に映す前の運動と映した運動は同等に存在する

しかし、素粒子の弱い相互作用においては、P 対称性が破れている:
鏡に映す前の現象と映した後の現象が同等には起きない !



コバルトの原子核のベータ崩壊:



もしP 対称性があれば、コバルト原子核のスピンの向き（スピンベクトル \vec{S} で示される）と平行な方向にも逆方向にも同じように電子は放出されるはず。しかし、実験結果は、逆方向にたくさんの電子が放出:

→ P 対称性 (左右の対称性) の破れ !

10.2 C対称性の破れ

物質を構成する全ての素粒子には、逆符号の電荷（電気量）を持ち、質量が同じ

“反粒子”

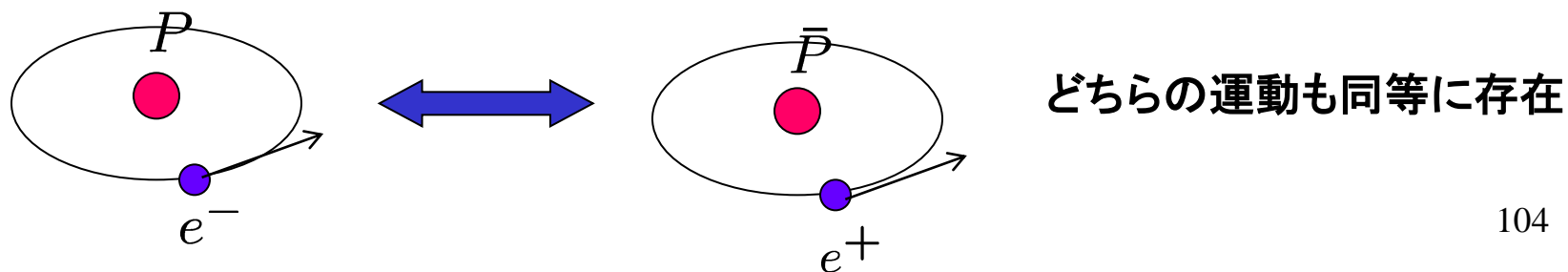
およびそれで構成される反物質が必ず存在する (Dirac)

例えば、 e^- (電子) \longleftrightarrow e^+ (陽電子)
 u (アップクォーク) \longleftrightarrow \bar{u} (反アップクォーク)

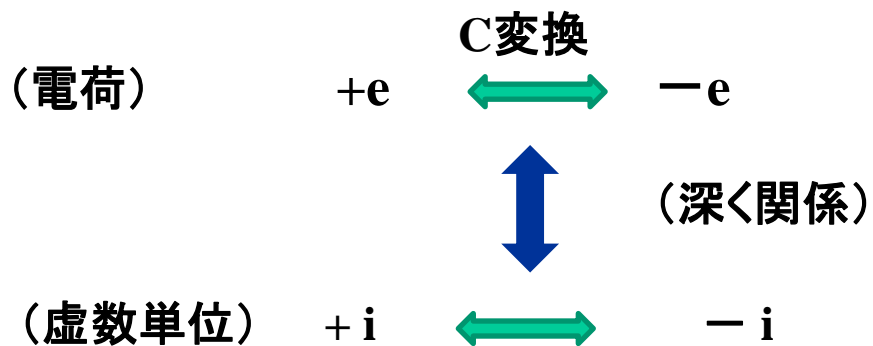
C変換 (charge conjugation (荷電共役)): 粒子と反粒子を互いに入れ替える変換

C対称性: C変換の下での物理法則の不変性

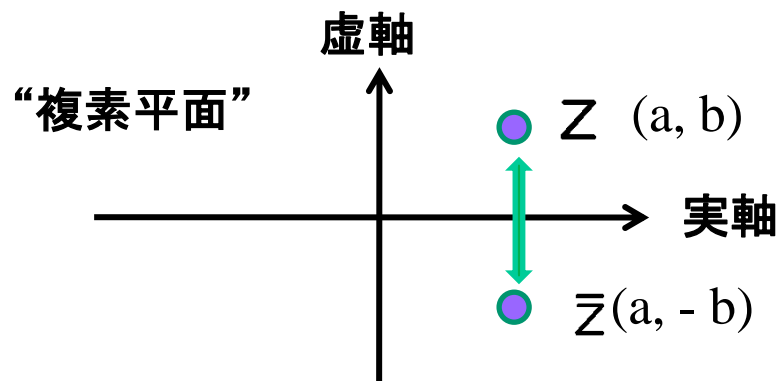
例えば、電磁相互作用ではC対称性がある:



