

## 第105回アブダクション研究会開催のご案内

### アブダクション研究会

世話人 福永 征夫

TEL & FAX 0774-65-5382

E-mail: [jrfd117@ybb.ne.jp](mailto:jrfd117@ybb.ne.jp)

事務局 岩下 幸功

TEL & FAX 042-35-3810

E-mail: [chaino@cf6.so-net.ne.jp](mailto:chaino@cf6.so-net.ne.jp)

### ■ホームページ■

<http://abductionri.jimdo.com/>

第105回アブダクション研究会の開催について、下記の通りご案内を申し上げます。

(1) 第104回アブダクション研究会のご報告をします。

■2015・9・26(土)に開催致しました、前回の第104回アブダクション研究会では、『輪読研究：吉田伸夫著《思考の飛躍－アインシュタインの頭脳－》(2010・新潮社)に学ぶ』というテーマの下に、次のように4人の会員(敬称略)に解説発表をしていただき、20世紀以降の学術をリードするに至った現代の科学革命の奔流について、他に代わる機会が見出せないような有意義で充実した研鑽と探究をすることができました。

はじめに＋第1章〈動くことと動かないこと・・・特殊相対論〉 福永 征夫

第2章〈四次元幾何学の饗宴・・・一般相対論〉 安平 哲太郎

第3章〈熱の背後に原子を見る・・・ブラウン運動〉 八尾 徹

第4章〈光の統計力学を求めて・・・量子論〉 大河原 敏男

第5章〈終わりなき論争・・・量子力学批判〉

＋終章〈見果てぬ夢－統一場の理論〉 福永 征夫

まずは、発表者のご努力を多とすると共に、素晴らしい研鑽と探究の機会を得ましたことに対して、発表者のご出席の皆様にご心から感謝しお礼を申し上げます。

## 【1】 アインシュタインの思考の飛躍について

この著作の冒頭では、主題であるアインシュタインの思考の飛躍について、次のように明快な記述がなされています。

《1》『新しい理論を作るためには、E（数々の直接的経験。実験データや観測結果なども含む）から仮説A（「公理系」となっている）へとジャンプしなければならない。EからAに至る論理的な道筋は存在しない。』  
というのがアインシュタイン自身による説明である。

《2》いったん仮説Aに到達すれば、そこから厳密に演繹的な作業によって、さまざまな命題Sが導き出される。

《3》命題Sと経験Eは関係づけることが可能であり、論理的に厳密とは言えないかもしれないが、何らかの形で仮説Aの妥当性を検証できる。

《4》このパターン自体は、アインシュタインが発明したわけではなく、19世紀以来、科学研究の基本的な方法論として知られている。

《5》アインシュタインの独自性は、経験Eから仮説Aへのジャンプが、既成概念にとらわれない自在さを持っていた点にある。

## 【2】 アブダクションのプロセスについて

わたくし（世話人）は、1996年におけるアブダクション研究会の創立当時から、アブダクションの概念、並びに、アブダクションによって構築した自然の相互作用モデルと脳の情報処理モデルについて、研究会と日本認知科学会など、いくつかの学際的な学会で数多くの発表をし提案をさせていただいていますが、上記との関連では、次のように思案しています。

《1》経験群Eから仮説Aへのジャンプが、既成概念にとらわれない自在さを持ってなされている、この思考のプロセスは、典型的なアブダクションのプロセスである。

《2》“驚くべき”現象としての、ある経験Eは、既存の領域的な知識からは導出できない驚くべき帰結である。

《3》その帰結は、既存の知識の論理とは、矛盾したり、不調和であったり、断絶するものである。

《4》そこで、その矛盾・不調和・断絶を補填できそうな、新しいアイデアや知識を、既存の経験群Eを材料にして探求しなければならない。

《5》そのような新たなアイデアや知識が得られたならば、これと既存の領域的な知識を接ぎ木によって接合する。

《6》知識の原木の部分と接ぎ木部分を、臨界的に融合させて、新しい高次の領域的な知識（公理系）として再構築する。

《7》この新しい高次の領域的な知識（公理系）から、ある驚くべき現象としての、ある経験Eを論理的に説明できる定理Sを導出する。

《8》このようなプロセスは、多かれ少なかれ、先人や同時代人の経験群Eから得られる知見や経験を踏まえてなされるもので、それらから独立して遂行されるものではない。アインシュタインの事績といえども、その例外ではない。

《9》現実には、この新しい高次の領域的な知識（公理系）を構築するプロセスは、当然のことながら、それから導出される定理Sを描像し、予期しながら遂行されるものである。

### 【3】『光量子論』が現代の科学革命の幕開けを告げる

アインシュタインの数々の業績の中で、主題の著作《思考の飛躍—アインシュタインの頭脳—》第1章の特殊相対性理論と、第2章の一般相対性理論が最もよく知られています。

他方、ここでは、第4章で取り上げられている『光量子論』の重要性について、主として、吉田伸夫著「光の場、電子の海—量子場理論への道」から抜粋引用し、皆様のご留意を促しておきたいと思います。

《1》1905年3月、アインシュタインは、ブラウン運動や特殊相対論の研究に先立って、光量子論を発表する。

この理論は、彼の全業績の中でも一般相対論に次ぐ優れた成果であり、彼以外の誰が考案できたか想像するのも難しいほど革新的で、それまでの常識から懸け離れた突飛な内容だった。

光が粒子性と波動性を併せ持つという光量子論で、粒子性と波動性が必ずしも排他的ではないという革新的なアイデアが提唱されたのだ。

《2》アインシュタインの発想がいかに飛躍していたかは、当時、光がどのようなものとして捉えられていたかを知ると納得できるだろう。

《3》17世紀にニュートンが光は粒子の流れだと主張して以来、「光の粒子説」は100年以上にわたってヨーロッパの学界を支配したが、19世紀初頭になると、光が波であることを示す実験的証拠が集まってきた。

《4》特に有名なのは、1805年頃にヤングが行った二重スリットの実験である。光源から放射された光を2本の平行なスリットに通すと、背後にあるスクリーン上に濃淡の縞模様ができる。これは、別々のスリットを通った光が干渉して生じる現象であり、バラバラに飛んでくる粒子では起こるはずのないものである。

《5》決定的な進歩は、マクスウェルの電磁気学によってもたらされた。電磁場の方程式を解くことにより、光の正体が、電場と磁場の振動が伝わっていく過程だと判明したのである。古典物理学の金字塔とも言えるこの理論に対して、19世紀末から20世紀初頭の物理学者は、絶大な信頼を寄せていた。量子仮説を最初に提唱したマックス・プランクや特殊相対論の一手手前まで到達していたヘンドリック・ローレンツも、マクスウェルの電磁気学に修正を加える必要性を全く感じていなかった。

《6》ところが、アインシュタインの光量子論は、マクスウェルの権威に真っ向から立ち向かうものだった。光量子論とは、光を、空間のある地点に局在するエネルギーの塊（エネルギー量子）の集まりと見なす理論である。直観的な言い方をすれば、光は粒子のようなものだということになる。これは、100年前に打倒されたはずの古くさい光の粒子説を復活させる理論と受け取られかねない。

《7》光量子論の評判がすこぶる悪かったのも、無理からぬことだった。電磁波は、電場と磁場が相互に振動を誘起しあうことで発生する。バラバラに飛び交う光の粒子が、どうやって振動を誘起させられると言うのか。1901年、マルコーニが大西洋を越えて無線通信を行った際に利用した電磁波の波長は360メートルもあったが、この長大なうねりの中で、光の粒子たちはどのように編隊を組んで波の形を維持していたのか。あるいは、ヤングの二重スリットの実験で、いったん二手に分かれた光の粒子が、再び出会ったときにどのように連絡を取り合って明暗の縞模様を作れるのか。どう考えても、アインシュタインに勝ち目はなさそうだ。

《8》光量子論が学界で評価されるようになるのは、1915年にアメリカの物理学者ロバー

ト・ミリカンが光電効果の精密測定を行い、理論で予測された通りの結果が得られてからである。

《9》にもかかわらず、物理学の歴史が示すように、光量子論は、近代と現代を分かつ科学革命の幕開けを告げることになる。

実は、この理論を、「光とはバラバラに飛んでくる粒子の集まりだ」と素朴に解釈するのが、そもそもの間違いなのである。

光量子論とは、「光はエネルギーの塊のように振舞うが、単なる粒子ではない」といういささか捉えどころのない理論であり、

自己矛盾をはらんでいるとも思えるこの多義性が、ニールス・ボーアやレイ・ド・ブロイらによる量子論の次なる発展を可能にしたのである。

アインシュタインといえども、光量子論を一人で作り上げることはできるはずもない。

これに先立つものとして、ウィーンとプランクという二人の先駆者の業績を挙げておかねばならない。

喩えて言えば、ウィーン、プランク、アインシュタインによる三段跳びの要領で、巨大な跳躍をなし得たのである。

---

■主題の著作、吉田伸夫著《思考の飛躍—アインシュタインの頭脳—》では、全5章にわたって通常の科学書では期待できないような緻密で濃密な記述が展開されています。

このレポートでは、第1章の特殊相対性理論と、第2章の一般相対性理論の二つに的を絞るとともに、他の二つの有力文献からの解説も加えて、三部構成で取りまとめの資料を編成し、案内状の最後部に掲載しました。

◇第一部 わかる！相対性理論超入門 佐藤勝彦監修 (2015・宝島社)

◇第二部 相対性理論の一世紀 広瀬立成著 (2014・講談社)

◇第三部 思考の飛躍—アインシュタインの頭脳—吉田伸夫著 (2010・新潮社)

■アインシュタインの理論の特徴である「相対性原理」と「光速度不変の原理」について漸進的に馴染みながら、そして、全体の枠組みを捉えながら、主題の著作に入っていくのが合理的だと思われるので、そのような編成にいたしました

皆様には、何卒、繰り返しながら、粘り強くお読み取りいただくことを期待しています。

■ その他の参考文献を挙げておきます。

- (1) 佐藤勝彦著「アインシュタインの宇宙----最新宇宙学と謎の宇宙項」(2009・角川文庫)
- (2) 内井惣七著「アインシュタインの思考をたどる---時空の哲学入門」(2004・ミネルヴァ書房)
- (3) リリアン・R・リーバー著=水谷淳訳「数学は相対論を語る」(2012・ソフトバンク/クリエイティブ)
- (4) 吉田伸夫著「光の場、電子の海----量子場理論への道」(2008・新潮社)
- (5) 資料・「第99回アブダクション研究会のご案内」(2014・11・18)

---

■ところで、話題が変わりますが、わたくしは最近、著しい高齢化と少子化の中で、高齢者と若年者が抱える、ある面の課題について、身じかに痛感する機会を経験いたしました。

■2015年7月の中旬に、会員の皆様に配信しました世話人のエッセイを、下記に再録しますので、ご高覧ください。

### 環境が人間の能力を発展させたり、錆びつかせたりする

◇わたくしには、現在の高齢化と環境問題の趨勢がピークアウトするとされている、2050年に向かって進んでいるこの時期に、どうしても方向づけておかなければいけないコンセプトがあるように思われます。

◇それは、①人との会話を不得手にし好まない若年者が増えていることに歯止めをすることと、②高齢者の概念を熟達者の概念に転換して、人は生活習慣を刷新すればいつまでも伸び続けるのだという社会の通念と確信を築くことです。

◇ある都内の公共施設の会議室をお借りして、アブダクション研究会を開催したのですが、講演者の説明資料を投射するプロジェクターが機能しないという失敗をしました。

◇以前のNEC会館では専門の人にやってもらっていましたが、学会の発表でもスタッフがやってくれますので、わたくし自身がプロジェクターの扱いを知らなくてもよかったのです。

◇新しい会場ではその条件がなくなっていたのです。

ピンチに遭遇して、わたくしは現場で方法の限りをつくしたのですが、かなわなかったのです。

◇その翌日から、調査を始めました。

映らなかった機械A（品番を記録しておきました）、機械B（品番を記録しておきました）、ともにエプソン製でしたのでメーカーサイドに確かめました。

福永：プロジェクターのコネクターは、マイナスピ（メスピ）。

PCのコネクターもマイナスピ（メスピ）。

両方をつなぐには、プラスピ（オスピ）とプラスピ（オスピ）を両端にもつケーブルが必要なのですが、機械Aにも機械Bにもついていないのは、どういうわけなのですか。

会場の担当の方に重ねて聞いても、そのようなケーブルはありませんという返事だったのです。

メーカーサイド：機械Aには付属品としてついていたはずですが。

機械Bではユーザーが用意する必要があります。

福永：機械Bには、PCのUSBから、プロジェクターのUSB端子に接続するコードがあったものから、それに接続の機能があるものと推定して、いろいろやってみたのです。

ところが、全く結果がでなかったのです。

メーカーサイド：機械BのUSB経路を利用するには、PC側にソフトのインストールが必要です。

◇われわれは、以上のようなボトルネックによって、失敗すべくして失敗したのだということが判明したのでした。

会場の施設側にも配慮の不足があったのですが、いまさら言っても、覆水は盆には返りません。

わたしくに事前の知識なり取り扱いの経験さえあれば、近所の電気屋さんから、プラスピ（オスピ）とプラスピ（オスピ）を両端にもつケーブルを緊急調達することもできたし、USB経路を利用することもできたのです。

◇ところで、都内にある、次のアブダクション研究会の会場を事前にチェックしたところ、プロジェクターの借用料がかなり高額なのです。

より低額品の借用の交渉をしましたが、自己防衛も必要と考えて、携帯用の自前のプロジェクターをネットで購入しました。

そして、くだんのプラスピン（オスピン）とプラスピン（オスピン）を両端にもつ5mケーブルを手に入れるため、辺鄙な立地のA電気という量販店に雨の中をタクシーで往復しました。

◇この量販店のA電気に関連して、わたくしが見聞きしたことは、またもや驚きの経験でした。スタッフの人は、物品の場所まで案内してくれるのですが、ほとんど会話の機会を与えようとしないかのような無口な接客様式なのです。

帰りのタクシーの運転者が物知りの人でしたので、聞きましたら、最近の若い人には、初めての人と丁寧な言葉でやりとりするのを好まない、もっと言えば、嫌がり、忌避する傾向が増えているので、

量販店のA電気は、それに合わせた接客様式をベースにしているようだという話をしてくれました。

◇わたしがネットで取得した携帯用プロジェクターを試して見たのですが、やはりパワーが不足していて、大きな会議室での利用には向かないことも、経験をして見て、やっと分かったことなのでした。

◇いかにして、熟達者が新しいことを経験しながら社会生活をするように、自分を仕向けていくことができるのか。

◇若年者が、他者とのコミュニケーションの習慣を充実させるように、いかにして、自分を仕向けていくことができるか。

◇必要は発明の母とはよく言ったもので、環境が人間の能力を固定化したり、発展もさせるのです。

わたくしには、2050年に向かって進んでいるこの時期に、熟達者と若年者の社会的な活性化策は、どうしても方向づけておかなければいけないことだと思われます。

以 上



(2) アブダクション研究会は本年12月に創設20周年を迎えます。

今年は歩んできた道を踏みしめ、次なる30周年に向けて、新たなステージの夢と展望を描いて共有し、気持ちも新たに有意義なスタートを切ってまいりたいと存じています。

(3) 各界、各分野の皆様の積極的なご参加をお願いします。

既存の領域的な知識をベースにして、新たな領域的な知識を探索し、それらを広域的な知識に組み換えて、より高次の領域的な知識を仮説形式的に創造することを目標に、アブダクション研究の飛躍を期してまいりますので、各界、各分野、各層の皆様のご積極的なご参加をお願いします。

(4) アブダクション研究会は、知識の広域化と高次化を目指し進化を続けてまいります。

1996年に設立されたアブダクション研究会は、地球規模の難題に真正面から対処するために、知識の広域化と高次化を目指し、いつまでも、真摯に、勇気を持って、粘り強く、積極的に、可能性を追求し、多様な探究を積み重ねて、一步一步進化を続けてまいります。

(5) 発表をしてみたいテーマのご希望があれば、世話人宛に、積極的にお申し出下さい。

皆様には、今後に、ぜひとも発表をしてみたいテーマのご希望があれば、世話人宛に積極的にお申し出をいただきたく、お願いを申し上げます。お申し出は、通年的にいつでも、お受け入れをいたします。上記の方向に沿うものなら、いかなる領域に属するいかなるテーマであっても、将来の可能性として、誠意を持って相談をさせていただき、実現に向けて調整を果たす所存であります。

記

◇ 日時： 2015年11月14日(土) 13:00~17:00(本会)  
17:15~19:15(懇親会)

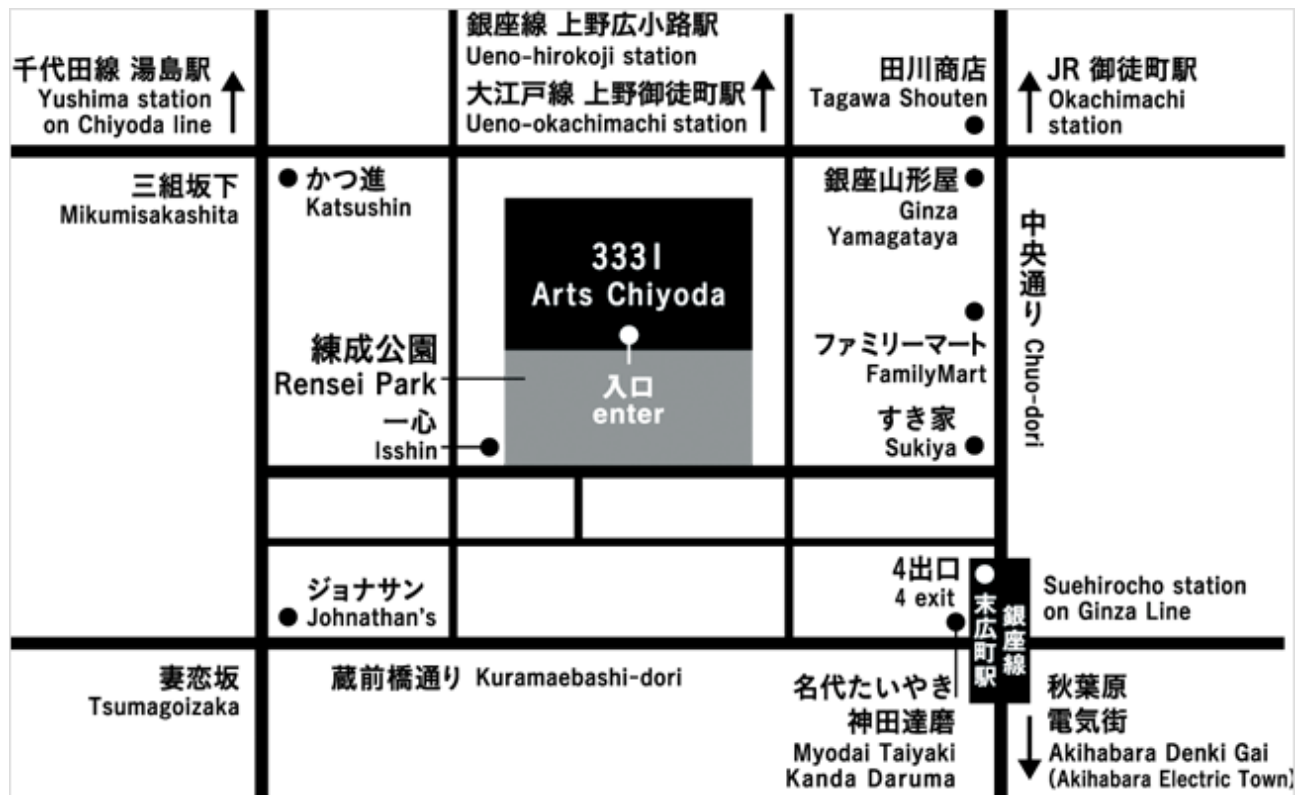
◇ 場所： 3331 Arts Chiyoda 1階・ラウンジ

〒101-0021 東京都千代田区外神田6丁目11-14(旧・練成中学校内)

TEL 03-6803-2441(代表)

東京メトロ・銀座線 末広町下車④出口 徒歩10分 練成公園隣の旧・練成中学校内です。

\* 当日の連絡先(福永征夫・携帯電話)080-3515-9184



◇ テーマ：

研究発表

# 『エコロジー経済学・環境経済学の学術動向を概観する』

村山 紘士 氏

(東北大学・農学部・資源環境経済学専攻)

■アブダクション研究会は、さらに新たな知識の領域に漕ぎ出します。  
会員の皆様には、積極的なご参画をお願いします。

\*\*\*\*\*

## ◇プログラム：

- |                              |                    |
|------------------------------|--------------------|
| (1) 解説発表[ PART-1 ]           | <u>13:00~14:00</u> |
| <小休止>                        | 14:00~14:10        |
| (2) 解説発表[ PART-2 ]           | <u>14:10~15:10</u> |
| <小休止>                        | 15:10~15:20        |
| (3) 総合的な質疑応答：                | <u>15:20~16:50</u> |
| (4) 諸連絡：                     | 16:50~17:00        |
| (5) 懇親会：<皆様の積極的なご参加を期待しています> | <u>17:15~19:15</u> |

\*\*\*\*\*

◇皆様をお願いします◇

【第105回 アブダクション研究会の出欠連絡について】

- 11/9（月）までに、下欄の要領で、必ず、ご返信ください。
- なお、研究会会場では、飲み物のサービスがありませんので、皆様が各自で、ペット・ボトルや水筒をご持参ください。

\*\*\*\*\*

第105回 アブダクション研究会（11/14）の出欠連絡

- 11/9（月）までに、必ず、ご返信ください。
- 研究会、懇親会とも、必ず、下記により、ご連絡ください。  
新会場のため、研究会、懇親会とも、より綿密な準備が必要なことを、何卒、ご理解ください。

FA X： 042-356-3810  
E-mail： [chaino@cf6.so-net.ne.jp](mailto:chaino@cf6.so-net.ne.jp) 岩下 幸功 行

- |                 |    |              |    |
|-----------------|----|--------------|----|
| ●11/14（土）の研究会に、 | 出席 | ●懇親会に、       | 出席 |
| 未定ですが調整 します。    | 出席 | 未定ですが調整 します。 | 出席 |
|                 | 欠席 |              | 欠席 |

ご署名 \_\_\_\_\_

\*\*\*\*\*

■次々回 2016年1月度の第106回アブダクション研究会は、  
2016年1月30日（土）または1月23日（土）に開催する方向で、会場の確保に  
当たろうとしています。  
12月の第1週には、決定して、ご連絡を申し上げますので、ご理解ください。

■ 2016年は、いよいよ、自然の「システム」学に挑戦する「輪読研究」が始まります。「輪読研究テーマ」への参加者の決定が円滑に運びますよう、皆様には、積極果敢なお申し出をいただきますよう、お願いをいたします。

■ 2016年1月度のテーマは、次の通りです。

● テーマ：＜「よくわかる生理学の基本としくみ」＝當瀬規嗣著・2006（株）秀和システム＝を輪読研究して、生理学のシステムを考える＞

● 輪読研究の発表者：2015年11月に募集して決定する。

■ 皆様には、今から予定をしっかりと確保していただいて、積極的に、ご参画くださいますようお願いいたします。

\*\*\*\*\*

#### ＜定例アンケート調査＞

もしご協力がいただければ、という趣旨であり、必須ではありません。

皆様のメッセージ集として他の会員にも伝達しますので、情報の交流に積極的に参画下さい。

- (1) 今、アブダクションの研究・実践と関連のある事項で特に興味をもって取り組んでおられること。
- (2) 研究会の議論の場を通して INTERSECTIONAL なアイデアや知見の INCUBATION が進んでおり、例会で発表したいと思っておられること。
- (3) これまで（第1回～第104回）の研究発表やなされた議論（「議事録」を参照下さい）に関して、さらに改めて質疑や意見を表明したいと考えておられること
- (4) アブダクションの観点から、注目すべき人・研究グループ・著書（古今東西不問）。
- (5) 細分化された「知」の再構築を図るという視点から、注目すべき人・研究グループ・著書（古今東西不問）。
- (6) 貴方ご自身がお考えになられている「知」の定義とは？
- (7) その他のご意見、ご要望、連絡事項など。

特に他学会・研究会での発表内容や発表論文等についても是非お知らせ下さい。

.....  
.....  
.....  
.....

.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....

\*\*\*\*\*

## 第一部 わかる！相対性理論超入門

佐藤勝彦監修（2015・宝島社）から抜粋引用  
をさせていただきました。

### 【光速度不変の原理】

#### 光の正体をめぐって

##### 【1】

◇特殊相対性理論は「光の謎」を解き明かすことで誕生しました。

光について科学的な考察を行ったのは、あのニュートンでした。

ニュートンは光の正体を「粒子の集まり」だと主張しました。

光が物体にさえぎられて影ができるのは、光の正体が小さな粒子だからと考えたのです。

◇一方、ニュートンと同時代の科学者であるホイヘンスは、光の正体を波であると主張しました。

光同士がぶつかっても向きを変えないのは、光の正体が波であるからだというのが、その理由でした。

◇光の正体をめぐる論争は、多くの科学者を巻き込んで長く続きました。

ですが19世紀後半には光の正体は波だということに落ち着きました。

光には干渉（光同士を重ねると強め合う部分と弱め合う部分とが交互に生じる「干渉縞（かんしょうじま）」が表れる）という、波特有の性質を示すことが明らかになったためです。

◇“波”というと身近な例では、音の正体である音波や、水の波などをすぐに思いつくでしょう。

これらの波には共通の特徴があります。

波を伝えるものが必要だということです。

水の波は水を伝わりますし、音波は空気中を伝わります。

地球の内部を伝わる地震波という波もあります。

とにかく波は、それ伝えるものが必要なのです。

その“伝えるもの”のことを、「媒質（ばいしつ）」と呼びます。

音波の媒質は空気、水の波の媒質は水、地震波の媒質は地球内部の物質（地殻やマントルなど）というわけです。

## 光の媒質を探せ

### 【2】

◇光が波だとすると光にも媒質があるはずだと、当時の科学者は考えました。

そしてその媒質を「エーテル」と名付けて、必死になって探し始めたのです。

エーテルとはもともと、古代ギリシャにおいて「天上の空気」と考えられた物質です。

古代ギリシャの哲学者アリストテレスは、天上界は地上の物質とは違う、特別な元素であるエーテルでできていると考えました。

太陽からはもちろん、遠い星からも光は届きます。

ということは光を伝えるためのエーテルは、宇宙全体にまんべんなく存在しているはずで

地球などの惑星はそのエーテルが満ちた空間の中を公転しているということになります。

◇媒質が硬いほうが波は速く伝わる性質があります。

だとすると超高速の光を伝えるエーテルは、おそらく想像を絶するほどに硬くないといけないことになりそうです。

そんな硬いものの中を、どうやって地球は動きつづけることができるのでしょうか。

そんな疑問がありつつも、当時の科学者はとにかくエーテルが存在するはずだと信じていたのです。

## エーテルの風が吹く？

### 【3】

◇風のない穏やかな日に、自転車で走ると風が吹いているように感じます。

実は自分が動いているのですが、周りの空気が動いているように感じるわけです。

宇宙空間にエーテルがまんべんなく存在していて、地球がその中を動いているのだとしたら、同じことが起きるでしょう。

◇地球は太陽のまわりを秒速30キロメートル程度のスピードで公転しています。

ということは地球から見ると、秒速30キロメートルでまわりのエーテルが動いている、言いかえれば

“エーテルの風”が吹いているように見えることになります。

◇光がエーテルを伝わるのであれば、風上（地球の進行方向）からくる光のスピードは、エーテルの風のスピードがプラスされることになります。

いってみれば、風に乗ってスピードが増した状態になるのです。

光がどんな向きに向かっていても、必ずこの風が光のスピードに影響を与えます。

その風の影響を計測することができれば、エーテルの存在を確かめられるはずだと、19世紀後半の物理学者たちは考えていました。

## マイケルソンとモーレーの実験

### 【4】

◇エーテルの存在を証明しようとした実験の一つが、アメリカの物理学者、マイケルソンとモーレーによって1887年に行われました。

◇マイケルソンとモーレーの実験装置は、光源と検出装置、二枚の鏡、中央のハーフミラーでできています。

ハーフミラーは、光を半分反射し、半分透過する半透明の鏡のことです。

（福永注：丸く広いテーブル形の装置。

装置を時計の形状に見立てると、0分を上、30分を下にして置く。

時計の針軸の位置にハーフミラー。

光源は45分の位置。

検出器は30分の位置。

鏡Aは0分の位置。

鏡Bは15分の位置。

エーテルの風は、鏡Aと検出器を結ぶ線に対して、直交するように右側から吹く。）

◇光源から出た光はハーフミラーで二つに分かれ、反射した光は鏡Aで、透過した光は鏡Bで反射したあと検出器へと向かいます。

なおハーフミラーから二つの鏡までの距離は同じです。

◇光源からハーフミラーまでと、ハーフミラーから検出器までは、どちらの光も同じ経路をたどります。

（福永注：ハーフミラーと鏡Aの往復経路を（a）、ハーフミラーと鏡Bの往復経路を（b）とする。）

（a）を通る光はエーテルの風を横から受け、（b）を通る光は風を正面と背後から受けます。

◇（a）と（b）とでは風の受け方が違いますから、光のスピードも変わるはずですが。

マイケルソンとモーレーは、その違いを計測しようとしたのです。



◇地球の公転速度（秒速30キロメートル）は、光速（秒速30万キロメートル）に対して約一万分の一と非常に小さいのですが、マイケルソンとモーレーの実験装置は光速の一億分の一の変化まで検出できる精度がありました。

光速に違いがあれば、必ず検出できるはずだったのです。

◇しかし結果は、何度やっても、装置の向きを変えて試してみても、向きによる光速の違いを検出することができませんでした。

光速はすべて同じであり、エーテルの影響を見つけることができなかったのです。

## 誰から見ても光の速さは常に一定

### 【5】

◇マイケルソンとモーレーの実験結果は、当時の物理学者たちの頭を悩ませました。

そこで彼らは、エーテルが存在し、かつ光速が一定になるようにいろいろな仮説を考えたのですが、その多くは何とか辻褃を合わせようとするだけのものでした。

◇そんな状況の中アインシュタインは、光速が常に不変であるということを前提として考えることにしました。

「光源が動こうが、観測者が動こうが、誰から見ても光の速さは常に一定で不変である」ことを、とにかくまず事実として受け入れてしまおうと考えたのです。まさに逆転の発想でした。

◇たとえば時速40キロメートルで走る車から、反対車線を走る時速40キロメートルの車を見ると、時速80キロメートルで走っているように見えます。

しかし光の場合はそうではないとアインシュタインはいうのです。

向こうからやってくる光を、止まっている人が見ても秒速30万キロメートルに見えるし、秒速20万キロメートルで走っている人（そのように動けると仮定して、ですが）が見ても、秒速30万キロメートルという同じ速度に見えるというのです。

## 光速度不変の原理

### 【6】

◇不思議だろうが何だろうが、アインシュタインはとにかくそれをまずは受け入れて、そこから考えをスタートさせました。

◇これは「光速度不変の原理」と呼ばれ、「相対性原理」とともに特殊相対性理論の基本原理の一つに

なっています。

◇ご存じのように、速さはふつう「移動した距離（空間）をかかった時間で割る」ことで計算します。「速さ＝距離（空間）÷時間」ですね。

ふつうの感覚では、時間と空間をもとにして速さを計算するのですが、速さが一定不変だとしたらどうなるでしょう。

その場合、逆に速さをもとにして時間と空間を考えていかなければいけなくなります。

特殊相対性理論では、一見すると常識からかけ離れた話がでてくるのはそのためなのです。

、

## 【相対性原理】

### 大地は動いているか？

#### 【7】

◇アインシュタインが光速不変の原理とともに、特殊相対性理論を作り上げるに当たって土台としたものはもう一つあります。

「（アインシュタインの）相対性原理」とよばれる原理です。

実は相対性原理はかつてガリレオ・ガリレイが唱えたものなのですが、アインシュタインはそれを少し発展させて、特殊相対性理論の基礎としたのです。

◇朝には東の地平線から太陽が昇り、夕方に西の地平線へ沈みます。

月も空を同じように動いていきます。

夜に北の空を見ると、北極星を中心に星々が円を描くように動いていきます。

これらの現象が起きるのは、地球が自転をしているからだというのは、今では小学生でも知っています。

ただこれは、学校で習ったから知っているのもあって、実感としては大地が止まっていて空の方が動いていると思うのが普通ではないでしょうか。

◇ガリレオ・ガリレイが地動説を唱えていたころ、

「もし大地が動いているのだとしたら、高い建物の上から石を落としたとき、大地が動いたぶんだけ石はずれた場所に落ちるはずだ。

しかし実際には、石は真下に落ちるじゃないか」という反論がありました。

### 動く船の例で考える

## 【8】

◇それに対してガリレオは、等速直線運動で海上を進む船での例を考えました。  
等速直線運動というのは、一定のスピードで真っすぐ進む運動のことです。  
曲がったり加速・減速したりすると等速直線運動にはなりません。

◇動く船のマストの上から石を落とすと、石はマストの根元に落ちます。  
等速直線運動をしている電車の中で何かを落としたときのことを考えれば、マストの根元に石が落ちることは納得がいくと思いますが、どうしてそうなるのでしょうか。

◇動いている船を急に止めることはできません。  
船に勢いがついているからです。  
船の上にあるものも船と一緒に動いていますから、船と同じように勢いがついています。  
マスト上から落とした石にも勢いがついていて、前方に投げ出されながら下へ落ちていきます。  
そのため、石はマストの根元に落ちるのです。  
このとき、船の外で止まっている人から見ると、落ちていく石は斜めに落ちていくように見えます。

◇ところで、動く船のマストの上から石を落とすと根元に落ちますが、止まっている船でマストの上から石を落としても、当然ながら石はマストの根元に落ちます。  
止まっている場所と、等速直線運動している場所とで、石は同じような運動をする、つまりどちらでも同じ運動法則が成り立つとするのが、「ガリレオの相対性原理」です。

◇このガリレオの相対性原理は、止まっている場所と等速直線運動をしている場所では同じ運動法則が成り立つとしていましたが、  
アインシュタインは光の振る舞いも含めたすべての物理法則が成り立つとしました。  
これが「アインシュタインの相対性原理」です。

## 宇宙には止まっている場所はあるのか

## 【9】

◇地球や太陽から遠く離れた宇宙空間で、宇宙船が等速直線運動をしていたとします。  
空に浮かぶ星々は非常に遠くにあるため、宇宙船が多少動いたとしても、電車の車窓から見る景色のように後ろへ飛んでいったりはしません。  
そんな状況で、宇宙船が等速直線運動をしているのか、止まっているのかを判断することはできるのでしょうか。

◇すでに述べたように、止まっても等速直線運動をしていても、同じ物理法則が成り立ちます。  
つまり宇宙船が止まっても動いても、宇宙船内ではすべてがまったく同じように動きます。

そのような状況では、動いているか止まっているかを区別することはできません。

◇では、その状況で前方から別の宇宙船が近づいてきたとしたらどうでしょう。  
このときもやはり、自分が動いているのか、相手が動いているのかはわかりません。

◇自分を基準にすれば相手が動いているといえますし、相手を基準にすれば自分が動いているといえます。  
両方とも動いているのかもしれません。

◇アイザック・ニュートンは、完全に静止していて物体の運動の基準になる場所が宇宙のどこかに存在していると考え、それを「絶対空間」と呼んでいました。  
もし絶対空間があるのなら、上の宇宙船は、絶対空間に対して動いているのか止まっているのかを判断することができるでしょう。

◇では実際にそんな場所はあるのでしょうか。  
日常生活では、地面を基準にして電車や車などが動いているかどうかを判断しています。  
しかし地球は自転しながら太陽の周りを秒速約30キロメートルで公転しているのですから、地面が止まっているとはいえません。  
太陽が止まっているわけでもありません。太陽は銀河系内を秒速約220キロメートルで動いています。  
さらに銀河系も宇宙の中で動いていることがわかっています。

◇このように考えていくと、宇宙には絶対的に静止している場所というのはどうもなさそうです。  
アインシュタインはニュートンの絶対空間という考え方を否定して相対性理論を作り上げていきます。

## 第二部 相対性理論の一世紀

広瀬立成著（2014・講談社）から抜粋引用  
をさせていただきました。

### 【先駆者ローレンツ】

#### 【10】

◇特殊相対性理論を説明するのに先立って、19世紀末から20世紀はじめにかけて定着していた「静止エーテル説」をめぐる物理学会の状況を見ておこう。

◇エーテル説によれば、宇宙は、エーテルという観測不能な物質によって満たされている。  
エーテルは、運動する天体などの近くを除けば、全体として宇宙のなかで静止しており、そして光はエーテルのなかを毎秒30万キロメートル（これをcと記す）の速さで伝わっていく。

◇このときの光の速さcは、エーテル中に静止した観測者から見たものだ。  
もし、観測者が光を追いかけるようにエーテル中を動いていたら、その観測者から見た光の速さは遅くなるだろう。

「時速300キロメートルの列車を時速100キロメートルで追いかける自動車のドライバーには、列車は時速200キロメートルで走っているように見える」という例を思い出してほしい。  
地球はエーテル中を運動しているわけだから、地球上の観測者から見れば、光の速さは当然cからずれるはずだ-----これが、当時の物理学者たちに常識として広く受けいれられていた考え方である。

◇このような状況のなかで1887年、マイケルソンとモーリーの実験が行なわれた。  
そして、実験は光速のズレを見いだすことができなかった。

◇この実験の解釈に正面から取り組み、大きな成果をあげたのはローレンツだった。  
かれによれば、光速のズレが観測されなかったのはエーテルの影響により、  
運動物体の長さが収縮するからで、  
エーテル中を運動する物体の長さは、その速度vに依存して縮む。

（福永注：ここでいう運動物体とは、マイケルソンとモーリーが実験で用いた観測装置を意味する：  
具体的には、前記【4】の（b）の長さが縮むのだという）。

◇その収縮率 $\delta$ は、 $\delta = \sqrt{1 - (v/c)^2}$  であるという。

（福永注：この収縮率を導出した過程については、リリアン・R・リーバー著（水谷淳訳）『数学は相対論を語る』（2012・ソフトバンク＝クリエイティブ）p9～16を参照されたい）。

vにさまざまな値を代入してみると、

v=0.1cのとき  $\delta=0.99$   
v=0.6cのとき  $\delta=0.8$   
v=0.8cのとき  $\delta=0.6$   
v=0.99cのとき  $\delta=0.14$

となり、速度vが大きくなればなるほど、観測される運動物体の長さが短くなっていくことがわかる。

◇この収縮説は1892年にはじめて発表されたが、  
その後もかれは考察を重ね（1902年には電子論の業績でノーベル物理学賞をうけた）、「ローレン

ツ変換」とよばれる公式を1904年に公表した。

特殊相対性理論が発表される1年前だ。

これは二つの慣性系における時間と空間の関係をあらわすもので、異なる慣性系では、時間と空間の尺度がどのように変換されるかを正しく記述している。

◇翌1905年、フランスのアンリ・ポアンカレはローレンツの理論に検討を加え、数学的にいっそう完全な定式化をあたえた。

◇ローレンツ変換の公式は、その数学的な面だけを見ると、アインシュタインが特殊相対性理論で導いたものと完全に一致する。

だが両者の理論の基礎となる物理的な考え方はまったくちがっていた。

ローレンツは依然としてエーテルの存在を前提としていたし、ポアンカレもまた、アインシュタインとはちがって、ニュートン以来の常識を破る新しい認識にまでは踏みこめなかった。

◇当時アインシュタインはベルンの特許局の一技官にすぎず、学界の体制からは孤立していたため、1904年のローレンツの論文には気づいていなかったという。

(福永注：この点は、後出の吉田伸夫の記述とは、ニュアンスを異にするようだ)。

つまりアインシュタインはローレンツとは異なる観点から考察を進めていったのだ。

## 【特殊相対性理論】

### 【11】

◇まず最初にアインシュタインは、理論を構築する前提として二つの原理を定めた。

(1) 相対性原理・・・あらゆる慣性系で物理法則は同じ形式で書きあらわされる。

(2) 光速度不変の原理・・・光は光源の速度の如何にかかわらず、同じ速度をもつ。

◇このうち(1)相対性原理は理念的なもので、この宇宙は理解可能であり、私たちは普遍的な物理学を構築することができるはずだという、アインシュタインの信念にもとづく。

◇いっぽう(2)光速度不変の原理は、実験的事実にもとづく経験則だ(もっともほとんどの物理学者は、これを自明の理とは考えていなかった)。

◇この二つの原理から、奇妙な結論が導かれる。

(3)「時間の尺度」と「空間の尺度」は慣性系によって異なる。

## 【12】

◇光の速度とは「光が進んだ距離を所要時間で割ったもの」と定義できるが、古典力学では時間尺度と空間尺度を絶対的なものと考えたため、慣性系によって光速が異なる値を示すことになった。

◇これとは逆に、光速をどの慣性系でも一定に保つためには、時間や空間の尺度が慣性系ごとに変わらなければならない。

◇ある慣性系の時空の尺度を、別の慣性系の時空の尺度に変換するにあたっては、ローレンツ変換を使う。  
これにより光速はどの慣性系でも一定に保たれる。

## 【13】

◇電磁気学の基本法則であるマクスウェル方程式は、ローレンツ変換をほどこしても式のかたちは変換前とかわらない。

◇つまりどの慣性系でも方程式は“同じ形式”で書きあらわされる。  
これを、マクスウェル方程式はローレンツ変換に対して不変であるという。

◇そこで(1)の相対性原理は、  
(4)どの慣性系でも物理法則が同じ形式で書きあらわされるためには、物理法則はローレンツ変換に関して不変でなければならない。  
-----という“数学的要請”に置きかえることができる。

## 【14】

◇以上から、ニュートン力学とは異なる帰結が導かれる。

- (a) 運動する物体の長さ・・・縮む（光速を超えると長さが虚数になる）
- (b) 運動する物体での時間・・・遅れる（光速を超えると時間が虚数になる）
- (c) 速度の加法・・・速度の単純和よりも小さくなる（光速を上限とする）
- (d) 運動する物体の質量・・・重くなる（光速に達すると質量が無量大となる）
- (e) 運動する物体のエネルギー・・・運動エネルギーのほかに静止エネルギーをもつ

## 【15】

◇いずれもアインシュタイン以前の物理学では想像もできなかった奇妙な結論ばかりだが、これらによって、光速という制限速度がじつに巧みに守られていることがわかる。

◇運動する物体の速度がじゅうぶんに遅いときには、こうした相対論的效果はあらわれず、ニュート

ンカ学の結論と一致する。

◇つまり特殊相対性理論は、極限のケースとしてニュートンカ学を包含しているといえることができる。

◇しかしニュートンカ学は、(4)のローレンツ変換に対して不変であるという条件を満たしていないし、

また重力が瞬間的に伝わるとしている点で、

「作用の伝播速度は光速を超えない」という特殊相対性理論の要請にも抵触する。

◇ニュートンカ学とは、ようするに自然を近似的に記述する理論にすぎず、アインシュタインが理想として掲げた普遍的な理論とは認めがたい。

◇重力に関わる現象を相対性理論の枠組みで記述するためには、さらに一段階ステップアップした理論が必要だ。

これが、アインシュタインが一般相対性理論の構築をめざした理由である。

## 【一般相対性原理】

### 【16】

◇一般相対性理論において、

アインシュタインは光が重力によって曲がる現象を、

「空間のゆがみ」という視点から理解しようとした。

◇重要なのは、重力が空間をゆがめることであり、

光が曲がるのは、空間のゆがみの結果おこった現象にすぎない、ということだ。

◇新しい重力の理論、一般相対性理論を完成させるためには、

ゆがんだ空間の幾何学「非ユークリッド幾何学」を基礎とした新しい定式化が必要だ。

◇それは単にゆがんだ空間を記述するだけでなく、

いかなるばあいにも理論の不変性を保証するものでなければならない。

◇この不変性がくせものだった。

### 【17】

◇一般相対性理論を新しく構築するにあたり、

アインシュタインはまず理論の足場となる二つの原理、すなわち「等価原理」と「一般相対性原理」



とをさだめた。

◇一般相対性原理とは、

「すべての座標系で物理法則は同じ形式で書きあらわされる」

というもので、1905年の相対性原理、

「すべての慣性系で物理法則は同じ形式で書きあらわされる」

とくらべると、

適用範囲が「すべての慣性系」から「すべての座標系」に拡張されていることがわかる。

◇この「一般相対性原理」の登場により、従来の相対性原理はこれ以後「特殊相対性原理」とよばれることになる。

### 【18】

◇ニュートン力学がその基礎においた「ガリレイの相対性原理」とあわせて、

これで三つの相対性原理がそろったわけだが、

ここで、この三つの相対性原理によって時間と空間についての理解がどう変わってきたか、

やや数学的なことばを交えながら考察してみよう。

◇ニュートン力学は、平坦な3次元ユークリッド空間を基礎にしている。

二つの慣性系における座標  $(x, y, z)$  と  $(x', y', z')$  は、ガリレイ変換により互いに変換することができるので、

そしてニュートン力学の方程式にガリレイ変換をほどこしても、方程式のかたちはかわらない。

◇力学法則が「同じ形式で書きあらわされる」というのは、このことを意味している。

◇つまりニュートン力学はガリレイ変換に対して不変であり、その不変性によって

「すべての慣性系」でつねに成立することが保証されているのである。

### 【19】

◇特殊相対性理論では、4次元時空の座標  $(ict, x, y, z)$  が登場するが、平坦な時空をあつかうという意味ではユークリッド空間が前提となっている。