C変換と複素共役



C変換: $Z = a + b i \longleftrightarrow \bar{Z} = a - b i$: 複素共役に関係



(C対称性: 線対称性と似ている)

弱い相互作用の世界ではP だけでなく、C対称性も破れている。

P やC 対称性の破れを端的に表す事 :

ベータ崩壊などの弱い相互作用に参加するのは :

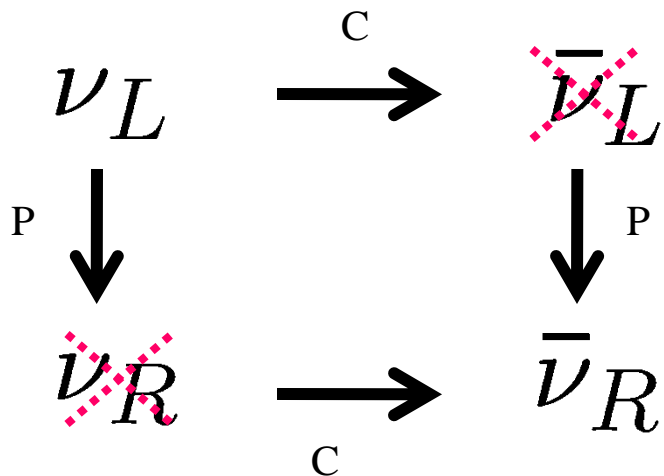
ニュートリノ : 「左巻き」ニュートリノ ν_L のみ

反ニュートリノ : 「右巻き」反ニュートリノ $\bar{\nu}_R$ のみ

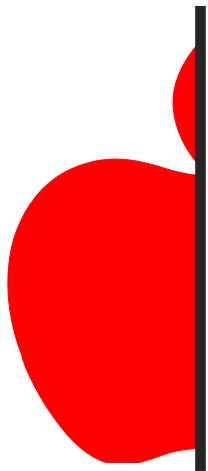
(右巻き、左巻きとは?)

クォーク やレプトンはコマの様に“自転”(スピ)している。スピ回転の方向に左ネジを回した時にネジが進む方向に運動している粒子 : 「左巻き」の粒子





変換先が存在しない
 → P や C 対称性は大きく
 破れている



ニュートリノについては、左半分しかないリンゴと同様に、
 左右の対称性や粒子・反粒子の対称性が完全に破れて
 (壊れて)いる！

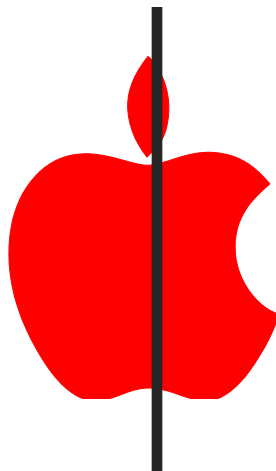
10.3 CP 対称性の破れと小林・益川の理論

CP 変換: C とPを組み合わせた(同時に行う)変換

$$\nu_L \xrightarrow{\text{CP}} \bar{\nu}_R \quad \text{:存在}$$

→ CP 対称性だけは破れない、としばらく考えられていた。

しかし、その後CP対称性さえもわずかに(千分の一の確率で)破れている事が、フィッチ・クローニンによる実験(米国BNL)により示された(1964)。



“CP対称性のわずかな破れ”