◇そしてどのような慣性系においても、電磁気学や光学をふくむあらゆる物理法則が、ローレンツ変換によって同じ形式であたえられる。

◇特殊相対性理論のもとでは、物理法則はある慣性系の座標  $(ict, x, y, z)$  で書いても、これとはべつの慣性系の座標  $(ict', x', y', z')$  で書いても、まったく同じ形式になる。

◇これを「ローレンツ不変性」といい、特殊相対性原理の数学的な表現とみることができる。

## 【20】

◇一般相対性理論では、重力によってゆがんだ空間を取りあつかう。

◇特殊相対性理論の4次元時空では、座標をあらわすには空間3次元プラス時間1次元の四つの量で足りたが、一般相対性理論では、重力場による空間のゆがみ（場所ごとに異なる）を記述するため、あわせて10個の量が必要になる。

◇アインシュタインはリーマン幾何学を導入することで、これに対応した。

◇一般相対性理論によれば、あらゆる座標系は同等の立場をもち、物理法則はいかなる座標系においてもその形式が保存されねばならない。

◇そのためには、物理法則は、ガリレイ変換やローレンツ変換といった限定された変換に対してだけでなく、

「一般座標変換」すなわち任意の座標変換に対して不変であることが求められる。

◇これを「一般共変の原理」といい、どのような重力理論をつくるにせよ、その理論は一般共変性を保証するものでなくてはならない。

## 【21】

◇3次元空間を前提とするガリレイの相対性原理は、200年にわたりニュートン力学の基礎となっていた。

◇アインシュタインは、古典力学の時間と空間についての常識が、深い物理学的考察に裏付けられたものではないことを鋭く批判し、まず力のはたらかない平坦な時空間を前提とした「特殊相対性原理」を提唱した。

◇さらにかれば、等価原理を基礎として、より一般的な、重力場が存在する時空間においてなりたつ「一般相対性原理」をうちたてた。

## 【時空の幾何学】

## 【22】

◇重力によってゆがんだ空間の幾何学を樹立するために、アインシュタインが頼りとしたのは

リーマン幾何学だった。

ゲオルク・フリードリヒ・ベルンハルト・リーマンは、1854年n次元多様体やリーマン空間の概念を導入し、リーマン幾何学を世に問うた。

◇ニュートン力学における平坦な3次元空間では、原点から点P(x, y, z)までの距離sは、ピタゴラスの定理を使って、

$$s^2 = x^2 + y^2 + z^2 \text{ であたえられる。}$$

◇ミンコフスキー時空も同様に平坦ではあるが、時空内の点Qの座標は、四つの成分(ict, x, y, z)をもつ4元ベクトルによって定義され、原点から点Qまでの距離sは、

$$s^2 = c^2 t^2 + x^2 + y^2 + z^2 \text{ であたえられる。}$$

◇リーマンの卓越したところは、距離の概念を曲がった空間にまで拡張したことだ。

一般に空間の曲がり方は、場所ごとにちがう。

このようなばあい、微小な距離dsを考えるとというのが数学の常套手段である(まるい地球も小さな表面を考えれば、平面としてあつかうことができ、問題が簡略化できる)。

◇リーマンは、n次元空間の2点間の距離dsをつぎの式であたえた。

$$ds^2 = \sum g_{\mu\nu} dx_{\mu} dx_{\nu}$$

《 $g_{\mu\nu}$ 》はリーマン幾何学では「計量テンソル」とよばれる量で、この《 $g_{\mu\nu}$ 》があたえられれば、その空間の幾何学的性質はすべて規定されるので、基本テンソルともいう。

◇テンソルとはベクトルを拡張した概念であり、これをとりあつかう「テンソル計算」は、すべての座標系に対して不変な法則をつくりあげるうえできわめて重要な手段となる。

◇添字の $\mu$ および $\nu$ には、それぞれ1からnまでの数字が入り、

記号 $\Sigma$ は、こうしてつくられた《 $g_{\mu\nu}$ 》を、

$$g_{11} + g_{12} + g_{13} + g_{14} + \dots + g_{21} + g_{22} + g_{23} + g_{24} + \dots + g_{31} + g_{32} + g_{33} + g_{34} \dots$$

というようにすべて加えあわせることを意味している。

みかけはシンプルだが、きわめて多くの項からなる量なのだ。

◇アインシュタインは4次元時空に対して、テンソルの添字を1から4までとした。

計量テンソル《 $g_{\mu\nu}$ 》は $4 \times 4 = 16$ となるが、対称性を考慮し同じものを除外すると( $g_{12}$ と $g_{21}$ は等しい)、有効な成分は10個に減る。

◇アインシュタインは、このリーマン幾何学の計量テンソルが、かれの求める重力の理論にきわめて重要な意味をもつことを見いだした。

## 【23】

◇ニュートンの重力理論では、重力場は「重力ポテンシャル」とよばれる、たった1個の量であたえられる。

質量が $m$ と $M$ の2物体が $r$ の距離にあるとき、重力ポテンシャル $U$ は、

$$U = GmM / r$$

であらわされる。

$G$ は重力定数であり、距離 $r$ が定めれば、その場所における重力場は1個の定数であたえられることがわかる。

◇ではアインシュタインが考察する4次元の時空間での重力場はどうすれば計算できるのか。

じつはリーマンの計量テンソルがそのまま重力ポテンシャルとして利用できることに、アインシュタインは気がついた。

◇計量テンソルが、そのままその場所での重力を規定する量として利用できることになったわけだから、きわめて大きな前進だ

(このため、 $\langle g_{\mu\nu} \rangle$ は「アインシュタインの重力ポテンシャル」ともよばれる)。

ここからスタートして、一般共変性を保ちつつ計量テンソルを操作して、最終的な重力場の方程式を発見すればいい。

だがそれは楽な道のりではなかった。

## 【一般相対性理論】

### 【23】

◇一般相対性理論は「等価原理」の発見にはじまった。

自由落下している人間は重力を感じない、すなわち重力は消すことができるという、アインシュタインの「生涯で最も素晴らしい考え」が第一歩だ。

◇「落ちるリンゴ」ではなく「落ちる人間」であるところがポイントで、

この人物が手のひらにリンゴをのせたまま落ちたとしても、落下中は手にリンゴの重さを感じることはない。

◇「重力を感じないこと」すなわち「重力の消失」である、とアインシュタインは考えた。

自由落下という「加速度運動」をすることで、重力が相殺されたということだ。

◇重力がもたらす「重力質量」と、

加速度運動による慣性力（みかけの力）に起因する「慣性質量」とが一致することは、

ガリレイの時代から知られており、19世紀になると高い精度で実験的にも確認されるようになった。

◇この経験的な知識を、アインシュタインはつねに厳密になりたつ原理として採用し、重力の理論を考える出発点においた。

#### 【24】

◇(1) 等価原理・・・重力質量と慣性質量は等しい。

等価原理によれば、重力のはたらく静止系と、加速度運動をしている座標系とは、たがいに区別することができない。

◇ニュートン力学では絶対的な力だった重力は、こうして相対化され、慣性系に限定されていた「相対性原理」は加速度系をふくむ一般の座標系にまで拡張される。

#### 【25】

◇(2) 一般相対性原理・・・すべての座標系で、物理法則は同じ形式で書きあらわされる。特殊相対性理論では、物理法則は「ローレンツ変換について不変」であることを求められたが、一般相対性理論では、物理法則はさらに一般的な数学的条件を満たすことが要請される。

◇これが「一般共変の原理」であり、(2)の数学的表現ということができる。

◇(3) 一般共変の原理・・・異なる座標系で「物理法則が同じ形式で書きあらわされる」ためには、物理法則が任意の座標変換に対して不変である必要がある。

新しい重力理論が宇宙のどこでもなりたつためには、(3)を満たさねばならない。

#### 【26】

◇(1)(2)により、加速度系でおこる物理現象は、重力場でもおこることが予想される。

加速度系では光が湾曲するが、それなら重力場でも光は湾曲するはずだ。

これは光が曲進するのではなく、空間が重力によってゆがめられるためだとアインシュタインは考えた。

◇(4) 物質が存在することで空間はゆがみ、このゆがんだ空間が重力を発生させる。

こう考えることにより、重力を「空間的」に把握することができる。

#### 【27】

◇ゆがんだ空間を数学的にあつかうため、リーマン幾何学を導入する。

◇リーマン幾何学の計量テンソル  $\langle g_{\mu\nu} \rangle$  は、

ある特定の場所における空間の曲がりぐあいを示す“幾何学的な指標”だが、

この  $\langle g_{\mu\nu} \rangle$  が一般的な重力ポテンシャルとみなせることにアインシュタインは気づいた。

◇さらにつごうのいいことに《 $g_{\mu\nu}$ 》を用いると、物理法則のさまざまな方程式が任意の座標変換に対して不変な形式に書ける。  
つまり(3)の要件を満たすことができる。

## 【28】

◇(5)《 $g_{\mu\nu}$ 》が満たすべき「場の方程式」を、つぎのように書くことで、一般相対性理論は完成した。

$$R_{\mu\nu} - 1/2 g_{\mu\nu} R = 8\pi G/c^4 T_{\mu\nu}$$

◇方程式は三つのテンソルの項からなっており、物質のエネルギー・運動量テンソル《 $T_{\mu\nu}$ 》によって、重力場をあらわす計量テンソル《 $g_{\mu\nu}$ 》がきまることを示している。

《 $R_{\mu\nu}$ 》は時空の形状をあらわすリッチ・テンソル、 $R$ はスカラー曲率、 $G$ はニュートンの重力定数だ。

(福永注：次の解説記事は、ウィキペディアからの抜粋引用である)。

## アインシュタイン方程式

■左辺は時空がどのように曲がっているのか(時空の曲率)を表す幾何学量であり、右辺は物質場の分布を表す量である。

■おおざっぱに言えば、星のような物質またはエネルギーを右辺を代入すれば、その物質の周りの時空がどういう風に曲がっているかを読みとることができる式である。空間の歪みが決まれば、その空間中を運動する物質の運動方程式(測地線方程式)が決まるので、物質分布も変動することになる。

■左辺の  $R_{\mu\nu} - 1/2 g_{\mu\nu} R$  はアインシュタイン・テンソルと呼ばれる。 $R_{\mu\nu}$ はリッチテンソル、 $R$ はスカラー曲率である。どちらも時空の計量テンソル  $g_{\mu\nu}$ の微分で書かれる幾何学量である。つまりアインシュタイン方程式は計量についての連立偏微分方程式の形をしている。

■右辺の  $T_{\mu\nu}$ はエネルギー・運動量テンソルである。 $G$ はニュートンの重力定数。 $8\pi G/c^4$ はアインシュタインの重力定数と呼ばれる( $\pi$ は円周率、 $c$ は光速)。

■アインシュタインの方程式はテンソルの方程式であり、  
時空の添字  $\mu$ ,  $\nu$  はそれぞれに時間1次元と空間3次元の4成分を動き、10本の方程式を与える。

■このうち、4本はエネルギー保存則と運動量保存則に対応するものであり、  
 $R_{\mu\nu} - 1/2 g_{\mu\nu} R$  の空間成分に関係する残りの6本の方程式が時空の運動方程式に相当する。  
これらは時間微分2階の偏微分方程式6本（あるいは時間微分1階の偏微分方程式12本）であるが、  
座標の選択の自由度（ゲージの自由度）が4つ、保存則を満たしながら時間発展を行うための拘束条件が4つあると考えれば、たとえ真空中であっても1階の微分方程式4本（2階に直せば2本）の自由度が残る。  
この自由度は時空の歪みを周囲に波として伝える「重力波」のモードが2つあることを意味している。

## 【29】

◇一般相対性理論からはつぎのような帰結がみちびかれる。

- (a) 重力場では光は曲進する。
- (b) 重力場では時間が遅れる。
- (c) 質量をもつ物体が運動すると、重力波が発生する。  
重力波は光速で伝わる。

◇(a) は「等価原理」からみちびかれる帰結で、もしこれが実験的に確かめられなければ、一般相対性理論のおおもとの前提が誤っていたことになるとして、アインシュタインはその検証に全力を注いだ。

◇光の曲進は1919年、エディントンらの日食観測によって劇的に実証されたが、その数値の精度については、今日では疑問視する声強い。

◇しかし、凸レンズが光を集めるように、巨大な質量の天体のそばを通過する光が曲げられる「重力レンズ」の現象は、これまでにいくつか実例が見つかっており、したがって(a)については実験的な確証がえられているといっている。

◇(b) の時間の遅れについても実験的に確認されている。

◇高さ100メートルのビルの屋上と地表とでは、重力の強さはわずかながらちがう。  
地表のほうが（地球の重心に近いので）重力が強く、そのぶんだけ時間が遅れるのだ。  
1959年および1960年には、放射性物質を利用して高さ22.5メートルの塔の上と地上の「時間の遅れ」を検出する実験が行なわれ、高い精度で理論を支持する結果がえられた。

◇また1971年には、ジャンボジェット機に原子時計を積みこんで地球を一周し「時間の遅れ」を確認する実験が行なわれた。  
このばあいには、高速飛行にともなう特殊相対性理論の「時間の遅れ」効果と、

重力の弱い高空を飛ぶことによる一般相対性理論の「時間の進み」効果があらわれる。  
測定の結果は誤差1.6パーセントの精度で理論を支持していた。

◇(c)の重力波は、いまだに検出されていないが、大がかりな検出装置の建設が世界各国で進められている。

重力波は、最初期の宇宙を読みとく観測手段としても応用が期待されている。

◇2004年4月、NASA（アメリカ航空宇宙局）は重力探査衛星B（GPB）を打ち上げた。  
一般相対性理論によれば、地球の周囲の重力場は、自転に引きずられてねじれている。  
この「慣性の引きずり」現象を、16カ月かけて検出する予定だ（2004年10月、NASAはレーザー地球力学衛星LAGOSのデータで「引きずり」が確認されたと発表した）。

◇一般相対性理論を実験的に確認する試みは現在もつづけられているのである。

## 第三部 思考の飛躍---アインシュタインの頭脳---

吉田伸夫著（2010・新潮社）  
から抜粋引用をさせていただきました。

### 【はじめに】

#### 【30】

◇アインシュタインが友人に宛てた1952年の手紙に、彼の思考パターンを解説した図がある。  
Eと記された線は数々の直接的経験を表しており、実験データや観測結果なども含まれる。

◇新しい理論を作るためには、Eから仮説A（「公理系」となっている）へとジャンプしなければならない。

「EからAに至る論理的な道筋は存在しない」という。

◇いったん仮説Aに到達すれば、そこから厳密に演繹的な作業によって、さまざまな命題Sが導き出される。

◇命題Sと経験Eは関係づけることが可能であり、論理的に厳密とは言えないかもしれないが、何らかの形で仮説Aの妥当性を検証できる。



### 【31】

◇このパターン自体は、アインシュタインが発明したわけではなく、19世紀以来、科学的研究の基本的な方法論として知られている。

◇アインシュタインの独自性は、経験Eから仮説Aへのジャンプが、既成概念にとらわれない自在さを持っていた点にある。

### 【32】

◇経験から仮説を構想する際、多くの物理学者は、さまざまな経験的事実に共通している要素を抽出し、これを普遍的な法則として一般化しようとする。

論理学で謂う帰納である。

◇この手法では、それ以前からの経験に基づいて作り上げられた理論の枠組みが暗黙の前提としていつまでも残ってしまい、過去にとらわれずに新しいアイデアを展開することが難しくなる。

◇革命的な理論を作り上げるためには、過去のしがらみから逃れなければならない。

◇だからこそアインシュタインは、帰納のような「論理的な道筋」を否定したのである。

### 【33】

◇19世紀に入ると、物理学者は、光を音と同じように媒質を伝わる波として扱う一般的な理論を作り上げた。

◇ところが、この理論がかなりの成功を収めていた19世紀末に、奇妙な実験結果が報告される。

◇猛スピードで太陽の周りを回っている地球の上で実験しているにもかかわらず、まるで地球の運動など関係ないと言わんばかりに、どの方向にも同じ速さで光が伝わるというのだ。

### 【34】

◇媒質を伝わる波のイメージに浸る多くの物理学者は、この結果に困惑した。

◇ローレンツは、実験器具を含む全ての物体が運動方向に一定の割合で収縮すると仮定すれば、光速の測定にバイアスが加わり、光の速さがどの方向でも同じ値に見えてしまうという仮説を提唱した。

◇これも実験結果を説明する一つの方法ではある。

◇しかし、光は媒質を伝わる波だという従来の見方に縛られており、発想の飛躍に欠けている。

### 【35】

◇過去にとらわれていたローレンツに対して、アインシュタインは自由にジャンプする。

◇光が何かを伝える波だというイメージを捨ててしまい、光速は常に一定であるという光速度不変の原理を掲げたのである。

◇ここから彼は、ローレンツがすでに求めていた座標変換の式を改めて導き出し、そこに特殊相対論という新しい解釈を施したのである。

### 【36】

◇このようなジャンプを成し遂げられたのは、アインシュタインが、本質的でない枝葉を捨象し、思考実験を活用しながら単純な本質を浮かび上がらせる能力に長けていたからである。

### 【37】

◇彼が枝葉にこだわらない発想を見せたのは、このときだけではない。

◇ブラウン運動の研究では、液体中の微粒子に液体の分子がぶつかったとき、その微粒子がどんな軌跡を描くかはあえて問題としなかった。

◇具体的な軌跡の形は、複雑で捉えにくい枝葉にすぎない。

◇そうではなく、多数の分子が衝突することを統計的な観点から捉えたときに何が起きるかを考察し、統計力学の基礎となる関係式を導き出したのである。

◇黒体放射の考察では、光の分布を表す熱力学的な関係式が気体の式と似ているという一点に着目して、光も気体分子と同じく小さな粒子として振舞うという光量子論を提唱した。

◇光が波であることを示唆する多くの実験事実を捨象したのだ。

### 【38】

◇アインシュタインのジャンプが最も成功したとされるのが、一般相対論の構築である。

◇17世紀にニュートンが作り上げた重力理論は、天体運動をほぼ完璧に解明するものであり、経験Eは全てニュートン理論の枠内に収まっていた。

◇ほとんどジャンプの足がかりがないにもかかわらず、アインシュタインは、等価原理と呼ばれるアイデアをもとに、時空の幾何学に基づく新しい重力理論を作り上げて見せたのである。

### 【39】

◇もっとも、一般相対論の成功は、同時にアインシュタインの方法論が持つ限界をも露呈させる結果

となった。

◇一般相対論という仮説Aが人間の常識的な思考から著しく乖離したため、命題Sが簡単には導き出せなくなったのである。

◇アインシュタイン自身、一般相対論の基礎方程式があまりに難しいために、何度か誤った結論を導いては厳しいしっぺ返しを受けている。

#### 【40】

◇例えば、1939年に彼はブラックホールが現実には存在できないという“証明”を発表した。

◇ところが、同じ年に、オープンハイマーらが一般相対論に基づいてブラックホールが自然に形成されることを示したのである。

◇アインシュタインが晩年に情熱を傾けた統一場の理論になると、事態はさらに深刻だった。

◇仮説そのものが持つ膨大な数式の中にとらわれてしまって、経験的事実との関係づけをするきっかけすらつかめなくなったのである。

#### 【41】

◇仮説から命題を導くことの困難さは、現代物理学のあらゆる局面に共通する問題となっている。

◇最先端の理論はあまりに難しく、与えられた仮説から具体的な命題を導くためには、トップクラスの物理学者が何年も研究を続けなければならない。

◇具体的な命題を導けなければ、経験との関係づけができず、仮説の検証や修正も困難になってしまう。

◇現代物理学が混迷しているように見えるのは、そのせいかもしれない。

◇アインシュタインが生きた時代と比べると、物理学のあり方があまりにも変質してしまったのである。

#### 【42】

◇本書では、物理学研究におけるアインシュタインの発想の独自性に光を当てる。

◇そこでは、アインシュタインがどのような発想に基づいて理論を構築したか、そのやり方が他の物理学者の方法論といかなる点で異なるかに注目する。

◇アインシュタインの全業績を通して眺めながら、そこに一貫する発想法を明らかにし、その革新性と限界を浮き彫りにしてみたい。

## 【第 1 章 動くことと動かないこと----特殊相対論】

### 【43】

◇相対論の効果としては、「光速は決して越えられない」「宇宙飛行士は歳を取るのが遅い」などが有名だが、これらは、特殊相対論によって説明される。

◇アインシュタインは、1905年に特殊相対論の論文を発表したが、オランダのローレンツやフランスのポアンカレは、彼よりも早く、特殊相対論の基礎となる公式を見いだして発表している。

◇なぜ、アインシュタインの名だけが相対論とともに語られるようになったのか？

◇それは、彼が科学の流れを変えたからである。

◇ローレンツやポアンカレは、19世紀に完成された電磁気学の枠組みに則って、膨大で煩雑な計算を繰り返し、その結果、電磁気学が示す性質として特殊相対論の公式と同じものを見いだした。

### 【44】

◇しかし、アインシュタインはこれとは違って、ある単純な仮定を置きさえすれば、電磁気学を全く使わず、簡単な計算をするだけで、特殊相対論の公式が導けることを示したのだ。

◇ここでは主従が逆転している。

特殊相対論は電磁気学の一つの性質ではない。

むしろ、電磁気学の方が特殊相対論に従属することになる。

◇ニュートンとマクスウェルの権威に支えられた19世紀的な古典物理学が、土台から揺るぎ始めたのである。

◇科学の流れを変える発想をアインシュタインがなしえたのは、彼が伝統のしがらみを飛び越える軽やかさを持っていたからである。

### 【45】

◇スペースシャトルの内部ならば、宇宙飛行士の放したペンなどが、機体に対して動いているかどうかを判定できる。

◇だが、周囲に天体も宇宙船もない無重力の宇宙空間に自分が放り出された場合に、自分が動いているのか、静止しているのかは、どうしたら決められるのだろうか。

◇そもそも、動くことと動かないことの間、本質的な違いがあるのか？

#### 【46】

◇相対性原理とは、何も無い空間で運動と静止の区別が原理的に不可能だというものだ。

◇単に、人間にとって動いているかどうかはわからないだけではない。

◇自然界に運動と静止の区別がそもそも存在しないという意味だ。

◇絶対的な静止という概念は意味を持たない。

◇運動と静止について語るためには、何らかの基準を人為的に定め、これに対して相対的に動いているかどうかで判定するしかない。

◇これが「相対性原理」という名称の由来である。

#### 【47】

◇天動説を信奉する人々にとって、相対性原理の考え方は、とうてい受け容れられないだろう。

◇彼らに従えば、宇宙の中心には不動の大地があり、大地に対して動いているかどうかで、物体の運動と静止が区別できるはずだから。

◇しかし、宇宙の全体像が明らかになりつつある現代において、何が動き何が止まっているか決定できないという考え方は、それほど突飛ではない。

#### 【48】

◇20世紀に確立された現代宇宙論では、地球はもちろん、太陽も宇宙の中心に固定された天体とは認められていない。

◇それどころか、数千億もの恒星を含む巨大な天体集団である銀河ですら、どこかにとどまっているのではない。

銀河ですら宇宙空間を漂流しているのだ。

◇こうした宇宙の有様を眺めると、動いているか止まっているかを区別する絶対的な基準がどこかにあると考えるよりも、相対性原理の方がむしろ馴染みやすいのではないだろうか。

## 【49】

◇もっとも、19世紀には、こうした宇宙の実像はまだ知られておらず、多くの科学者は、運動と静止を区別するための絶対的な基準が宇宙空間に存在すると推測していた。

◇この区別を行うために利用できると考えられたのが、理論的説明が進んでいた光である。

◇光が波としての性質を持つことは、19世紀初頭に行われた干渉の実験などを通じて確実なものとなっていた。

◇波と言えは、空気を伝わる音のように、媒質の振動が伝播していくのがふつつである。

◇もし光がふつつの波とすれば----実はそうではないのだが----目に見えない媒質が空間を満たしており、その振動が伝わっていく過程が光の実態だと考えるのが自然だ。

## 【50】

◇近代ヨーロッパの物理学者たちは、こうした仮想的な光の媒質を、古代ギリシャで宇宙の構成要素とされた元素の名を借りて、エーテルと呼んだ。

◇天体の見かけ上の位置が力学的な予測と一致することから、エーテルに流れや乱れはなく、完全に一様で静止していると推測される。

◇仮に、こうした“静止”エーテルが宇宙空間を満たしているとする、これを基準として運動と静止を区別できる可能性が出てくる。

◇例えば、地球がエーテルに対してどれだけの速さで運動しているかは、地球上で光の伝わり方を測定することによって調べられるはずだ。

◇こうして、いまだ相対性原理が受け容れられていなかった19世紀後半、光の伝わり方を調べる試みが始まる。

## マイケルソンの実験

## 【51】

◇アメリカの物理学者アルバート・マイケルソンは、1881年から光学測定を繰り返し行い、エーテルに対する地球の運動を検出しようと試みた。

◇地球は太陽の周りを秒速30キロ（時速10万キロ以上）で公転している（現在では、銀河系の回転による速度の方が、この10倍速いことがわかっているが、以下の議論に影響はない）。

◇もし静止エーテルが存在するならば、地球はその中を少なくとも秒速30キロで周回運動をしているので、地球上で測定される光の伝わり方は、公転方向に対する向きによって変わるはずだ。

◇ただし、もともとの光の速さは秒速30万キロにもなるため、地球の公転運動による影響は、伝播速度に1万分の1という微小な変化しかもたらさない。

## 【52】

◇マイケルソンが考案したのは、干渉計と呼ばれる測定装置である。

◇同じ光源から放出された光を半透明鏡（入射した光のうち半分を透過させ半分を反射する鏡）によって二つに分け、互いに直交する道筋を進ませる。

◇このとき、それぞれの光は地球の運動方向に対する向きが異なっているので、光が伝わる速さも異なるはずだ。

◇この後、二つの光を反射鏡で折り返させて再び合流させる。

◇光は波としての性質を持っているので、合流する二つの光の山と山、谷と谷が重なる場合は互いに強め合うように干渉して明るくなり、山と谷が重なる場合は弱め合うように干渉して暗くなる。

◇マイケルソンの干渉計では、このパターンが明暗の縞模様として観測される。

干渉計全体を回転させると、二つに分かれた光の伝搬速度が回転前と変わるために合流する際のタイミングもずれて、これまで明るかった部分が暗く、暗かった部分が明るくなるというように干渉縞が変化するのは当然である。

◇これは、干渉縞全体の位置がずれたように見える。

（福永補足：観測装置は地球とともにエーテルのなかを走っているから、地球の進行方向に走る光の速度は光速 $c$ からズれる。

これと直角方向に走る光線の速さも、エーテルの風によって影響を受けるが、そのズレ幅は、地球の進行方向に走る光のズレ幅とはわずかながら異なる。

この二条の光の速度差が、干渉縞のパターンには反映されている。いま装置を90度回転させて二条の光の速度差を逆転させると、干渉縞の明暗の縞の位置が移動するはずだ。）

## 【53】

◇1881年、マイケルソンは、干渉縞のずれを測定する実験を行った。

◇6時間のインターバルをあけて二回の観測を行えば、その間に地球の自転によって装置が90度回

転するので、縞の位置がずれている-----そう期待したのだ。

◇しかし、その結果は、光が空気中を伝わる音と同じようにエーテル中を伝わりと仮定して行った予測よりも、遥かに小さかった。

◇マイケルソンは、1887年にエドワード・モーリーと協力して再チャレンジする。

◇改良された装置全体を6分間に1回の割合でゆっくり回転させながら、周囲を等間隔に16分割して決めた測定ポイントで、最も明瞭に見える縞の位置を精密に計測した。

◇最終的な実験は、三日にわたり、正午と午後6時の二回ずつ行った。

#### 【54】

◇マイケルソンの予測によれば、装置を1回転させる間に、干渉縞の位置は縞の間隔に対して最大40%ほどの距離だけ移動するはずだったが、結果は衝撃的だった。

◇干渉縞の移動は、縞の間隔の1%未満しかなかったのである。測定誤差を考慮すれば、干渉縞は全く動かなかったと言ってよい。

◇つまり、地球は秒速30キロという猛スピードで太陽の周りを回っているにもかかわらず、光の伝わり方は、まるで地球が止まっているかのように、どの方向でも差がなかったのだ。

◇同様の実験は、その後多くの物理学者によって繰り返されたが、光の伝搬速度が地球の運動に影響されることを示すデータは得られなかった。

## マクスウェル電磁気学と光

#### 【55】

◇マイケルソンらの実験結果に対する驚きには二つのタイプがあったと思われる。

◇一つは、エーテルの中を動いている観測者から見て、どの向きに対しても光の伝播速度が同じになるのは、常識的なイメージに合わないというものである。

◇そしてもう一つが、光の伝播を記述する従来の理論が根本的に間違っているかもしれないという理論的な驚きである。

◇その後の物理学の発展に寄与したのは、後者の驚きを抱いた人々である。



## 【56】

◇19世紀半ばまで、光は電気や磁気とは異質の物理現象だと見なされていた。

◇だが、1864年にイギリスの物理学者ジェームズ・クラーク・マクスウェルが電気と磁気を統一する理論を完成したことで、光についての見方が大きく変わる。

◇マクスウェルは、自分の理論に基づいて、電磁場（電気・磁気の担い手）の振動が秒速30万キロの波となって伝わることを示した。

◇この伝播速度が、すでに測定されていた光の速度と一致したことから、光は電磁波の一種であると結論されたのである。

◇光が伝播する過程は、マクスウェル電磁気学によれば、振幅が十分に小さい時の音波や水面波と同じ方程式（二階の双曲型偏微分方程式と呼ばれるもの）によって記述される。

◇とすれば、音波と水面波と同じように、光速も観測者の運動に応じて変化しそうなものだ。

◇それでは、マイケルソンらの実験結果は、それまですばらしい成果を上げてきたマクスウェル電磁気学が誤っていることを意味するのだろうか？

## ローレンツの収縮仮説

## 【57】

◇オランダの物理学者ヘンドリック・ローレンツは、マイケルソンらの実験結果を知り、これをマクスウェル電磁気学と調和させる方法を探求し始める。

◇ローレンツは、マイケルソンらの実験結果を自然に説明できる仮説をたった一つだけ思いついた。

◇干渉計を構成するあらゆる物体が一定の割合で収縮するという仮説である。

◇干渉計を回転すると光が伝わる経路の長さが少しずつ変わっていき、光速が変化する影響を打ち消してしまうというわけだ。

◇初等的な計算を行った結果、あらゆる物体がエーテル内部で運動する向きに  $v^2/2c^2$  の割合で収縮すると仮定すれば、干渉縞の位置が動かないという実験データと一致することがわかった。ただし、 $v$  は物体がエーテルに対して運動する速度、 $c$  は光速（秒速30万キロ）である。

◇ $v$  として秒速30キロという地球の公転速度を使うと、物体の長さは運動方向に2億分の1だけ短

くなる。

◇ローレンツは、1892年にこの結果をオランダの学術誌で発表した。

### 【58】

◇運動方向に物体が収縮するという仮説は、アイルランドの物理学者ジョージ・フィッツジェラルドが1889年にすでに提案していたが、ローレンツはそのことに気がつかなかったようだ。

◇フィッツジェラルドとローレンツの収縮仮説は、干渉計を用いた実験がなぜ失敗したかを説明するものだった。

◇しかし、この説明は、どこまで一般化できるのだろうか？

干渉計の実験にだけ通用するのか？

光を用いた実験全てに当てはまるのか？

◇それとも、どんな実験を行おうと、そもそも電磁気現象を利用している限り、エーテルに対する地球の運動は検出できないのか？

### 【59】

◇ローレンツがすごいのは、自分の仮説が場当たりのものではなく、一般的な法則に昇華できることを示そうとしたことだ。

◇科学とは、自然界が従う普遍的な法則を明らかにし、そこからさまざまな帰結を演繹的に導いていく学問だが、そのあるべき姿を実現すべく、彼は難しい試みに挑戦した。

◇マクスウェル電磁気学では、電磁場の強度変化がマクスウェル方程式によって与えられる。

◇当時の物理学会の常識では、電磁場の強度とはエーテルの状態を表す量であり、その変化を表すマクスウェル方程式は、エーテルが静止しているときに成り立つ式だと考えられていた。

◇とすれば、エーテル内部を秒速30キロで運動している地球上で見た場合、マクスウェル方程式は正確には成り立たず、方程式の形を書き換える必要があるはずだ。

### 【60】

◇だが、ローレンツは、運動の効果を打ち消すように物体の収縮が起きることで、その書き換えが必要でなくなると考えたのである。

◇ローレンツによれば、地球上では、実験装置や人間だけではなく、長さの基準となる物差しも一緒に短くなってしまう。

◇収縮によって長さが  $1/k$  (10%の収縮では  $k=10/9=1.11\dots$ ) になるとき、本当の長さが  $x$  であるにもかかわらず、人間はそれを  $kx$  だと思うことになる。

◇そこで、縮んだ物差しを使って、新しい座標  $x'$  を  $x'=kx$  という式で定義することにすると、 $x'$  は、本当は収縮しているにもかかわらず、人間がそれに気がつかずに収縮前と同じ長さのままだと思っている世界を表す座標である。

## 【61】

◇ローレンツの目論見は、次のようになる。

◇地球上の人間は、全ての物体が収縮していることに気づかずに座標  $x'$  を使っている。

◇そこで、静止エーテルに対して成り立つ本来のマクスウェル方程式を、人間が使う座標  $x'$  で書き換えてみる。

◇書き換えられた方程式が元の方程式と同じ形になれば、地球上の人間から見て、あらゆる電磁気現象が、運動も収縮もない場合と同じものになるはずである。

◇もしそうだとすれば、マイケルソンの干渉計に限らず、どんな実験装置を使おうとも、地球がエーテルの中を運動している効果は検出できないだろう。

## 【62】

◇まず、地球が速度  $v$  で動いており、時間  $t$  が経つと位置が  $vt$  だけずれることから、静止エーテルの座標  $x$  と地球上の座標  $x^*$  の間には、

$x^*=x-vt \dots \textcircled{1}$  という関係が成り立つと考えられる。

◇収縮は  $x^*$  に対して起きるので、地球上の人間が使う座標  $x'$  は、 $x'=kx^* \dots \textcircled{2}$  と表される。

◇この  $x'$  を新たな座標とし、さらに電磁場の定義も変更してマクスウェル方程式を書き直していくと、最終的には、元のマクスウェル方程式と同じ形になる----というのがローレンツの期待だった。

◇しかし、そうはならなかった。空間座標と電磁場の定義以外に、他の何かを変更しなければならなかったのだ。

◇特殊相対論の歴史において、この問いに答える過程こそ最大の転機だった。

◇ようやく1895年になって、ローレンツは一つの答えを見いだす。

◇空間座標だけではなく、時間座標も置き換えれば、方程式の形が置き換え前と同じ形になるというのだ。  
次のようなことだ。

### 【63】

◇マクスウェル方程式には時間座標  $t$  が使われているが、この  $t$  よりも場所によって少し過去または少し未来にずらした新たな時間座標  $t'$  を用いることにする。

◇空間座標で②式の変更を行うことに加えて、時間座標に関してもこの置き換えをすれば、電磁気的な現象を記述する方程式の形は（電磁場の定義を変更し、わずかな誤差を無視する必要があるものの、実質的には）元のマクスウェル方程式と変わらない。

◇つまり、エーテル内部を運動するとき、全ての物体が収縮するとともに、時間が過去または未来に少しずれるとすれば、どんな実験をしても運動の効果は検出できないのだ。

### 【64】

◇ローレンツは、この時間のずれを現実のものとは見なさなかった。

◇時間座標の書き換えは、方程式を簡単なものにするための単なる便法だと考えた。

◇エーテル内部で運動する物体は収縮する。

◇これは、現実起きる変化である。

◇ここでさらに、電磁場の強度として、現在のものではなく、それより少しだけ過去または未来の値を使えば、電磁気現象は、エーテルに対して静止しているときと実質的に同じ方程式で記述されることになり、運動の効果は式の上で相殺されてしまう。

◇しかし、本当は電磁場の強度として現在の値を使うべきなのだから、エーテル内部を運動している効果はどこかに現れるはずだ  
-----これが、ローレンツの解釈だったと思われる。

◇このときローレンツは、（特殊相対論の）大発見に限りなく接近していた。

◇だが、彼には、場所によって時間がずれるという衝撃的な考え方を、現実として受け容れることができなかつたのである。

## 座標変換と相対性原理

## 【65】

◇幾何学図形を座標で表示しているとき、その $x$ 座標を全て $x-a$ で置き換えることは、表示の基準となる座標軸のセット（座標系）を $x$ 軸方向に $a$ だけ移動したものに置き替えて再表示することに相当する。

◇このように、図形はそのままで座標系だけを取り替えることを座標変換と言う。

◇目盛りが固定された直交座標系を用いる場合、幾何学的な座標変換には回転と平行移動の二種類がある。

## 【66】

◇物理学でも、物理的な状態は変えないで、記述の枠組みとして用いる座標だけを別のものに置き換える座標変換を考えることができる。

◇ただし、物理の世界における座標変換は、物理法則と密接に結びついている。

◇人間が観測の基準に用いる座標系は、正確に時を刻む時計と、一定間隔の目盛りが記された物差しによって、具体的に構成することができる。

◇こうして構成された二つの座標系の間で、時計と物差しの読みがどのような関係になるかを定めるのが、物理の世界での座標変換である。

◇したがって、この座標変換は、その世界が従う物理法則に依存しているのであって、経験によらず先験的に決定できるわけではない。

## 【67】

◇特殊相対論で問題になるのは、互いに等速度運動している座標系の中の座標変換だが、こうした座標変換として20世紀初頭まで一般的に用いられていたのが、ガリレオ・ガリレイにちなんで「ガリレイ変換」と称される座標変換である。

◇ガリレイ変換による変換先の空間座標 $x^*$ は、すでに、 $x^* = x - vt$ ・・・①として与えてある。

◇ここでは、時間座標 $t^*$ の式と並べておこう。 $t^* = t$ ・・・③

③式は、単に変換先の座標系でも同じ時間座標を使うというだけのことだ。

ガリレイ変換には、ニュートン力学の運動方程式を不変に保つという特徴がある。

◇ $f = m\alpha$ の $f$ （物体に加わる力）と $m$ （質量）は、座標系によって値を変えないとしてよい。

◇さらに、ガリレイ変換の場合は、加速度  $\alpha$  も変化しない。

◇ガリレイ変換をしても、運動方程式

$f = m\alpha$  は変わらないということは、物理的に何を意味するのだろうか？

### 【68】

◇比較のために、ガリレイ変換ではなく、元の座標系に対して回転運動をする座標系への変換を考えてみよう。

◇この変換の下では、運動方程式は不変にならない。

◇元の座標系で  $f = m\alpha$  が成り立っていたとすると、回転する座標系では、 $f$  以外に遠心力やコリオリ力といった回転の作用を表す力の項が運動方程式に現れる。

◇したがって、物体がどのように運動するかを観測し、そこに遠心力やコリオリ力が作用しているかどうかを調べることで、観測のベースが回転座標系かどうかを判定できる。

◇実際、地球上で大気の影響を受けないほど巨大な振り子を振動させると、地球が自転することによるコリオリ力の作用で振動面が少しずつずれていく。

◇これがいわゆるフーコーの振り子である。

### 【69】

◇回転座標系への座標変換の場合とは異なり、

ガリレイ変換の下でニュートンの運動方程式は不変なので、

ニュートン力学に従う物体の運動を観測するだけでは、観測のベースになる座標系が動いているかどうかを検出することはできない。

◇つまり、ガリレイ変換の下でニュートン力学は、運動と静止を区別できないという相対性原理を満たしているわけだ。

### 【70】

◇ニュートン力学と違って、マクスウェル電磁気学は、ガリレイ変換に対して不変ではない。

◇実際、ローレンツは、①③式のガリレイ変換だけではマクスウェル方程式が変化してしまうため、②式で表される空間の収縮を考え、さらに時間座標の置き換えも行って、ようやくマクスウェル方程式が不変になることを示したのだ。

## 【71】

◇当時の物理学者たちは、ガリレイ変換に対してマクスウェル電磁気学が不変でないことから、振り子を使って地球の自転を検出できたのと同じように、光のような電磁気的な現象を使えば地球の運動を検出できると期待していた。

◇だが、19世紀後半から20世紀初頭にかけて行われた一連の実験では、電磁気を利用してエーテルに対する運動がどうしても見いだせなかった。

◇これでは、まるでマクスウェル電磁気学でも相対性原理が成り立っているかのようだ。

◇では、座標変換に対してマクスウェル方程式は不変であるべきだという相対性原理の要求と、ガリレイ変換の下でマクスウェル方程式が不変ではないという数学的な事実は、どのように調和させられるのだろうか？

## ポアンカレの相対性理論

## 【72】

◇アンリ・ポアンカレがマクスウェル電磁気学における運動と静止の問題に関心を持つ1900年後には、マイケルソン＝モーリーの実験以外にも、エーテルに対する運動の検出に失敗したという報告がいくつも集まっていた。

◇1902年の『科学と仮説』の中で、ポアンカレは、工夫を凝らした精密測定を行えばエーテルに対する運動をいつか検出できるはずだという物理学者の期待を「錯覚」と呼び、このような実験は永久に成功しないだろうと書いている。

◇彼が言わんとしたのは、どうやってもエーテルに対する運動が見いだせない理由を根本から考え直すべきだということだ。

◇このときすでにポアンカレは、マクスウェル電磁気学が相対性原理を満たしており、互いに等速度運動するどの座標系でも同じ形の方程式に従っているという信念を抱いていたようだ。

## 【73】

◇ポアンカレが天啓を得るきっかけになったのは、ローレンツの1904年の論文だと思われる。

◇これはローレンツが以前から主張していた収縮仮説を総合した決定版である。

◇エーテルの中で運動するあらゆる物体は、運動方向に対して $1/k$ に収縮する。

ただし、 $k$ は、エーテルに対する速度を  $v$ 、光速を  $c$ としたとき、 $k^2 = 1 / (1 - (v/c)^2)$  ……  
④ という式で定義される。

秒速30キロという公転速度で動いている地球の場合、  
 $k = 1.0000000005$  となる。

◇空間座標に関するローレンツの議論は、すでに述べたとおり、まず、①式で表されるガリレイ変換によって、速度  $v$  で運動する座標系  $x^* = x - vt$  に移る。

◇この座標系で止まって見える物体は、実はエーテル内部を速度  $v$  で運動しているので、その大きさが  $1/k$  に収縮しているはずだ。

◇そこで、②式で示したように、 $x' = kx^*$  で定義される新しい座標を用いることにすれば、まるで収縮していないかのように表すことができる。

◇もっとも、空間座標を  $x'$  に変えるだけでは、方程式の形も大幅に変わってしまうので、時間座標も別の変数に置き換えなければならない。

◇時間座標の置き換えに関しては、1904年論文では、次の式が示されている。

$$t' = (1/k)t - (kv/c^2)x^* \dots\dots ⑤$$

ローレンツは、新しい変数  $t'$  に「局所時間」という紛らわしい名前を付けたが、現実の時間はあくまで  $t$  であり、 $t'$  は式を簡単にするために導入された便宜的な変数と見なしていたようだ。

#### 【74】

◇ポアンカレは、このようなローレンツの説明に満足しなかった。

◇エーテルに対する運動がどうしても検出できないのは、物体の収縮といった別の効果が検出を妨げているからではなく、そもそもマクスウェル電磁気学で運動と静止が原理的に区別されないためではないか？

◇言い換えれば、マクスウェル電磁気学は、相対性原理を満たしているのではないか？

#### 【75】

◇相対性原理を満たすことが何を意味するのか。

◇相対性原理が満たされるならば、互いに運動する二つの座標系で、同じ基礎方程式が成り立つ。

◇ところが、①③式で表されるガリレイ変換に対して、マクスウェル方程式は不変ではない。



◇つまり、二つの座標系の中の座標変換がガリレイ変換だとすると、マクスウェル方程式が一方の座標系で成り立つとしても他の座標系では成り立たない。

◇これに対して、ローレンツが導いた座標の置き換え②⑤に対して、マクスウェル方程式は不変になる。

◇ということは、互いに運動する座標系の中の座標変換は、ガリレイ変換ではなく、ローレンツが導いた変数の置き換えで表されるものではないか？

### 【76】

◇ローレンツによる空間座標の置き換えは、ガリレイ変換 ( $x \rightarrow x^*$ ) と収縮効果 ( $x \rightarrow x'$ ) の二段階からなっていたが、この二段階を併せて一つの座標変換と見なすべきだ-----これがポアンカレの主張である。

◇この考えに沿って、②と⑤の  $x^*$  に  $x - vt$  を代入して書き換えれば、次の座標変換の式が得られる。

$$x' = k(x - vt) \quad \dots \textcircled{6} \quad t' = k(t - (v/c^2)x) \quad \dots \textcircled{7}$$