小林・益川理論：

このCP対称性の破れを3世代（6個）のクォークの導入により見事に説明。

CP変換：C同様、複素共役に深く関係

➡ CPの破れ：理論に複素数が存在することが必要

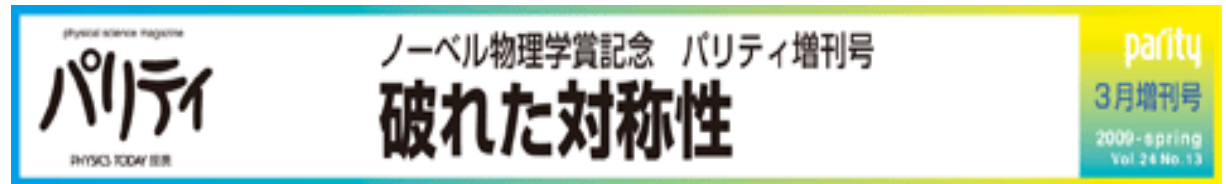
$$e^{i\delta} = \cos \delta + i \sin \delta$$

：小林・益川の論文の現れる“CPを破る位相”

(要点)

当時は3個のクォークの存在が知られていて、2世代(4個)のクォークが予言されていた。しかし、それだけでは理論の複雑さが足りずCPを破る位相が出ない。CPを破るためには3世代（6個）のクォークが必要であることを示した。

日本のKEK（高エネルギー加速器研究機構） やアメリカのSLAC（Stanford Linear Accelerator Center） における “**B - factory**” 実験で、**B 中間子（湯川のパイ中間子の仲間）の崩壊におけるCP対称性の破れが、小林・益川理論の予言通り起きることが確かめられ、小林・益川両氏に 2008 年度のノーベル物理学賞が授与された。**

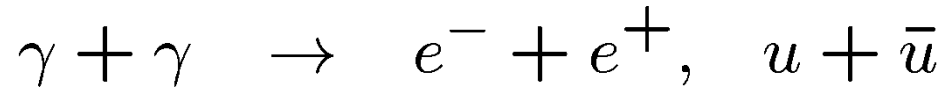


articles

「CPの破れの意味するところ」
林 青司

宇宙における消えた反物質の謎

初期宇宙においては、非常に高温のために（熱放射と同様に）宇宙は光で満ちていて



といった素粒子の相互作用によって、素粒子と反粒子、即ち物質と反物質は等量生成され、等量存在していたはず。

しかし一方において

- ・現在の宇宙には、反物質で出来た半原子、反星、反銀河、等は存在しないように見える
- ・また、反粒子（反物質）が生成されたとしても物質と出会うと対消滅してしまう。等量の物質と反物質があれば何も残らないはず。

なぜ反物質のみが消えて、物質のみが残ったのか？

“消えた反物質の謎” : 宇宙論の大問題

反物質が消え、物質のみが残るという事は、初期宇宙では等量あった物質、反物質の量の間、その後の宇宙の発展の過程で不均衡（アンバランス）が生じたという事。

こうしたアンバランスが生じるためには、次のような条件（サハロフの三条件）が必要である：

- ア. 粒子と反粒子を等量作らないような素粒子反応が存在する。
- イ. 素粒子相互作用においてCおよびCP対称性が破れている
- ウ. 熱平衡からのずれ（議論しない）

（注）ア、イの条件の説明

（ア. の条件）

例えば、前述の「大統一理論」では、次の様なX 粒子（陽子の崩壊を引き起こす粒子）の崩壊により、生成されるクォークと反クォークの数の間にアンバランスを起こす事が可能



この崩壊で、クォークは2個作られるのに対して反クォークは1個だけ作られる

(イ. の条件)

もしも、CあるいはCP対称性があると、粒子・反粒子を入れ替えた反応も同等に起きるので、(ア)の説明で述べたXの崩壊をCあるいはCP変換した

$$\bar{X} \rightarrow \bar{u} + \bar{d}, \quad \bar{X} \rightarrow u + e^{-}$$

の反応も同等に起きてしまい、今度は反粒子が多く生成され“元も子もなくなる”

そこで、(Cは大きく破れていることが知られていた) いかにしてCP対称性の破れを実現し、“消えた反物質”の謎を説明するか、が素粒子理論の大きな課題。

その意味で、CP対称性の破れを説明する

「小林・益川理論」

は、我々がなぜ存在出来ているのかを説明することを可能にした理論でもあると言える。

(注) ただし、小林・益川理論のみを用いると、宇宙で観測されている物質の量を十分には説明することが出来ないと言われている。