◇ポアンカレは、1905年の論文で、⑥⑦の座標変換を「ローレンツ変換」と呼んだ。

### 【77】

◇①③式と⑥⑦式を見比べればわかるように、ガリレイ変換とローレンツ変換は、二つの点で大きく異なっている。

◇第一に、後者には、座標全体のスケールを変える係数  $k$  が掛かっている。

◇ローレンツ自身は、この因子を実際に物体が収縮する効果を現すものと考えたが、これは正しくない。

◇ここでの変数の置き換えは単なる座標変換であって、同じ物理現象を異なる立場から見たときの表現の違いを与えるものだからである。

◇ $k$  という係数が現れるのは、ちょうど物差しを傾けて物体に当てると、まっすぐに当てたときとは異なる値が読みとれるのと同じく、一方の座標が他方の座標に対して“傾いている”ことの現れである。

### 【78】

◇もう一つの相違は、③式 ( $t^* = t$ ) と⑦式を比較すれば明らかである。

◇ガリレイ変換では、どの座標系でも時間は共通だとされていた。

◇ところが、ローレンツ変換はそうではなく、ある座標系では同時に起きたはずの出来事が、別の座標系で見ると、生起する時刻が場所によってずれ、少し未来になったり少し過去になったりするのだ。

◇式を簡単にするための便法ではなく、現実の時間がずれるのである。

◇この「時間のずれ」こそ、アイデアが物理学にもたらした最大の衝撃だと言ってよいだろう。

## 【79】

◇多くの人々、「現在」という時刻が全ての場所で共通すると思っているだろう。

◇太陽系から8.6光年の距離にあるシリウスを望遠鏡で見よう。

◇光が届くのに8.6年掛かるのだから、われわれが目に見えるのは8.6年前のシリウスであり、シリウスの「現在」は目に映る光景よりも8.6年先になると考えるのがふつうである。

◇しかし、特殊相対論は、こうした「全宇宙で共通する現在」という観念を否定する。

◇同時性の定義は座標系によって異なっており、ある座標系から見れば、シリウスが光を発した時刻と地球上でそれを受け取った時刻が同時になるのである。

◇同時とは絶対的な観念ではない。

◇ある座標系で同時とされた二つの出来事が、別の座標系では過去と未来に分かれる。

◇新たな座標変換がこのような奇妙な時間のずれをもたらすことに気がついたとき、おそらくポアンカレは、自分の先見の明が実証されたと歓喜したことだろう。

◇1898年にポアンカレは次のように述べていたからである。

「(従来の理論に基づく)二つの出来事の同時性や起きる順序、あるいは継続時間の同等性は、自然法則は可能な限り簡単にすべしという宣言の下で定義されたものだ。言い換えれば、こうした定義は、無意識的なご都合主義の所産でしかない。」

## 【80】

◇ポアンカレは、マクスウェル電磁気学がローレンツ変換に対して不変になり、その意味で相対性原理を満たすことを正しく理解したが、1905年の論文では、電磁気学の方程式がローレンツ変換の下で不変に保たれると記してあるだけで、きちんとした証明はない。

◇さらに、「絶対的な運動は検出できないというのが自然界の一般的な法則のようだ」と述べ、ニュートンの重力理論も変更されるべきだという見通しを表明してはいるが、断定的ではない。

◇本格的な理論展開は、1905年7月23日にイタリアのパレルモで行われた会合まで先延ばしされた。

◇だが、それに先立つ6月30日、26歳のアマチュア物理学者のアインシュタインがローレンツ変換の導出を含む完全な論文を提出し、「特殊相対論の発見者」という栄誉を独占することになった。

## 特殊相対論の完成

### 【81】

◇アインシュタインがどのような思考経路を経て特殊相対論に到達したかは、つまびらかにされていない。

◇彼が1895年に出たローレンツの著作を読んだことは、1922年に来日した時の京都講演で明言している。

◇また、マクスウェル電磁気学が相対性原理に従うであろうことを予見したポアンカレの『科学と仮説』を精読したことも、書簡などから確かめられる。

◇だが、ローレンツ変換のもとになる式が提案された1904年のローレンツ論文を読んでいなかったことは、ほぼ確実だ。彼は、どこから着想を得たのだろうか？

### 【82】

◇特殊相対論がそれまでの物理学理論と根本的に異なっているのは、時間の扱いに関してである。

◇多くの物理学者が無自覚のうちに受け容れていた「全宇宙に共通する現在」という観念を否定しなければならないのだ。

◇たとえ一般論として同時性が先験的に定義できるものでないと認めていたとしても、⑦式のように時間座標の変換に空間座標が現れる式に到達するには、巨大な心理的障壁を越えなければならない。

◇実際、1898年に従来の同時性の定義を「ご都合主義の所産」と批判したポアンカレですら、ローレンツによる座標の置き換えが同時性の定義を変革するものだと認識するまでに、それから7年を要した。

◇思うに、アインシュタインもポアンカレと同じく、ローレンツの業績を足場として時間座標の変換式に到達したのではないか。

◇きっかけになったとすれば、読んだことが確実な1895年の著書だろう。

◇ここでの時間座標の置き換えは、 $x^* = x - v t$ と置けばローレンツ変換の式になる⑤式ではなく、 $t^* = t - (v/c^2) x^*$ という式で与えられていた。

◇1895年の著書は長く難解だが、アインシュタインが最後まで読破して、時間座標の置き換えの意味を熟考する機会を持ったとしてもおかしくない。

### 【83】

◇ローレンツは、エーテルに対する運動がどうしても検出できないという謎を解決するため、まず、全ての物体が収縮するという仮説を考案し、さらに、この仮説を一般的な理論へと発展させるために、マクスウェル方程式が不変に保たれるような座標の置き換えを力づくでひねり出した。

◇一連の論文を最後まで読んだポアンカレと、研究途上の一部を目にしたアインシュタインは、この座標の置き換えが単なる便宜的なものではなく、運動する座標系への座標変換と見なすべきだという認識に到達したに相違ない。

◇しかし、ここからアインシュタインとポアンカレの思考は分かれていく。

### 【84】

◇ポアンカレは、あくまでマクスウェル電磁気学という枠の中で議論を進めている。

◇マクスウェル方程式を不変に保つ座標変換としてローレンツ変換を導入する彼の論法は、この理論に全面的に依存している。

◇もしマクスウェル電磁気学が否定されれば、議論全体が砂上の楼閣となりかねないものだった。

◇アインシュタインの論法は、これと大きく異なっている。

◇彼は、マクスウェル電磁気学が厳密には正しくないという確信を抱いていたのだ。

### 【85】

◇マクスウェル電磁気学が厳密には正しくないというのは、アインシュタインが特殊相対論の論文を執筆する直前に発表した光量子論の帰結である。

◇光量子論は、光がマクスウェル電磁学に従う波動ではなく、粒子的な振舞いをすることを主張する

もので、アインシュタインはその正当性に自信を持っていた。

◇マクスウェル電磁気学は、電磁現象を記述する上で役に立つものの、あくまで近似的な理論にすぎない-----そう考えていたアインシュタインが、マクスウェル電磁気学に全面的に依存する論法に満足できなかったのは当然だろう。

◇アインシュタインは、ポアンカレとは全く異なる観点から、理論の骨格を構想する。マクスウェル電磁気学が相対性原理を満たすことを示すのではなく、相対性原理があらゆる物理学理論の基礎になることを要請したのである。

## 物理学の基礎としての相対性原理

### 【86】

◇相対性原理は、アインシュタインにとって、ごく自然なものだった。

◇京都公演によると、アインシュタインは、マイケルソンとモーリーの実験の結果を知っただけで納得し、あえて論文を精読しようとはしなかったらしい。

◇エーテルに対する運動が検出できないことは、彼にとって意外ではなかったのだ。

◇アインシュタインが相対性原理を自然なものとして受け容れたのは、基礎的な物理法則が、いずれもこの原理にかなっているように見えたからである。

◇例えば、ニュートンの重力法則は、運動と静止を区別していない。

◇重力の強さは二つの物体間の距離によって決まり、物体の運動とは無関係だからだ。

◇電磁誘導の法則もそうだ。

◇磁石と導体を互いに相対運動させると起電力が発生するが、この起電力の大きさは、磁石と導体の間の相対的な速度で与えられ、どちらを静止させてどちらを動かすかにはよらない。

### 【87】

◇基礎的な物理法則は、運動と静止を区別していないように見える。

◇この事実を敷衍すれば、運動と静止が区別されないというのは自然界の基本的な原理であり、あらゆる物理法則は、互いに運動するどの座標系で表しても同じ形になると考えるべきではないか。

◇ただし、この段階ではまだ、異なる座標系を結びつける座標変換が求められていない。

◇物理学の命題としての相対性原理は、「互いに運動する座標系の中の座標変換に対して、基礎方程式が不変（正確に言えば共変）になる」と表現される。

◇この座標変換が何であるかを示さなければならない。

◇ポアンカレは、マクスウェル方程式を不変に保つ座標変換としてローレンツ変換を導入した。

◇しかし、物理学の基礎となる座標変換を求めるのに、数ある物理学理論の一つでしかなく、しかも厳密には正しくないと思われるマクスウェル電磁気学を持ち出すのは、主客転倒である-----アインシュタインは、そう考えただろう。

## 光速度不変の原理

### 【88】

◇ここで、アインシュタインは天才の片鱗を見せる。

◇難解なマクスウェル方程式と格闘するローレンツやポアンカレをよそ目に、ごく単純な前提をもう一つ置くだけで、いとも簡単にローレンツ変換を導いてみせたのだ。

◇ややこしい枝葉を切り捨て、本質を見極める天賦の才を持ったアインシュタインならではの神業である。

◇この「もう一つの前提」が、光速度不変の原理である。

◇アインシュタインは、ローレンツの著書や論文を読み、初期の文献に見られるミスを自分で修正することによって、光速度不変の原理を導入する前から、ローレンツ変換を表す⑥⑦式または、これに近い式を手にしてはいたはずである。

◇この式を眺めるうちに、そこに光速  $c$  が現れる意味に思いをめぐらすようになるのは、自然の成り行きだ。

### 【89】

◇ローレンツは、光の速度に変化が見られないというマイケルソンらの実験結果をマックスウェル電磁気学に当てはめ、煩雑な計算を積み重ねることにより、方程式を不変に保つ座標の置き換えを見いだした。

◇だが、電磁気学の計算を迂回して、光速が一定になるという単純な実験事実だけからストレートにローレンツ変換の式を導くこともできるのではないか？

◇光こそマックスウェル電磁気学の桎梏をはずす鍵なのだ。

◇おそらく、こうした推論を経て、アインシュタインは、光速度不変の原理を提案するに至ったのだろう。

◇1905年の論文において、この原理は次のように述べられている。

「光は、真空中を常に一定の速度  $c$  で伝播する。  
この速度は、光源の運動に依存しない。」

◇この文章には、多くの解説書に見られる「光速は観測者の運動に依存しない」という表現はない。

◇その理由は明らかだ。

観測者を特定の座標系における物理現象の記述と解釈すれば、「観測者の運動に依存しない」とは「座標系によって変わらない」という意味になる。

◇ところが、相対性原理によって物理法則は座標系の選び方によらないと主張されているのだから、「真空中を常に一定の速度  $c$  で伝播する」と言った段階で、光速が観測者の運動に依存しないことはすでに含意されている。

◇アインシュタインが、わざわざ光速が「光源の運動に依存しない」というコメントを付け加えたのは、実は、さりげなく自分の信念を表明したものだ。

◇もしマックスウェル電磁気学が正しいとすれば、光速が光源の運動に依存しないことは方程式を解くだけで示される。

◇あえて光源の運動に言及したことで、マックスウェル電磁気学が正しくないという可能性を示唆しているのだ。

## ローレンツ変換の導出

### 【90】

◇光速度不変の原理からローレンツ変換が導かれることを、アインシュタインは、光信号をやりとりしながら時刻を比較するという仮想的な実験をもとに示した。

◇この思考実験では、宇宙のような何もない空間を滑るように進む二人の観測者が、互いに光信号を交換するという状況を想定している。

◇アインシュタインは、思考実験による分析を得意としていたが、これは、具体的なイメージに基づいて本質を考えるとという彼の発想の特質を表している。

具体的な状況をイメージするだけで、本質が浮き彫りになるのだ。

◇相手が一定の速さ  $v$  で遠ざかるように見える二人の観測者  $K$  と  $K'$  を考える。

◇二人がそれぞれ正確な時計を持っており、時計の読みを光信号で送信しあったとしても、光が伝わるのに時間がかかるので、それだけでは、それぞれの時計が示す時刻がどのような関係にあるかはわからない。

◇しかし、次のようにすれば、両者にとっての同時性にずれがあることが即座にわかる。

### 【91】

◇ $K$  から放出された光が  $K'$  で反射されて、再び  $K$  に返ってくる過程を考えよう。

◇このとき、 $K$  から見ると光は同じ距離を往復するだけである。

◇光速度不変の原理によれば、光は行きも帰りも同じ速度  $c$  で伝わるので、行き帰りそれぞれに要する時間は等しい。

◇したがって、光を放出した時に  $K$  の時計が示す時刻が  $T_1$  で、帰ってきたときの時刻が  $T_2$  だとすると、 $K'$  で光が反射されるのは、この二つの時刻の真ん中である  $T = (T_1 + T_2) / 2$  になる。 $K$  にとっては、 $K'$  で光が反射されるという出来事と、 $K$  の時計が  $T$  を示すという出来事が、同時なのである。

### 【92】

◇同じ過程を  $K'$  から見るとどうなるのか？

◇光は、速度  $v$  で遠ざかる光源  $K$  から放出され、 $K'$  で反射されて同じ光源へと戻っていくので、当然、帰りの方が進む道のりが長くなる。

◇一方、光速度不変の原理によって、来るときも帰るときも、光の伝わる速さは  $c$  なので、明らかに帰りの方が時間がかかる。

◇したがって、 $K'$  にとって、 $K$  の時計が  $T_1$  と  $T_2$  の真ん中の時刻  $T$  を示すという出来事は、 $K'$  で光が反射されるという出来事の後に起きる。



◇ $K'$ で光が反射されたとき、 $K$ の時計は $T$ よりも前の時刻を示しているはずである。

◇このように、 $K$ では同時だった二つの出来事が、 $K'$ では過去と未来に分かれることになる。

◇光速不変の原理は、同時性が異なるというローレンツ変換の最も重要な特徴を、何の計算も必要とせず再現してくれる。

### 【93】

◇以上の観測者の代わりに二つの座標系  $K$  (空間座標  $x$ 、時間座標  $t$ ) と  $K'$  (空間座標  $x'$ 、時間座標  $t'$ ) を考えることにする。

◇それぞれの時間座標がゼロのときに、両者の空間座標の原点が一致するように選ぶ。  
また、座標変換の式は各座標についての一次式になることがわかっている。

◇ $K$ から見ると、 $K'$ の原点 ( $x' = 0$ ) は  $x = vt$  と表されるので、 $x = vt$  のときに必ず  $x' = 0$  になるという関係が成り立つ。  
したがって、 $x' = k(x - vt)$  ……⑧  
と書くことができる。

ただし、 $k$  は速度  $v$  の未知関数である。

◇一方、時間座標に関しては、一般的な一次式として、 $t' = kh(t - avx)$  ……⑨  
と書いておく。

$h$  と  $a$  は速度  $v$  の未知関数であり、後の計算を簡単にするために  $k$  と  $v$  を別に記した。

◇ここで、相対性原理を使う。

◇二つの座標系  $K$  と  $K'$  は、どちらかが絶対的な基準と見なされるものではなく、互いに相対速度  $v$  で運動している等価な座標系である。

◇したがって、 $K$  の座標を  $K'$  の座標で表した場合も、速度  $v$  の向きが逆になるという点を除いて、上の⑧⑨式と同じになるべきである。

◇つまり、 $x = k(x' - vt')$   $t = kh(t' - avx')$  と書かれるはずである。

◇この二つの式の  $x'$  と  $t'$  に⑧⑨式を代入したものが  $x$  と  $t$  について恒等的に成り立つためには、 $h = 1/k^2 = 1/(1 - av^2)$  でなければならない。

◇さらに、光速不変の原理を利用しよう。

◇光速が  $K$  でも  $K'$  でも同じ値  $c$  になることを使えば、座標原点から放出される光の軌跡は、 $K$  と  $K'$  で  $x = ct$  および  $x' = ct'$  という式で表される。

◇ここで、二番目の式に⑧⑨式を代入して一番目の式に等しくなると置けば、 $a = 1/c^2$  を得る。これにより、 $k$  が④式で与えたものと等しいことがわかる。

◇こうして得られた結果をまとめると、⑧⑨式がローレンツ変換を表す⑥⑦式と一致することが確かめられる。

#### 【94】

◇ローレンツ変換は、マクスウェル電磁気学に従属しているのではなく、相対性原理と光速不変性という二つの簡単な前提だけから導ける。

◇マクスウェル電磁気学は、この二つの前提を満たす理論の一例にすぎない。

◇たとえば、光量子論のような新しい学説によってマクスウェル電磁気学が大幅に修正されることになったとしても、相対性原理の立脚点が揺らぐわけではない。

### 特殊相対論の完成

#### 【95】

◇アインシュタインが1905年に提唱した理論は、「特殊相対論」と呼ばれる。

◇「特殊」という語がついたのは、座標系同士の運動を等速度運動に限るという制限があるからだ。この条件を撤廃したのが「一般相対論」である。

◇特殊相対論は具体的な物理学の理論ではなく、あらゆる理論がローレンツ変化の下で不変（正確に言えば共変）になることを要請するメタ理論（他の理論に対して一段階高次の理論）に相当する。

◇ニュートン力学は、ローレンツ変換ではなくガリレイ変換に対して不変になるため、特殊相対論の要請を満たしていない。

◇ローレンツ変換に対して不変になるように改良した力学理論が「相対論的力学」である（長くなるので、いちいち「特殊」という語を冠することはしない）。

◇同じように、「相対論的量子力学（量子場理論）」、「相対論的統計力学」などが作られている。

## 【96】

◇特殊相対論の形式はアインシュタインの論文でほぼ完成されたが、後になって、一つだけ重要な修正がなされた。

◇「光速度不変の原理」が単一の原理ではなく、

「座標系によらない一定の伝達速度が存在する」および「この一定の伝達速度は光速である」という二つの内容を合体させたものであり、

特殊相対論の基礎として必要なのは前者だけだとわかったのである。

◇この修正に従うと、ローレンツ変換に現れる $c$ は、光速ではなく一定の伝達速度を表す量に読み替えられる。

◇いまのところ、 $c$ が光速でないことを示す確実なデータはないが、理論家たちはすでに、特殊相対論の枠組みに従いながら光速が一定にならない理論を、いくつも提案している。

## 【97】

◇アインシュタイン自身による特殊相対論への貢献としては、「奇跡の年」1905年に書かれた4本目の論文が重要である。

◇この論文では、後に、

$E=mc^2$ という公式の形で表される「質量とエネルギーの等価性」のアイデアが提案された。

◇このアイデアに従えば、質量 $m$ を持つ物体は、たとえ運動していなくても、 $mc^2$ に等しいエネルギーを持つ。

◇この結果は、単に理論的な面で意義深いだけでない。

◇ウランの核分裂のように質量が変化する原子核反応によって莫大なエネルギーが得られることを明らかにし、核兵器や原子力発電に至る道を拓いた。

## アインシュタイン以後

## 【98】

◇特殊相対論の形式は完成されたものの、1905年の時点では、特殊相対論が本当は何を意味するのかを、アインシュタイン本人も含めて、誰も十分に理解していなかった。

◇この点を明らかにしたのが、数学者ヘルマン・ミンコフスキである。

◇ミンコフスキは、まず、ローレンツ変換に対する不変性がはっきりするように、マクスウェル方程式を書き換えることから始めた。

◇1907年の論文から想像すると、おそらく、空間と時間の現れ方がシンメトリックになるように、虚数単位  $i$  ( $i^2 = -1$ ) を含む変数  $w = it$  を使って式を書き直してみたのだろう。

◇電場や磁場についても  $i$  を使って書き換えていったところ、最終的な方程式は驚くほど簡単な形になった。

◇それはまるで、三つの空間座標  $x$ 、 $y$ 、 $z$  で表される三次元の他に四番目の次元  $w$  がある四次元ユークリッド空間の幾何学を表す式のような感じだった。

◇このとき、何か閃くものがあったのだろう。彼は、変数を  $t$  に戻して空間座標  $x$ 、 $y$ 、 $z$  と時間座標  $t$  から成る四次元の世界を想定し、そこでの幾何学を考え始めた。

### 【99】

◇1908年のケルンで開催された学会で、ミンコフスキは「時間と空間」というタイトルの講演を行い、専門外の人にもわかるように解説した。

◇冒頭で、ミンコフスキは、大胆にも次のように言明している。

「皆さんに紹介しようとしている時間と空間の見解は、実験物理学の土壌から生まれたものであり、それだけに強固です。

この見解は革新的です。

今後は、空間自体、時間自体といったものは完全に影でしかなくなり、この二つをある方法で結合したものだけが自立した存在になるのです」。

## 四次元時空という発想

### 【100】

◇ミンコフスキの主張は次のようなものだ。

◇あらゆる現象は、時間と空間を併せた一つの“空間”の中で生起する。

◇ただし、この“空間”は、ユークリッド空間ではない。

◇話を簡単にするため、二次元で考えよう。

◇ユークリッド空間ならば、ピタゴラスの定理が成立するので、原点までの距離  $r$  は、二つの空間座標  $x$  と  $y$  を使って、 $r^2 = x^2 + y^2$  と表される。

◇ところが、ミンコフスキが新たに提案した“空間-----後にミンコフスキ空間と呼ばれるもの-----”では、そうはならない。

◇空間座標  $x$  と時間座標  $t$  から成る二次元ミンコフスキ空間の場合、原点までの距離は、  
 $r^2 = x^2 - (ct)^2$  または  
 $s^2 = (ct)^2 - x^2 \dots \textcircled{10}$   
で定義される。

◇ただし、 $x^2 > (ct)^2$  のときには“空間的な距離”  $r$  が、 $x^2 < (ct)^2$  のときには“時間的な距離”  $s$  が使われる。

◇ $x^2 = (ct)^2$  ならば、 $x$  や  $t$  がゼロでなくても、距離はゼロとなる。

◇この式に出てくる  $c$  は、光速とは限らない。

◇ $c$  は、空間をメートル、時間を秒というように異なる単位を使ったときに必要となる換算定数（坪を平方メートルに換算する3.3のようなもの）で、空間と時間を同じ単位で表すようにすれば、 $c$  はなくてもかまわない。

### 【101】

◇ここで、 $\textcircled{10}$ 式で定義される距離を変えないようにして、ミンコフスキ空間の中で座標系を回転させることを考えよう。

◇この回転が、ローレンツ変換に相当する。

◇ユークリッド空間では、距離を変えずに座標系を回転させることは、図形をそのままにして座標軸だけを回す座標変換に相当するが、ミンコフスキ空間でも基本的に同じである。

◇ローレンツ変換が四次元空間の回転だとすると、場所ごとに時間のずれが生じる理由がはっきりするだろう。

◇座標系を回転させると、時間軸は元の軸に対して傾くため、時間と空間が混ざってしまうのだ。

### 【102】

◇一般的な常識では、運動とは刻々と場所を移動するというダイナミックな過程を意味する。

◇しかし、時間軸も空間軸と同じように扱う四次元空間の幾何学は、こうした常識とは全く異なる視点を提供する。

◇この視点からすると、運動とは、四次元空間の中の軌跡というスタティックな存在となる。

◇静止は（空間軸方向への移動がないので）時間軸に平行な軌跡、等速度運動は時間軸に対して一定の傾きを持つ軌跡である。

◇常識では、運動と静止は異質な過程のようにイメージされるが、四次元幾何学の視点では、座標軸を回転させて時間軸を傾げるだけで、静止は運動に、運動は静止に変えられるのである。

### 【103】

◇ここまでくると、相対性原理を四次元幾何学によって説明することができる。

◇ユークリッド空間がそうであるように、ミンコフスキ空間にも、基準となるような特徴的な場所や方位が存在しない。

◇どこにいてどこを向いても、空間は同じように広がっている。

◇ミンコフスキ空間では、運動を表す軌跡が時間軸に平行ならば静止しており、斜めに傾いていれば動いていることになるのだが、どの方位も同じだとすれば、基準とすべき時間軸の向きを定めることができない。

◇周囲に何も無い宇宙空間に棒が漂っていることを思い描いていただきたい。

◇この棒が斜めかどうか問われても、何に対して斜めかを指定しない限り、答えようがない。

◇それと同じで、ミンコフスキ空間内部では、軌跡が斜めに傾いているかどうかは、何に対して斜めかという基準がない以上、判定しようがないのだ。

◇このように、四次元幾何学に基づいて考えると、特殊相対論の内容はきわめて明瞭になる。

◇特殊相対論の物理的意味は、ミンコフスキ空間を用いることで、はじめて理解できると言っても過言ではあるまい。

### 【104】

◇ミンコフスキが行ったことは、特殊相対論の内容を数学的な概念によって明確化することである。

◇ここで、重大な疑問があるのだが、ミンコフスキ空間とは、単に特殊相対論をわかりやすくするた

めに考案された数学的な虚構だろうか？

◇それとも、われわれの生きている世界が、(少なくとも近似的に) ミンコフスキ空間と言ってよいものなのだろうか？

◇もしミンコフスキ空間が現実的なものだとする、時間について根本的に考え直さなければならない。

◇われわれの実感、時間が流れたと告げている。

◇過去は過ぎ去り、未来は未だ来たらず、ただ現在だけが現にある。

◇唯一の現在が不断に更新されていく過程が、時間の流れだ-----というのが一般的なイメージだろう。

◇しかし、ミンコフスキ空間では、時間は、空間と同じく拡がりの次元となる。

◇現在だけが存在するというわけではない。  
過去から未来に至るあらゆる時刻が同等に扱われるのだ。

### 【105】

◇アインシュタインは、当初、ミンコフスキによる時空の概念をあまり好まなかったようだ。だが、数年後になって、彼は、幾何学的なイメージの持つ力が物理学に役立つことに気がつく。

◇単に特殊相対論の意味が明確になるだけではない。

◇特殊相対論を乗り越えミンコフスキ空間を拡張するような理論を構築しようとする際にも、幾何学的な手法は導きの糸となるのだ。

◇こうしてアインシュタインは、幾何学的な発想に基づいて、一般相対論の建設を目指すようになる。

## 【第2章 四次元幾何学の饗宴 ----- 一般相対論】

### 【106】

◇一般相対論の建設は、物理学の歴史において最も偉大な成果の一つである。

◇アインシュタイン以前の理論でこれに匹敵するのは、ニュートンの力学と重力理論、マクスウェルの電磁気学、それに、ルートヴィヒ・ボルツマンの統計力学くらいだろう。

◇しかも、マクスウェルとボルツマンの業績が、他の多くの物理学者の仕事を踏まえて成し遂げられたものであるのに対して、1915年に完成された一般相対論は、出発点となるアイデアから完成形に至るまで、アインシュタインがほとんど単独で作りに上げている。

### 【107】

◇一般相対論の出発点となる等価原理は、いかにもアインシュタインらしい直観的な発想で導入された。

◇重力による光の屈折を求める論法も、具体的なイメージに基づく思考実験がベースになっている。

◇だが、それだけでは一般相対論を作ることはできない。

◇基礎方程式を模索する過程で、アインシュタインは、それまで多大な成果を上げてきた自分流の方法論を捨てざるを得なかった。

◇こうして完成された一般相対論は、彼に、多くの栄光とともに、若干の悩みの種を与えることになる。

◇過去のしがらみや型にはまった論理に縛られない思考の飛躍を得意とするアインシュタインにとって、きわめて数学的で具体的にイメージしにくい一般相対論は、しばしば彼の頭を混乱させ、誤った結論に導いたからである。

## 素朴なアイデアからの出発

### 【108】

◇アインシュタインが一般相対論の研究に着手するきっかけとなったのは、相対論と重力をめぐる考察である。

◇特殊相対論が発表された1905年当時、物質は電子やイオンのような電荷を持った粒子から構成されるという見方が有力になっていた。

◇この見方によれば、物質を接触させたときに生じる抵抗力や摩擦力は、電荷を持つ粒子間の電磁的な相互作用として理解される。

◇つまり、われわれの身の回りに現れる力の大部分は、マクスウェル電磁気学（厳密に言えば、これ



とニュートン力学を組み合わせたローレンツの理論)で記述できるわけである。

◇そして、第1章で見たように、マクスウェル電磁気学は、特殊相対論の枠組みに完全に収まっている。

### 【109】

◇しかし、物質界にはもう一つ、別種の力がある。

◇質量を持つ物体同士が及ぼし合う重力だ。

◇特殊相対論は、それまで学界で圧倒的な信頼を勝ち得ていたニュートンの重力理論と、ひどく相性が悪かった。

◇ニュートンの重力理論によれば、二つの物体の間に働く重力の大きさは、物体間の距離と各物体の質量によって決まり、物体がどのように運動しているかにはよらない。

◇この性質は、運動と静止を区別しない相対性原理にかなっている。

◇ところが、アインシュタインの特殊相対論は、相対性原理だけでなく、さらに光速度不変性の要請を付け加えたことによって、座標系ごとに同時性が異なるという従来の理論にはない特徴を持っている。

◇このことが、重力理論と特殊相対論の相性の悪さをもたらすのだ。

### 【110】

◇ニュートンの理論には、重力の作用が空間を伝わっていくメカニズムが含まれていない。

◇これによると、重力は、どんなに離れていようとも瞬間的に伝播すると考えるしかない。

◇例として、月による重力の作用を考えると、月は地球の周りを公転しながら地球に重力を及ぼしており、これが潮の干満を引き起こしている。

◇ニュートンの重力理論によれば、地球が引っ張られる向きは、その時刻の月の位置に向かう方向である。

◇だが、「その時刻」とは誰から見ての時刻なのか？

◇特殊相対論によれば、同時となる時刻は座標系によって異なる。

◇たとえば地球から見て「現在の」月の向きに引っ張られているとしても、別の座標系から見ると、時間がずれて、未来の月が過去の地球を引っ張っていることになるだろう。

◇しかし、未来が過去に影響を及ぼすことなどあり得るのだろうか？

◇「結果が原因に先立つことはない」という因果律を物理学の基礎として認めるならば、これはあり得ない状況だと考えざるを得ない。

◇とすれば、重力が空間を越えて瞬間的に作用することはないはずである。

### 【111】

◇特殊相対論の結論と矛盾しないようにするためには、光速を越えないスピードで重力が伝播するメカニズムを定式化しなければならない。

◇しかし、20世紀初頭には、重力の伝播を示す観測データは全く存在しなかった（現在でも、信頼できるデータはほとんどない）。

◇複雑な現象から枝葉を捨象して本質を見出すことに関しては抜群の能力を持っていたアインシュタインでも、何ら手がかりがないところから理論を作り出すのは難しい。

◇重力を相対論の枠に取り込むのは、手に余る大仕事のように思えた。

◇しかし、ここで素晴らしいアイデアが浮かぶ。  
重力を理論化するに当たって、もっとストレートな方法があったのである。

## 等価原理-----「落下する人は重さを感じない」

### 【112】

◇そのアイデアが脳裏に浮かんだ瞬間を、アインシュタインは、1922年の京都講演で次のように具体的に語っている。

『私はベルンの特許局で一つの椅子に座っていました。そのとき突然一つの思想が私に湧いたのです。「或るひとり人間が自由に落ちたとしたなら、その人は自分の重さを感じないに違いない」私ははっと思いました。  
この簡単な思考は私に実に深い印象を与えたのです。  
私はこの感激によって重力の理論へ自分を進ませ得たのです』。

◇自由に落下するときに重力を感じない-----これは、物理学的に言えば、重力加速度と同じ加速度

で運動する座標系では、重力の作用が消失することを意味する。

◇アインシュタインは、ここに重力を理論化する手がかりがあることに気がついたのだ。

### 【113】

◇特殊相対論は、個々の理論が満たすべき要件を与えるメタ理論である。

◇例えば、マクスウェル電磁気学は、この要件を満たす数ある下位理論の一つとして位置づけられる。

◇アインシュタインは、当初、重力に対しても、電磁気に対するのと同じ方針で取り組んだ。

◇特殊相対論の要件を満たすように、光速以下のスピードで作用が伝わる重力理論を構築しようとしたのである。

◇ポアンカレを含む他の何人かの物理学者も、似たようなアイデアを追求していたが、結局はいずれも挫折に終わった。

### 【114】

◇今になってみれば、こうした試みは、全体的外れだったことがわかる。

◇相対論の枠組みに重力を取り込むのではない。

◇相対論そのものを見直さなければならなかったのだ。

◇アインシュタインの脳裏に閃いたアイデアとは、  
加速度運動を含むように特殊相対論を拡張すると、相対論はもはや単なるメタ理論ではなく、その中に重力という物理的な実態を含むようになるということである。

### 【115】

◇自由落下によって重力が消失することは、軌道上にあるスペースシャトルを思い浮かべるとわかりやすい。

◇シャトル内部は無重力状態になっており、固定されていない物体はフワフワと浮かんでしまう。  
このときシャトルは、地上からせいぜい数百キロの上空に位置している。

◇地球の直径は1万2700キロメートルもあるので、宇宙空間から眺めると、シャトルは地表スレスレを飛行していることになる。

◇それでも無重力状態が実現されるのは、シャトルが重力の作用で落下し続けているからである。

もし地球からの重力がなければ、シャトルは慣性の法則に従って直進するので、周回軌道を逸脱して宇宙の彼方に飛び去ってしまう。

◇重力の作用を受けながら少しずつ落下することで進行方向が曲げられ、円を描いて地球を回る軌道に乗っているのだ。

◇地球の中心に向かう方向だけを考えると、重力によって自由落下していることになり、その結果として、シャトル内部での重力が消失するのである。

### 【116】

◇ニュートンの力学の考えを使うと、重力が消失するのではなく、シャトルが円軌道を描くことによる遠心力がちょうど重力と同じ大きさになって、重力が消えたように見えるだけだと説明される。

◇遠心力は、座標系が加速度運動していることに伴って現れる「見かけの力」にすぎないというのだ。

◇こうした見かけの力は、円運動だけではなく、あらゆる加速度運動に伴って現れる。

◇例えば、自動車が急発進する場合、自動車が進行方向に加速している間、乗っている人間は、背もたれに押しつけられるような感覚を味わう。

◇まるで、背もたれに向かう重力が働いているかのようだが、ニュートン力学によると、背もたれに押しつける力は、実際に作用しているのではない。

◇「静止物体は静止し続けようとする」という慣性の法則によって人間が後方に取り残されそうになるため、前方に加速する自動車の背もたれの方が人間を押ししているだけのことだ。

◇急上昇するエレベータで体が重くなったように感じるのも、急カーブするジェットコースターから放り出されそうになるのも、慣性の法則の現れであり、現実には力が働いたのではない-----というのがニュートン力学の主張であり、慣性の法則に起因する見かけの力は、「慣性力」と総称される。

### 【117】

◇アインシュタインは、ニュートン力学で見かけの力にすぎなかった慣性力を、重力と同等のものに見なしたのである。

◇自由落下する座標系では重力が消失するが、これは、慣性力と重力がたまたま同じ大きさになって、重力の作用が見えなくなったというわけではない。

◇重力が完全に消失したのであり、重力が存在しない状態と物理的に同一になる。

◇これが、後にアインシュタイン自身が「わが生涯で最高」と呼んだアイデアである。

◇重力と慣性力は原理的に区別できない等価なものだという主張は、「等価原理」と呼ばれる。

◇ちょうど、相対性原理に加えて光速不変の原理を要請することで特殊相対論を構築したように、アインシュタインは、等価原理を要請することで、重力を内包する相対論----- 一般相対論-----を作ろうとしたのである。

◇しかし、この試みは難航する。

## 重力と時間

### 【118】

◇等価原理から具体的な帰結を導くために、アインシュタインは、得意とする光を使った思考実験を試みた。

◇彼にならって、間隔  $h$  を保つように設置された光源  $S$  と測定器  $O$  を用意し、 $S$  と  $O$  をエレベータなどに載せ、両者を加速度  $g$  で運動させることを考えよう（観測者は同乗せず、エレベータの外にいる）。

◇アインシュタインが問題にしたのは、 $S$  で振動数  $\nu$ （ニュー）だった光が、 $O$  で測定されるときにどうなっているかである。

◇ $S$  と  $O$  が動き出す瞬間に  $S$  から放出された光は、距離  $h$  だけ進んで  $O$  に到達する（正確に言えば、 $O$  は元の位置よりも少し上に移動しているが、ごくわずかな補正しか与えないので、無視することが許される）。

◇光が到達するのに要する時間  $t$  は、距離  $h$  を光速  $c$  で移動する時間なので、 $t = h/c$  となる。

◇ところが、この間に  $O$  は加速度  $g$  で加速されている。

◇速度が  $0$  から毎秒  $g$  ずつ増えていくので、 $O$  の速度  $v$  は  $v = g t = gh/c$  となる。

◇光が到達したとき、 $O$  は追いかけてくる光から速度  $v$  で逃げるように運動しているので、いわゆる「ドップラー効果」によって、光の振動数として光源で放出されたときと異なる値が測定される。

### 【119】

◇ドップラー効果の公式は、次のようにして求められる。

◇速度  $v$  で逃げる  $O$  を、光が光速  $c$  で追い越していくものとして考える。

◇このとき、光が  $O$  を追い越す際の相対速度は  $c-v$  となるが、これは、 $O$  がじっとしている場合の追い越し速度  $c$  と比べて、 $(c-v)/c$  の割合で遅くなっている。

◇したがって、1秒間に  $O$  を追い越していく光の波の個数も  $(c-v)/c$  という割合で減少する。

◇1秒間にカウントされる波の個数が振動数なので、測定される振動数  $\nu'$  は、 $O$  が静止しているときの値  $\nu$  とは異なり、 $\nu' = \nu (c-v)/c = \nu (1-v/c)$  となる。

◇これがドップラー効果の公式である。 $v=gh/c$  を代入すれば、 $\nu' = \nu (1-gh/c^2)$  ……① となる。

### 【120】

◇ドップラー効果による振動数の減少は、よく知られた現象であって目新しいことは何もないはずである。

◇しかし、アインシュタインは、加速度運動する座標系にも相対性原理が適用できると考え、この議論をさらに一歩進めた。

◇同じ現象を、光源  $S$  や測定器  $O$  と一緒に加速度  $g$  で運動する座標系  $K$  で記述してみる。直観的に理解するには、 $S$  と  $O$  を載せたエレベータに観測者が同乗することをイメージすればよいだろう。

◇この座標系では、 $S$  と  $O$  は同じ位置にとどまっている。

◇にもかかわらず、 $S$  で放出された光が  $O$  に到達したとき、振動数が  $\nu$  から  $\nu'$  に減少している。

◇これはなぜだろうか？

◇相対性原理を受け容れない場合は、「運動によってドップラー効果が生じた」と簡単に説明できてしまう。

◇だが、加速度運動のときにも相対性原理が満たされており、加速度運動する座標系でも静止座標系でも同じ物理法則が成り立つという立場を貫徹するならば、「運動しているから」という根拠は使えない。

◇では、何が原因となって振動数が減少したのか？

## 【121】

◇ここでさらに、等価原理を適用しよう。

◇加速度運動する座標系  $K$  には、ちょうど急上昇するエレベータで体が重く感じるときと同じく、慣性力が作用している。

◇等価原理によれば、慣性力は重力と等価であり、慣性力が作用する座標系での物理現象は、同じ大きさの重力が働いているときの物理現象と等しい。

◇そこで、座標系  $K$  の慣性力と同じ大きさの重力が作用する座標系  $K'$  を考えよう ( $S$  と  $O$  と観測者を載せたエレベータが地上に接置していることをイメージすればよい)。

◇等価原理によると、 $K'$  では  $K$  と同じ物理現象が生じることになり、その結果として、 $K'$  でも  $K$  と同じように振動数の現象が観測されるはずである。

◇ $K'$  は運動していないので、ドップラー効果は生じない。

◇したがって、振動数の減少は、他に原因となるものがない以上、重力の作用に起因すると考えざるを得ない。

◇等価原理を信じるならば、重力は、光の振動数を変化させるのである。

## 【122】

◇式を簡単にするために、重力ポテンシャル  $\Phi$  (ファイ) という量を導入しよう。

◇重力ポテンシャルは位置の関数 (重力源が時間とともに変動する場合は、さらに時間の関数) であり、重力を記述するための量としてアインシュタイン以前から利用されていた。

◇直観的に理解するためには、高さが  $\Phi$  で与えられるような斜面をイメージしていただきたい。

◇この斜面上の物体を滑り落とそうとする作用が重力である (正確な言い方をすれば、 $\Phi$  を位置座標で微分したものに質量  $m$  をかけた値が重力の大きさを表す)。

◇水が高い所から低い所へと自然に流れていくように、重力ポテンシャル  $\Phi$  が存在する領域に置かれた物体は、 $\Phi$  の高い所から低い所へと自然に移動しようとする。

◇特に重力加速度が一定の値  $g$  のとき、重力ポテンシャル  $\Phi$  は一定の傾きを持つ斜面で表され、その高さは1メートルごとに  $g$  だけ高くなる。

### 【123】

◇ $K'$ における光の振動数の変化を、重力ポテンシャル $\Phi$ を用いて表してみよう。

◇加速度 $g$ で運動する $K$ で質量 $m$ の物体に働く慣性力は $mg$ になることが知られているので、 $K'$ の重力も $mg$ であり、重力加速度は $g$ となる。

◇ $S$ と $O$ の重力ポテンシャルの差を $\Delta\Phi$ とすると、重力加速度が一定の値 $g$ なので、 $h$ メートルの間に $\Phi$ の斜面は $gh$ だけ高くなる。

◇したがって、 $\Delta\Phi = gh$ と表される。

これを使えば、 $\nu' = \nu (1 - gh/c^2)$ ・・・①は、  
 $\nu' = \nu (1 - \Delta\Phi/c^2)$ ・・・②となる。

◇等価原理を信じるならば、これは一般的に成り立つ式であり、ある地点で放出された振動数 $\nu$ の光を、そこよりも重力ポテンシャルの値が $\Delta\Phi$ だけ高い地点で観測すると、観測される振動数 $\nu'$ は②式で表される。

### 【124】

◇ここで、太陽のような恒星から発せられる光を考えよう。

◇恒星からの光のスペクトル（プリズムなどで光を波長ごとに分けたときの光の帯）には、所々に周囲に比べて暗くなっている領域がある。

◇これは暗線（吸収線）と呼ばれるもので、恒星の表面近くに存在する原子が光を吸収することに起因する。

◇吸収される光の振動数は、原子が従う物理法則によって決定される。

◇地球上で観測するとき重力ポテンシャルは恒星表面よりも高いので、恒星からやってくる光の暗線の位置は、原子物理で予想されるよりも振動数が小さい（波長が長い）方に移動しているはずである。

◇可視光線で最も波長が長い光が赤であることから、こうした変化を、波長が赤の方にずれる現象という意味で、重力による「赤方偏移」と呼ぶ。

◇アインシュタインは、太陽表面からの光の場合、振動数が小さくなり波長が伸びる割合が、0.002%程度だと結論した。

◇当時の太陽観測のデータには暗線の移動を示す結果が記録されていたが、圧力など他の要因も考えられるため、確固としたことは何も言えなかった。



◇現在では、中性子星のような巨大な質量を持つ天体で、重力による赤方偏移が実際に観測されている。

### 【125】

◇ここまで考えたところで、アインシュタインは行き詰ってしまった。

◇本書の「はじめに」に記した図で言えば、「自由落下する人は重力を感じない」という経験的な事実Eから等価原理という仮説Aにジャンプすることはできたものの、そこから導ける命題Sとしては、

◇赤方偏移という当時はまだ観測困難なものしか見つからなかったのである。

◇実験や観測のデータと比較できるような命題が導けなければ、理論の検証もできない。

◇実際、1907年の時点で、アインシュタインの提唱した等価原理は、全くと言っていいほど注目を集めなかった。

◇もはや先に進むすべがなくなったアインシュタインは、いったん重力の研究から手を引く。この年から1911年までは、特殊相対論や統計力学、量子論に関する研究に専念した。

## 重力が光を曲げる！

### 【126】

◇アインシュタインが再び重力の問題にチャレンジするのは、1911年、プラハの大学に赴いてからである。

◇このとき、等価原理から導かれる命題を新たに思いついたのだ。

◇1907年の論文に記された②式が何を意味しているのか、もう少し考えてみよう。

◇振動数は1秒あたりの波の個数である。

◇②式は、光源Sで1秒間に $\nu$ 個だった波が、そこより重力ポテンシャルが $\Delta\phi$ だけ高い場所にある測定器Oでは、1秒間に $\nu'$ 個に減少していることを意味する。

◇しかし、SもOも運動しておらず、ドップラー効果が生じたのではないとすると、何が起きたのだろうか？

◇途中で波が消えるわけではないのだから、 $\nu$  個の波がいつの間にか  $\nu'$  個に変わるはずがない。

◇とすれば、変わったのは「1 秒間」という時間の定義だと考えざるを得ない。

### 【127】

◇S ではOよりも時間がゆっくり経過しているのではないか-----アインシュタインは、そう推理した。

◇S で1 秒あたり  $\nu$  個の波を用意して送り出したとしても、時間がゆっくり流れる S で1 秒間だった時間間隔は、O では1 秒よりもながくなってしまう。

◇このため、Oでの1 秒あたりの波の個数は、S よりも少なくなる。

◇これが、光の振動数が減少する理由である。

◇S では、光だけではなく、あらゆる物理現象がゆっくり進行していると考えられる。

◇アインシュタインは、特殊相対論を構築したときの経験で、座標系の変換が時間の伸び縮みをもたらすことを知っていた。

◇等価原理によって重力の作用が座標系の変換と結びつけられているのだから、重力が時間の進み方の変化と関係していると考えてもおかしくない。

◇重力とはそもそも時間の進み方が変わる効果ではないのか？

### 【128】

◇重力ポテンシャルに応じて場所ごとに時間の進み方が異なるのならば、光速についても考え直さなければならぬ。

◇巨大な質量を持つ天体の近くは重力ポテンシャルが低いので、遠く離れた地点から観測すると、時間がゆっくり進み、

それに伴って光の伝わり方も遅くなるように見える。

◇これは、実質的に光速が変化することを意味する。

### 【129】

◇場所によって光速が変化しているときにどのような現象が生じるかは、19世紀の光学ですでに明らかになっていた。

◇光学の理論によると、水のような透明な媒質の中では光速は真空中に比べて遅くなり、その影響は屈折という目に見える形で現れる。

◇媒質の屈折率が $n$ のとき、この媒質中の光速は真空中の $n$ 分の1に遅くなっている。

### 【130】

◇アインシュタインの考えによると、天体の周囲では重力ポテンシャルのせいで光速がおそくなるのだから、光線に対して、あたかも屈折率を持つ透明媒質であるかのように振舞うことになる。

◇天体から十分に離れた観測地点と天体周辺の重力ポテンシャルの差を $\Delta\Phi$ と書くことにしよう。

◇②式によれば、

観測される振動数は元の $(1-\Delta\Phi/c^2)$ 倍になるのだから、天体周辺の時間は、 $(1-\Delta\Phi/c^2)$ 倍に伸びてゆっくり経過していることになる。

◇光速は、時間がゆっくり経過する分だけ遅くなるので、遠く離れた宇宙空間に比べて $(1-\Delta\Phi/c^2)$ 倍になっている。

◇屈折率が $n$ のとき光速は $n$ 分の1になるという関係を使えば、屈折率 $n$ は $1-\Delta\Phi/c^2$ の逆数、つまり、 $n=1/(1-\Delta\Phi/c^2)$ ・・・③ となる。

◇ $\Delta\Phi$ はニュートンの重力理論によって与えられる（天体の質量を $M$ 、万有引力定数を $G$ とすると、天体からの距離が $r$ の地点で $\Delta\Phi=GM/r$ となる）。

### 【131】

◇屈折率が③式で表されるとき光線がどのように曲がるかだが、大ざっぱに言えば、天体に近いほど $\Delta\Phi$ の値が大きく光速が遅いため、天体の存在する側へと光線が曲がっていく。

◇アインシュタインが、太陽質量などに関する当時のデータをもとに、太陽の周辺で光線がどれだけ曲げられるかを求めたところ、

太陽の縁を通過する光線が、角度にして0.83秒（1秒は1度の3600分の1）だけ屈折することがわかった。

◇つまり、重力による光の屈折がなければ太陽の縁ギリギリに見えるはずの遠方の天体が、0.83秒だけ太陽から離れた方位に見えることになる。

◇以上の結果は、1911年に発表された論文に記されている。

◇重力が光線を曲げることは、ニュートンの重力理論やマクスウェル電磁気学には含意されていない。

◇アインシュタインは、これこそ等価原理から導かれる新たな命題であり、この現象が観測されれば、自分の理論の検証になると考えた。

◇彼は、見かけの位置の変化が皆既日食のときに実際に観測できると主張した。

## 混迷するアインシュタイン

### 【132】

◇重力による光の屈折という具体的な命題を導き出せたことで奮起したのか、アインシュタインは、プラハに在住していた1912年にさらに二つの論文を発表して、重力と光の関係を検討しているが、これらは彼の名誉にはならない不出来なものだった。

◇最初の論文では、光速を重力場として用いるという新たなアイデアが展開されている。

◇重力が光速に影響を及ぼすのではない。  
光速が重力だということだ。

◇そもそも光速とは、便宜的に決めた時間と空間の尺度を換算する定数でしかない。

◇世界を四次元の時空と見なし、その幾何学的な性質を解明するというミンコフスキの立場を採用していたならば、光速を重力と見なすというおかしなアイデアを追い求めることはなかったはずである。

◇この時点でアインシュタインは、四次元幾何学という観点から相対論を考察してはいなかったのである。

◇二番目の論文は、何とか手がかりを得ようと、電磁気学や熱力学と重力の関係について考察したものの、打開策が見いだせず泥沼にはまり込んだという印象を受ける。

### 【133】

◇もっとも、手がかりとなりそうなアイデアの種が、論文の中でいくつか芽吹いていた。

◇最初の論文の冒頭近くには、回転運動している座標系で、円周と直径の比が円周率 $\pi$ に等しくならないことが指摘されている。

◇自転車の車輪を思い浮かべていただくと、車輪とともに回転する座標系では、輪に沿った方向にはローレンツ変換による長さの変化が生じるのに、スポークの方向には生じない。

◇このため、回転座標系では、円周と直径の比がユークリッド幾何学とは異なる結果になる。

◇座標系によってはユークリッド幾何学が成り立たなくなるという可能性にアインシュタインがわずかなりとも注意を向けた点は、後で述べるように重要である。

◇さらに、二番目の論文の末尾に校正の段階で加えられた付記で、「最小作用の原理」について触れていることも見逃せない。

◇最小作用の原理とは、力学を定式化するための一つの数学的な手法であり、相対論で使うときには、幾何学的に定義される長さを足しあわせるという計算を行う。

◇もしかしたら、この計算を行っているときに、四次元幾何学に目を向けるきっかけが得られたのかもしれない。

## 革命----1912年夏

### 【134】

◇1912年8月、アインシュタインは、母校、連邦工科大学の正教授に就任する。  
この頃、何か起きた。

◇この年の終わりまでに執筆され、1913年に発表された論文「一般相対論および重力理論の構想」で、一般相対論は、いきなり四次元幾何学へと変貌したのである。

◇それまでミンコフスキ流の四次元幾何学のアイデアをあまり重視していなかったアインシュタインだが、このとき以降、一般相対論を展開する際、幾何学に全面的に依拠するようになる。

◇そのせいもあって論文は膨大な数式群に埋め尽くされ、今に至るまで、学生や研究者を苦しめ続けている。

## 四次元幾何学への変貌

### 【135】

◇「一般相対論および重力理論の構想」（以下、「構想」と略記）で紹介される四次元幾何学のアイデアは、それ以前の論文とは大幅に異なったものである。

◇アインシュタインは、1911年の論文で重力の作用によって時間の進み方が変化することを指摘した。

◇天体のような重力源の周囲では、場所によって重力の強さが変化するので、それに応じて時間の進み方が異なる。

◇こうした状況は、アインシュタインがそれまで想定していた「正確なときを刻む時計を使って座標系の時間を定義する」という方法が通用しないことを意味する。

◇それまでの彼にとって、時間とは座標系の原点に置かれた時計によって示されるもので、座標系全体を一つの時間が支配すると考えていた。

◇ところが、重力が作用していると、一つの時計では不十分である。

◇はじめのうちは、いろいろな場所に時計を置いてみたり、ある場所の時計で全体を代表させたりしていたが、そうした手法では重力を扱いきれないことは明らかだ。

◇ここで必要とされるのは、場所ごとに伸び縮みして目盛りの間隔が異なるような時間座標を導入することだ。

### 【136】

◇空間についても同様である。

◇以前の論文では、狂いのない物差しによって空間座標が定義できるとされていたが、重力が作用する場所では、そんな物差しはあり得ないことがわかってくる。

◇1912年の論文で、回転している座標系ではユークリッド幾何学の定理が成り立たなくなる可能性が指摘されていた。

◇これは、物差しを回転する周の方向に置くか、直径（車輪で言えばスポーク）の方向に置くかによって、ローレンツ変換による伸縮が異なるからである。

◇回転座標系には遠心力という慣性力が現れるが、等価原理によれば慣性力は重力と等価なので、重力が作用している空間でも、重力の強さや向きに応じて物差しに伸縮があることになる。

◇とすると、場所によって曲がったり伸び縮みしたりするような空間座標を使うべきである。

### 【137】

◇このように、ただ一つの時計と物差しを使って座標を定義するという発想を捨て、代わって、目盛りのつけ方が場所ごとに異なるグニャグニャの座標を採用しなければならない。

◇これが、四次元幾何学への第一歩となる。

◇こうしたグニャグニャの座標を式で表すに当たっては、最小作用の原理が導きの糸になる。

◇最小作用の原理では、任意の場所で曲線の微小部分に対する長さを定義することが出発点となる。

◇ユークリッド幾何学が成り立つ場合、微小部分の長さ $\Delta r$ は、 $x$ 、 $y$ 、 $z$  軸方向の間隔をそれぞれ $\Delta x$ 、 $\Delta y$ 、 $\Delta z$  とすると、 $(\Delta r)^2 = (\Delta x)^2 + (\Delta y)^2 + (\Delta z)^2$  というピタゴラスの定理（の三次元版）を使って与えられる。

◇特殊相対論が成り立つミンコフスキ空間では、第1章で示したように、時間の間隔 $\Delta t$  も加えて、 $(\Delta r)^2 = (\Delta x)^2 + (\Delta y)^2 + (\Delta z)^2 - (c \Delta t)^2 \dots \textcircled{4}$  という式で長さが定義される。

◇ただし、この式が使えるのは、各座標の目盛りがきちんと等間隔に割り振られているときに限られる。

座標が場所によって曲がったり伸び縮みしたりしているとなると、その影響を考慮して長さを定める方法が必要となる。

### 【138】

◇こうした問題は、19世紀ドイツの数学者フリードリッヒ・ガウスが創始した曲面論で扱われた。曲面論では二次元の曲面上で長さを定める方法が議論されていたが、物理学では、これを一次元の時間と三次元の空間から成る四次元時空に拡張しなければならない。

◇四次元時空での長さは、次の式によって与えられる。

$$\begin{aligned} (\Delta r)^2 = & g_{xx} (\Delta x)^2 + g_{yy} (\Delta y)^2 + g_{zz} (\Delta z)^2 - g_{tt} (c \Delta t)^2 \\ & + 2g_{xy} (\Delta x) (\Delta y) + 2g_{yz} (\Delta y) (\Delta z) + 2g_{zx} (\Delta z) (\Delta x) \\ & + 2g_{xt} (\Delta x) (c \Delta t) + 2g_{yt} (\Delta y) (c \Delta t) + 2g_{zt} (\Delta z) (c \Delta t) \\ & \dots \textcircled{5} \end{aligned}$$

### 【139】

◇ここに登場する10個の $g$ は、あまり厳密なことを言わなければ、次のようなものを表すと解釈してよい。

$g_{xx}$ 、 $g_{yy}$ 、 $g_{zz}$ ・・・ それぞれ、 $x$ 、 $y$ 、 $z$  軸方向への伸縮

$g_{tt}$ ・・・ 時間軸方向への伸縮（マイナスの値になる）

$g_{xy}$ 、 $g_{yz}$ 、 $g_{zx}$ ・・・ それぞれ、 $x$  軸と $y$  軸、 $y$  軸と $z$  軸、 $z$  軸と $x$  軸の間のよじれ

$g_{xt}$ 、 $g_{yt}$ 、 $g_{zt}$ ・・・ それぞれ、 $x$  軸、 $y$  軸、 $z$  軸と時間軸の間のよじれ

◇ここで、添え字（ $g$  の右下にある小さな文字）として、 $t$  とか  $x$  とか書いていたのでは面倒なので、

添え字の  $t, x, y, z$  をそれぞれ  $0, 1, 2, 3$  という数字で表し、 $g$  は添え字の入れ替えに対して対称になると規定する。

◇こうすれば、 $g_{\mu\nu}$  ( $\mu$  と  $\nu$  は  $0 \sim 3$  の数値のいずれかを表す) という一つの記号で、一次元の時間座標と三次元の空間座標を全てカバーすることができる。

◇例えば、 $\mu=0, \nu=3$  となる  $g_{03}$  は  $g_{30}$  に等しく、 $g_{zt}$  を表す。

さらに、 $ct, x, y, z$  をそれぞれ  $x^0, x^1, x^2, x^3$  と書くことにすれば、⑤式は、

$$(\Delta r)^2 = \sum_{\mu} \sum_{\nu} g_{\mu\nu} \Delta x^{\mu} \Delta x^{\nu} \quad (\Sigma \text{ は } 0 \text{ から } 3 \text{ までの和を取ることを表す}) \quad \dots \textcircled{6}$$

と略記できる (専門家は、微小要素を表すのに  $\Delta x^{\mu}$  ではなく、微分形式  $dx^{\mu}$  を用いる)。

◇時間・空間の各軸に対応する成分を持つ量は、一般に「テンソル」と呼ばれる。

$g_{\mu\nu}$  は、添え字が二つあるので、「二階のテンソル」である。

◇特殊相対論が成り立つミンコフスキ空間の場合は、 $g_{11}=g_{22}=g_{33}=1 \quad g_{00}=-1$  となる。これを⑥式に代入すれば、 $(\Delta x)$   $(\Delta y)$  のように異なる座標軸が絡む項は全て消え、 $(\Delta r)^2 = (\Delta x)^2 + (\Delta y)^2 + (\Delta z)^2 - (c \Delta t)^2$  というミンコフスキが与えた④式が再現される。

## 【140】

◇このように、10個の  $g_{\mu\nu}$  を使って四次元時空の長さを定義するというのが、一般相対論の基礎となる四次元幾何学である。

◇「構想」において一般相対論は、光速が重力だという素朴なアイデアから、かくも数学的な理論へと変貌を遂げたのだ。

◇これまで、重力の状態は、重力ポテンシャル  $\Phi$  という一つの量だけで表記してきた。

◇しかし、新しい理論では、重力を表すのに10個の  $g_{\mu\nu}$  が必要になる。

◇この  $g_{\mu\nu}$  が、一般相対論における「重力場」である。

物理量の個数がいきなり10倍になったことに対して、アインシュタインは何か言い訳が必要だと感じたらしい。

◇「構想」の中で一つのセクションを使って、

10個の物理量が必要になることを理由付けしようとしている。

◇だが、この理由付けは、物理学的に正当な議論にはなっていない。

◇四次元幾何学を採用したことで、一般相対論は、創始者をも混乱させるほど難しくなってしまった



のだ。

◇1911年にアインシュタインが考えた重力による時間の遅れは、 $g_{00}$ の中に含まれる。

◇完成した一般相対論によると、弱い重力場があるとき、 $g_{00}$ はミンコフスキ空間での値-1からわずかにずれて、 $g_{00} = -1 - 2\Phi/c^2 \dots \textcircled{7}$  となることが示される。

◇ただし、 $\Phi$ はニュートンの重力理論で与えられる重力ポテンシャルに等しい（②式と比べると $\Phi$ に係数2が付いている点異なるが、これは、 $g_{00}$ が長さ $\Delta r$ の二乗を定義する量であることに由来する）。

◇「構想」の中でアインシュタインは、⑤式（あるいは⑥式）で与えられる長さを使って最小作用の原理の式を立て、そこから新たな重力理論を構築できることを示した。

## ガウスの曲面論と相対性原理

### 【141】

◇グニャグニャの座標を使った四次元幾何学で考えると、等速度運動に限定されない一般的な相対性原理の意味が明確になる。

◇まず、ガウスの曲面論を見ることにしたい。

◇ここでガウスは、曲面の曲がり方-----いわゆる曲率をどのように定義すればよいかを論じている。自由に伸び縮みする薄いゴムで作られた方眼紙を用意して、曲面にピッタリと貼り付けることをイメージしていただきたい。

◇曲面に貼り付けるためには、方眼紙のあちらこちらを伸ばしたり縮めたりしなければならないので、方眼の形は歪むが、縦何番目・横何番目かという方眼紙の目盛りを読むことで、貼り付けられた曲面状の位置を指定することはできる。

◇つまり、この方眼紙の線が、曲面上の位置を表す座標系となる（完全な座標系であるためには、線は隙間なくびっしりと引かれていなければならない）。

### 【142】

◇曲面に貼り付けるために方眼紙を変形させているので、単に目盛りを読むだけでは、二点間の距離は求められない。

◇座標と実際の長さを結びつけるには、方眼紙の各部分がどれだけ変形しているかを調べなければな

らない。

◇縦軸・横軸の伸縮をそれぞれ  $g_{11}$  と  $g_{22}$  で、縦軸と横軸のよじれを  $g_{12}$  で表すようにすれば、こうした変形は、二階のテンソル  $g_{\mu\nu}$  を使って表現することができる（曲面という二次元の世界なので、 $\mu$  と  $\nu$  は 1 か 2 のいずれかの値を取る）。

◇曲面の上に生息する二次元人がいたとすると、彼らは、人為的に設定された座標の目盛りと、物理的な方法で行う距離測定の結果を比較することで、曲面上の全ての場所における  $g_{\mu\nu}$  を知ることができる。

◇これを使えば、⑥式と同じように、 $(\Delta r)^2 = \sum_{\mu} \sum_{\nu} g_{\mu\nu} \Delta x^{\mu} \Delta x^{\nu}$ （ $\Sigma$  は 1 から 2 までの和を取る）という形で長さが与えられる。

### 【143】

◇これだけなら、単に長さや座標を結びつけたというだけにすぎない。

◇ガウスの曲面論の最大の成果を、曲面の曲率を  $g_{\mu\nu}$  だけで表されることに驚いたガウスは、これを「驚愕の定理」と呼んだ。

◇常識的な考え方によれば、曲面がどのように曲がっているかは、曲面の外に出なければわからない。二次元の曲面ならば、三次元空間の中で眺めることで、はじめて面が曲がっていると判明する。曲面上に閉じ込められた二次元人は、自分たちが曲がった面の上に住んでいることを決して知り得ない-----と信じられていた。

◇ところが、ガウスの発見によれば、面の上で測量を行って  $g_{\mu\nu}$  を調べるだけで、自分たちの住む世界が曲がった面だと判定できるのである。

### 【144】

◇ガウスの曲面論は、曲面を考えるのに三次元空間を想定する必要がないことを明らかにした。

◇面内部の情報だけで、面がどのように曲がっているかを知ることができるのだから、わざわざ三次元空間の中に二次元の曲面を埋め込んで考えなくてもよいのである。

◇二次元の幾何学は、二次元の中で完結している。

◇この理論は、ガウスの下で学位研究を行った数学者ベルンハルト・リーマンによってさらに発展させられ、リーマン幾何学として体系化された。

### 【145】

◇この理論を四次元時空に適用してみよう。

◇四次元時空でも測量によって  $g_{\mu\nu}$  を調べれば、全ての場所で座標と長さの関係を定義できるが、それだけではない。

◇「驚愕の定理」の拡張版を使えば、時空がゆがんでいるかどうかは、 $g_{\mu\nu}$  だけで表される曲率によって判定できる。

◇四次元時空の歪みはその内部で定義されるのであり、5次元の世界を想定する必要はない。ガウスの曲面論における曲率が実際に面が曲がっていることを意味するのと同じように、 $g_{\mu\nu}$  ( $\mu$ と $\nu$ は0~3を表す) から求められる四次元時空の曲率は、現実の時空が歪んでいることを示している。

◇一般相対論とは、この歪みが重力の作用をもたらすと主張する理論なのである。

#### 【146】

◇それでは、理論を作るに当たってアインシュタインが拠り所とした相対性原理は、何を意味するのだろうか？

◇一般相対論の内容を少し先取りして説明すると、これは、伸縮自在の方眼紙を曲面に貼り付ける方法が一通りでないことに対応している。

◇いろんな部分を伸ばしたり縮めたりできるので、貼り付け方は無数にある。

◇方眼紙の貼り付け方を変えれば、縦軸・横軸方向の伸び縮みも変化するので、 $g_{\mu\nu}$  も異なった値になる。

◇しかし、曲面の曲がり方自体は変わっていないので、 $g_{\mu\nu}$  から求めた曲率の値は変わらない。

#### 【147】

◇同じように、四次元時空においても、座標系をどのように貼り付けるかによって  $g_{\mu\nu}$  の値は異なったものになるが、時空の歪み方そのものは変わらない。

◇重力の作用は時空の歪みに応じて生じるので、座標系の取り方を変えても、重力によって引き起こされる物理現象は変化しないはずである。

◇具体的に言えば、座標変換しても、物理現象を記述する基本的な方程式は不変になる（第1章でも述べたことだが、座標変換と共に物理量の定義を一定の方式で変える必要があるので、専門的には「不変」ではなく「共変」と呼ばれる）。

◇これが、相対性原理である。

### 【148】

◇特殊相対論の場合は、ミンコフスキ空間はどの方向も同じような構造をしているので、その内部で回転しても基本的な物理法則は変わらない。

◇ところが、四次元時空での回転によって時間軸を傾けると、現在という瞬間に束縛された人間にとっては、静止していたものが動き出すように感じられてしまう。

◇このため、「回転しても物理法則が変わらない」という幾何学的な原理を、人間は「運動と静止が区別できない」という相対性原理として解釈することになる。

◇四次元時空の物理現象の場合も、事情は同様である。

◇物理現象は、時空の歪みに応じて生起するのであって、座標系をどのように選ぶかには無関係である。

◇特殊相対論のようにまっすぐに伸びた座標系全体を回転させるだけではなく、グニャグニャに曲げてもかまわない。

◇どんな座標変換をしても、時空の歪みに起因する物理法則は不変（正確に言えば共変）になるというのが、一般相対論における相対性原理である。

### 【149】

◇四次元幾何学に基づいて理論を体系化したことにより、一般相対論は、ようやくその完成形が見えてきた。

◇その意味で、1913年の「構想」は正に画期的な論文だった。

◇10個の成分を持つテンソル  $g_{\mu\nu}$  を使って重力場を表せばよいと気がついたことは、一般相対論を建設する過程において、最大級の出来事である。

◇そもそも、数学の用語のみを通じて議論を進めるというやり方は、思考実験による具体的なイメージを用いる彼自身の従来の研究法とは、大いに趣を異にする。

◇それでは、アインシュタインはどうやって四次元幾何学のアイデアに到達したのだろうか？

## 知られざる功労者グロスマン

### 【150】

◇1912年7月後半にプラハからチューリッヒに戻ってきてまもなく、アインシュタインは、一般相対論における数学の問題を、大学時代からの友人であるグロスマンに相談している。

◇二人の間で何が議論されたかは、アインシュタインの側からの証言しか残っていない。

◇1922年に行われた京都講演では、次のように述べられている。

「この問題（＝加速度系にまで相対性原理を拡張する問題）は私には1912年まで解けずに残されました。

この年になって私はふとガウスの表面理論がこの神秘をひらく鍵として深い理由をもち得ることに思い当りました。

ガウスの表面座標を私はそのときほんとうに意味深いものの如くに自分に思い浮かべました。

けれども私はそれまでリーマンが幾何学の基礎をより深く論じたことを知らなかったのです。

私はひょっと学生時代に数学教師ガイサーに幾何学を教わったなかにガウスの理論のあったことを思い出し、そこにこの思想を導き出し得たのです。

そして幾何学の基礎が物理的な意味をもつべきことに考え及んだのでした。

ブラーク（＝プラハ）からチューリッヒへ私が帰って来たとき、そこに自分の親友であり数学者であるグロスマンがいました。

私はこのとき彼によってまず最初にリッチを教えられ、それから後でリーマンを聞き知りました。

そこで私はこの友人に、私の問題が果たしてリーマンの理論で解けるかどうか、即ち曲線素の不変によって自分の見出そうとする係数が完全に決定されるかどうかを相談しました」。

（石原純『アインシュタイン講演録』より）

### 【151】

◇文中に登場するリッチとは、テンソル解析の研究で知られるイタリアの数学者グレゴリオ・リッチニクルバストロである。

◇この文言からすると、アインシュタインは、ガウスの曲面論（上の邦訳では表面理論）までは自分で辿り着いたようだ。

◇ただし、具体的に数式を書き下し、テンソルによって重力を表す方法にまで到達したかどうかは読み取れない。

◇グロスマンに会ったアインシュタインは、何を相談し、何を教えられたのだろうか？

◇アインシュタインが死の三ヶ月前に書いた「自伝スケッチ」では、重力場  $g_{\mu\nu}$  が満たす方程式を求めるといふ課題を抱いてグロスマンを訪ねたことになっているが、これは明らかにおかしい。

◇ガウスの曲面論をかじった程度のアインシュタインが、いきなり  $g_{\mu\nu}$  の方程式について質問できるはずがないのである。

◇京都講演で語られているように、質問はもっと初歩的な段階から始まり、リッチやリーマンの業績について教えられた後で、 $g_{\mu\nu}$ （京都講演で謂うところの「自分の見出そうとする係数」）を求める方法に話が及んだと想像される。

### 【152】

◇アインシュタインは、おそらく1912年の半ば頃から最小作用の原理を導きの糸としてミンコフスキが与えた④式を拡張する方法を検討し始めたのだろう。

◇すでに赤方偏移などの研究を通じて重力と時間の伸び縮みが関係するとわかっていたので、 $(\Delta t)^2$  の係数に重力の効果が現れることは容易に見て取れたはずだ。

◇ここから  $(\Delta x)^2 \sim (\Delta z)^2$  にも係数を付けることに思い当たり、ガウスの曲面論へと向かった可能性が高い。

◇しかし、グロスマンと会う以前に、空間と時間のよじれを含む⑥式に到達していたか、到達していたとしても係数として現れる10個の  $g_{\mu\nu}$  が重力場と関係することまで洞察できたか、かなり疑わしい。

### 【153】

◇当時の状況を推測すると、グロスマンとの議論を繰り返す中で、重力が10個の  $g_{\mu\nu}$  全てを使ってはじめて表せることに気がつき、さらに、 $g_{\mu\nu}$  の満たす方程式を探し出すことが最大の物理学的課題だとわかってきたのではないか。

◇テンソルを用いた手法が重要であると判明した段階で本格的な共同研究を開始し、「構想」を書き上げるに至ったのだろう。

## 【154】

◇「構想」は二部構成になっている。

◇アインシュタインが担当した「物理学の部」では、重力場が1個の重力ポテンシャル $\Phi$ ではなく、10個の $g_{\mu\nu}$ によって表されることが述べられ、重力場内部での物体の運動方程式を明らかにし、 $g_{\mu\nu}$ が満たすべき方程式の形が予想されている。

◇一方、グロスマンによる「数学の部」は、当時の物理学者に馴染みのなかったテンソルの計算法に関する教科書的な解説が中心になっている。

## 【155】

◇物理学的に重要な内容が「物理学の部」に集中していることから、グロスマンはあくまで計算の手助けをただけという見方があるが、これは妥当ではない。

◇「数学の部」では、エネルギー保存の法則を一般化する方法や、 $g_{\mu\nu}$ が満たす方程式を求めるための条件について、かなり突っ込んだ議論もされている。

◇テンソルによって一般相対論を定式化するという基本的なアイデアを含めて、「構想」全体がアインシュタインとグロスマンの共同研究の成果だと見なすべきである。

◇それまで、時計や物差しを使った思考実験という素朴な手法で重力の問題を扱ってきたアインシュタインが、四次元幾何学という純粋に数学的な論法に基づいて一般相対論を構築できたのは、グロスマンの協力があってこそである。

◇ともすればアインシュタインの陰に隠れがちなグロスマンの業績について、もっと高く評価されてもよいのではないか。

## 一般相対論の完成

## 【156】

◇グロスマンとの共同研究を通じて、重力場 $g_{\mu\nu}$ を用いた四次元幾何学の中に一般相対論という山頂に到達する道が見えてきた。

◇ただし、「構想」はあくまで“構想”にすぎなかった。

◇実際に一般相対論が完成されるまでには、さらに三年の歳月が必要となる。

◇重力場内部における物体の運動に関しては「構想」で基本的な考え方が示され、1914年になって具体的な運動方程式が与えられた。

◇それによると、重力場内部で物体が運動するときの軌道は、四次元幾何学における一般化された直線（専門用語で「測地線」という）になる。

◇惑星運動で言えば、各惑星は測地線に沿ってまっすぐに進んでいるにもかかわらず、時空が歪んでいるので、楕円運動を描いてしまうのである。

### 【157】

◇物体の運動に比べて、重力場  $g_{\mu\nu}$  が満たす方程式を求めるのは遥かに難しい。

◇これは、幾何学だけではなく物理学の知識も必要となるからだ。

◇ニュートンの重力理論では、重力ポテンシャル  $\Phi$  に対して、次の方程式が成立していた。

$\nabla^2 \Phi = k \rho \quad \dots \textcircled{8}$   $\nabla$  は空間座標による微分を表す演算子で、二乗しているのので微分を二度繰り返すことを意味する。

◇  $k$  は物理定数、 $\rho$  ( $\rho$ ) は物質密度である。

すでに述べたように、重力場が十分に弱い場合は、重力ポテンシャル  $\Phi$  と重力場の  $00$  成分は⑦式で結ばれている。

◇一方、物質密度は単位体積あたりの質量だが、特殊相対論によれば、質量  $m$  の物体はエネルギー  $mc^2$  を持つことが知られているので、⑧式の右辺は、単位体積当りのエネルギー、すなわちエネルギー密度に比例する。

◇したがって、⑧式を一般相対論に拡張したものは、次のような式になることが予想される。

$\Gamma_{\mu\nu} = \kappa \Theta_{\mu\nu}$  ( $\kappa$  (カッパー) はある定数、 $\Gamma$  は (ガンマ))  $\dots \textcircled{9}$   
 $\Theta_{\mu\nu}$  は、その  $00$  成分  $\Theta_{00}$  がエネルギー密度になるように拡張されたテンソルである(専門用語で「エネルギー運動量テンソル」と呼ばれる)。

一方、 $\Gamma_{\mu\nu}$  は、重力場  $g_{\mu\nu}$  をただか二度微分して作られる量で、重力場が弱い場合には、その  $00$  成分  $\Gamma_{00}$  が⑧式の左辺に近似的に等しくなるように定められる。

◇アインシュタインとグロスマンは、わずか数ヶ月の共同研究で、重力場が満たす方程式をここまで詰めることができたのである。



### 【158】

◇ところが、ここで彼らは大きなミスを犯す。

エネルギー運動量テンソル $\Theta_{\mu\nu}$ は正しく求められたものの、上の条件を満たすテンソル $\Gamma_{\mu\nu}$ を見つけられなかったのだ。

◇失望したアインシュタインは、重力場の方程式はテンソルを使って表せないと論文の中で表明してしまった。

◇これは、重力場の方程式は、座標変換に対して不変（正確に言えば共変）にならないことを意味している。

◇つまり、肝心の重力場に関して、相対性原理が成り立たないというのだ。

これでは、一般相対論の名に値しない。

### 【159】

◇このほとんど致命的なミスの故に、「構想」は一般相対論を構築する上で一つのステップにすぎないと見なす科学史家も多い。

◇実際、アインシュタインは、正しい重力場の方程式を得るまで、三年間にわたって膨大な計算と取り組まなければならなくなった。

◇だが、このミスはあくまで数学的なものである。

◇ミスを修正する-----条件に合うテンソル $\Gamma_{\mu\nu}$ は存在しないのではなく、単に見つけられなかったただだと気がつく-----のに三年かかったとはいえ、その大部分は数学的な計算に費やされたのであり、重力をテンソルで表すという物理学的なアイデアそのものは、「構想」で完成の域に達していた。

◇一般相対論に至る最も困難な道程は「構想」によって踏破されたのであり、残るは山頂までの一本道である。

### 【160】

◇アインシュタインは、ちょっとした突破口さえ開けられれば理論が完成するという予感を抱いたのだろう。

◇異常なまでの勢いで次々に論文を書き続けた。

◇計算によって答えを探すというのは、思考実験をもとにしたイメージを最優先する彼本来の研究手法とは異なる。

◇そのせいか、間違いを犯しては、すぐ後の論文で訂正することも少なくなかった。

◇等価原理という素朴なアイデアから、前人未踏の途轍もない理論が生まれそうなのだから意地になっていたようだ。

◇この間に彼が執筆した一般相対論関連の論文のタイトルを列記しておこう。

これらの他にも、量子論や統計力学の論文が十本以上もあり、この時期が、アインシュタインの生涯において最も生産的で充実した日々だったと言える。

1913年・・・「重力理論の物理的基礎」「重力問題の現状について」

1914年・・・「絶対微分学の観点から見たノルドシュトレームの重力理論（フォッカーと共著）」  
「重力の理論について」「一般相対論と重力理論に関する原則」「一般相対論の形式的基礎」「重力理論の物理的基礎と主要なアイデア」「重力の理論」「一般相対論に基づく重力場の方程式の共変性（グロスマンと共著）」

1915年・・・「一般相対論の基本的アイデアと天文学への応用」「一般相対論について」「水星の近日点移動についての一般相対論による説明」「重力場の方程式」

### 【161】

◇諸論文のタイトルを見るだけでも、（水星の近日点移動に関するものを別にして）基礎方程式の探求を続けていたことがわかる。

◇このリストの最後の論文で、ようやく重力場  $g_{\mu\nu}$  を求める方程式が見いだされた。その形式は⑨式と同じ形をしている。

◇  $\Gamma_{\mu\nu}$  としては、リーマンやリッチといった数学者がすでに求めていたテンソルを組み合わせで作ったものが採用された。

◇論文を書き上げた数日後、親友のベッソーに「問題はついに解決しました」と書き送った（11月30日付書簡）。

◇ここに、理論物理学の白眉とされる一般相対論が完成した。

◇その内容は、翌1916年に発表された50ページを越える大論文「一般相対論の基礎」において、包括的に紹介される。

## 栄光と若干の悩みの種

### 【162】

◇こうして、1915年末に一般相対論は完成したが、すぐに各国の学界で受け容れられたわけではなかった。

◇相対性原理に基づく重力の定式化に疑いの目を向ける者が少なくなかったことに加えて、折しも第一次世界大戦のまただ中であり、学术交流が充分に行われていなかったためである。

◇だが、オランダの天文学者ウィレム・ド・ジッターがこの理論に関心を抱き、アインシュタインの論文の写しをイギリスの物理学者アーサー・エディントンに送ったことから、事態が動き始める。特に、エディントンの果たした役割は大きい。

◇彼が王立天文学会に一般相対論の重要性を訴える報告書を提出したことで、イギリスを中心に物理学者の関心がしだいに高まっていく。

### 【163】

◇一般相対論から導かれる命題の中で、実験・観測と比較できるほとんど唯一のものは、天体による光線の屈折である。

◇太陽の縁を通る光線の屈折角は、1911年の論文で0.83秒と求められていた。

◇だが、この値は重力場の00成分 $g_{00}$ の影響しか評価しておらず、正しくなかった。

◇しかも、光が質量を持つ粒子だと仮定してニュートンの理論を適用しても、同じ角度（19世紀に行われた計算では0.84秒）で曲がってしまう。

◇アインシュタインは、1915年になって重力場のすべての成分を考慮した計算を行い、改めて屈折角を1.75秒と求めた。

◇第一次世界大戦終結後、エディントンの肝いりで、この光の屈折を観測しようとする動きが本格化する。

◇1919年の皆既日食の際、イギリスから二つのグループが光の屈折を観測するために派遣された。赤道ギニア海岸沖のプリンシペ島を訪れたエディントンをリーダーとする観測隊を迎えたのは、空一面を覆う黒雲だった。

◇だが、果敢に写真撮影を行い、帰国後にデータを詳しく解析したところ、月の影に覆われた太陽の周辺に数個の天体が写っているのが見つかった。

◇これらは、別の機会に撮影した写真に比べて、いずれも太陽から遠ざかる方に移動しており、屈折角は $1.61 \pm 0.30$ 秒と求められた。

◇一方、ブラジルのソブラルに派遣された観測隊も、1.98秒というデータを得た（誤差の見積もりには諸説ある）。

◇屈折しないというマクスウェルの理論でも、屈折角が0.84秒になるというニュートンの理論でもなく、アインシュタインの理論が正しかったのである。

#### 【164】

◇このニュースは一般のマスコミにも取り上げられ、世界を駆けめぐった。

◇11月6日に開かれたイギリス王立協会と王立天文学会の集会で、アインシュタインが重力に関して、ニュートン以来の業績を挙げたことが認められた。

◇それまで、少し変わった方法論で新しいアイデアを次々と提案した異色の研究者という位置付けだったアインシュタインが、このときはじめて、史上最高の物理学者の一人となったのである。

#### 【165】

◇一般相対論は、他のアインシュタインの業績に比べて、いろいろな点で異なっている。

◇これ以前の論文では、あまり難しい数式は使われていない。

◇アインシュタイン自身、高等数学の計算はそれほど得意でなかったことが窺える。

◇難しい計算を行うよりも前に、本質を浮かび上がらせるような思考実験を行って結果を先取りしてしまうのだ。

◇計算は、結論の確認と細部の詰めに使われる程度だった。

◇ところが、一般相対論は、研究者泣かせと言えるほど数式が難しい。

◇物理的なイメージだけでは話を進められず、計算を遂行してはじめて何が起きるかが判明することも少なくない。

#### 【166】

◇物理学の理論的な研究において数式の扱いが主要部分を占めるようになる傾向は、すでにマクスウェルの電磁気学やボルツマンの統計力学の頃から現れていたが、アインシュタインの一般相対論によって、決定的なものになった。

◇こうした方法論の変革が、イメージ優先の思考実験を得意とするアインシュタインによってもたら

されたとは、何とも皮肉なことである。

◇数式を使わなければ一般相対論から有用な命題を導けない-----このことは、アインシュタインにとっても厄介の種となった。

◇自分が作り上げた最も輝かしい理論が、自分にも理解しにくいものになってしまったのである。

### 【167】

◇アインシュタインは、1915年末に重力場の方程式を見いだして以降も、優れた研究を続けている。

◇1916年には、エネルギー保存則の厳密な証明や、重力の変動が波として伝搬する可能性について論文を発表した。

◇1917年には、重力場の方程式を少し修正した上で、果てや中心のない宇宙モデルを提案している。

◇しかし、同じ時期に、彼はしばしば一般相対論をめぐる誤った発言をしており、創始者本人にも理論の全貌が把握しきれていないことを示した。

### 【168】

◇アインシュタインが犯した誤りの一つが、物質と時空の関係に関する誤解である。

◇一般相対論を構築していた時期に、彼は、物質が時空を生み出すというイメージを抱いていた。

◇このイメージに従えば、重力場  $g_{\mu\nu}$  の振舞いは物質に従属する形で完全に決定され、物質が存在しなければ、物理的に意味のある時空は生じないことになる。

◇しかし、実際には、物質の分布を与えただけでは重力場の方程式は解けない。

◇物質から十分に遠ざかった地点でどのようになるかを決めておかなければならないのだ。

◇さらに、修正された重力場の方程式を用いると、物質が存在しないにもかかわらずダイナミックに変動する時空の解が存在することが、1917年にド・ジッターによって示された。

◇現在では、このド・ジッター解が、宇宙が誕生した初期の状態を表すと考えられている。物質は、宇宙が冷えて状態変化を起こした後に生じたという見方が有力だ。

◇とすれば、アインシュタインのイメージとは逆に、物質は時空に従属していると考えた方がよさそ

うだ。

### 【169】

◇このほかにも、アインシュタインの直観が狂った例はいくつもある。

◇1922年、ソビエトの物理学者アレクサンドル・フリードマンは、膨張・収縮を示す宇宙モデルを提案した。

◇ところが、1917年に提案した自分の宇宙モデルと矛盾すると錯覚したのか、アインシュタインは、直ちに計算に誤りがあるとするコメントを発表した。

◇その後、フリードマンから計算過程をていねいに説明した書簡が届けられ、自分のミスを認めるに至ったものの、フリードマンの理論が学界から黙殺されるきっかけを作った。

### 【170】

◇特に興味深いのは、アインシュタインがブラックホールの存在を否定したことである。

◇宇宙にブラックホールと呼ばれる光すら逃げ出せない天体があり、巨大な重力であらゆる物質を飲み込んでいることは、今では、物理学にさして関心のない人も知っているだろう。

◇ところが、アインシュタインは、1939年にブラックホールが存在できないという“証明”を提出していたのである。

## ブラックホールの不在証明

### 【171】

◇質量を持つ物体が高度に圧縮されたとき、周囲の時空の歪みが奇妙なものになることは、1916年にドイツの天文学者カール・シュヴァルツシルトが見いだした。

◇彼は、早い段階から一般相対論に注目していた一人で、大きさが無視できるほど小さい天体の周囲にどのような重力場が生じるかを厳密に計算した。

◇シュヴァルツシルトが求めた結果によると、中心から質量によって決まる距離だけ離れた球面状では、時間の伸縮を表す重力場の00成分  $g_{00}$  が0になっている。

◇つまり、時間が止まってしまうのだ。

◇時間が流れなければ、光も進まなくなるはずである。

### 【172】

◇もっとも、シュヴァルツシルト自身は計算結果の解釈を誤って、このような奇怪な球面が存在することに気づかず、自分の解は、中心以外では滑らかに変化する重力場を表すと考えていた。

◇論文を送られたアインシュタインも、「厳密な解がこれほど簡単な形に表されるとは思っていませんでした」と返信している（1月9日付書簡）。

◇ところが、引き続き天体内部で重力場がどのように振舞うかを計算していたシュヴァルツシルトは、天体の直径がある値より小さくなると、中心部の圧力が無限大になるという不可解な現象が現れることに気がついた。

◇彼は、アインシュタインに、こうした現象がどうして生じるのか尋ねる手紙を送っている（2月6日付書簡）。

◇アインシュタインは、二週間ほど経って、多忙のため質問に回答できないことを詫びる手紙を出したが、これが、二人の最後の交流となった。

シュヴァルツシルトは、その三ヶ月後に42歳の若さで病死する。

### 【173】

◇シュヴァルツシルトが見いだした球面が具体的に何を意味するかはしばらくわからなかったが、その後の研究で、この球面を境にして時空構造が大きく変化しており、これより内側では、光は中心に近づく方向にしか進めなくなることが判明した。

◇光だけでなく、あらゆる物質が、一方通行の道のように、内向きにしか運動できないのである。これがいわゆるブラックホールであり、全ての物質を飲み込む宇宙の墓場である。

◇時空構造が変化する局面はシュヴァルツシルト面、その半径はシュヴァルツシルト半径と呼ばれている。

### 【174】

◇現在でこそブラックホールは宇宙物理学の花形だが、アインシュタインは、重力場の値が異常になるような球面の存在を快く思わなかった。

◇彼のイメージでは、時空の歪みは連続的に少しずつ生じるものであって、こうした特異性が現れるとは信じられなかったからである。

◇そして、老境にさしかかった1939年、この特異性が現実には生じないことを証明する論文を発表した。

◇証明の要旨は、次のようなものである。

◇きわめて小さい天体に別の物体が引き寄せられる過程を、一般相対論を用いて考察する。

このとき、引き寄せられる物体は、一般に角運動量（回転の勢いを表す量）を持つために、近づくにつれて回転速度が増すことになり、そのせいで、どこまでも天体に近づくことはできない。

アインシュタインは、運動方程式を解くことにより、シュヴァルツシルト半径の二倍弱までしか近づけないと主張した。

◇多数の小物体が集まって重力を及ぼしあっているケースでも、物体同士は十分に近づけず、シュヴァルツシルト面がむき出しになるほど重くて小さい天体が形成されることはない-----というのが、彼の結論である。

### 【175】

◇この論文が執筆される六年前には、英領インド出身のスブラマニアン・チャンドラセカールやソビエトのレフ・ランダウが、きわめて質量の大きい天体は核融合の燃料を使い果たすと安定でいられなくなることを一般相対論を使わない議論で示しており、そのままどこまでもつぶれていく可能性も検討されていた。

◇アインシュタインの“証明”は、そうした過程でもブラックホールが形成されないことを含意している。

### 【176】

◇ところが、この“証明”は全くの間違いだった。

◇論文の前半で行った角運動量を評価する方法にミスがあり、これが最後まで尾を引いて、結局、全ての議論が誤ったものになっていた。

◇アインシュタインは、どうやら、シュヴァルツシルト面は現実には存在できないはずだというイメージを先に抱き、それに合わせるように計算を行ったようである。

### 【177】

◇アインシュタインがこの論文を執筆した二ヶ月後に、アメリカの理論物理学者 J・ロバート・オッペンハイマーが、学生 H・スナイダーと協力して、ブラックホールが形成される過程を計算した。

◇彼らは、一般相対論の方程式を直接解くことにより、きわめて質量の大きい天体がどこまでもつぶれていくことを示したのである。

◇つぶれた天体の周囲にシュヴァルツシルト面が形成され、その内側に落ち込んだものは、光と言え



ども外に飛び出せない。

【178】

◇アインシュタインは、具体的なイメージに基づいて物理の本質を見いだすことに関して、抜群の能力を持っていた。

しかし、その彼ですら、自分の作り出した一般相対論の深淵に飲み込まれてしまったのである。それは、現代物理学が持つどうしようもない難解さを予感させる出来事であった。

---

