光で見る

あなたは今、このポスターを、光を通じて見ています。その光について探求していくと、驚くべき宇宙のルールや、ミクロの世界が見えてきます。光とはなにか？その不思議を、読み解く旅に出かけましょう。

光とは

私たちが目で受け取る、明るさや色の源が光です。光は「電磁波」と呼ばれる波の一種で、目で感じ取ることができるものは、特に「可視光線」と呼ばれます。電磁波には、電波や赤外線、X線など、私たちに馴染み深いものも多数あります（図1）。

電磁波の種類は、波の長さ（波長）、あるいは波の数（周波数）によって決まります（波長と周波数は、反比例の関係になっています）。可視光線を含む電磁波の全体は、図でわかるように、目に見えない広大な領域にまで及んでいます。

色の仕組み

ここで、可視光線について見てみましょう。この世界がさまざまな色に溢れているのは、人間の目の仕組みによるもの。あなたの網膜には「錐体（すいたい：色のセンサー）」と「桿体（かんたい：明暗のセンサー）」の2種類の細胞があり、その中の視物質が光を受け取ることで、目に見えるすべての色が明暗が生まれるのです（図2、3）。違った目の仕組みを持つ生物には、違った色の世界が見えていると考えられます。

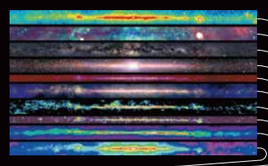


図4 さまざまな波長の電磁波で見た天の川

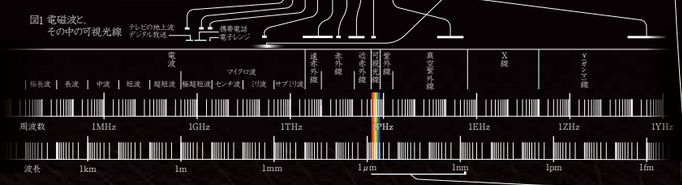


図1 電磁波と、その中の可視光線

情報を受け取る

可視光線以外の電磁波も、私たちに有益な情報を与えてくれます。例えば、レントゲン撮影に用いられるX線は、肉眼では捉えられない人体内部の様子を映し出します。また天体の観測は、さまざまな波長の電磁波を捉えることで行われています（図4）。

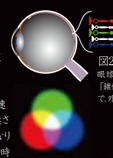


図2 人間の網膜
眼球後部の内壁に並ぶ「錐体」「桿体」の視細胞で、外界の光を捉えます。

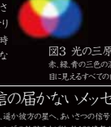


図3 光の三原色
赤、緑、青の三色の混合によって、目に見えるすべての色がつくり出されます。

「遠くを見る」＝「昔を見る」

光の速さは、秒速299,792,458メートル。1秒間に地球を7周半するほどの速さです。しかしその速さは、あくまで有限。そのため遠くからの光は、届くまでに時間がかかることになります。例えば640光年さきにあるオリオン座のベテルギウスの光は、640年の時間をかけて届きます。私たちが受け取るのは「640年前にその天体を出た」光なのです（ベテルギウスは、今はもうないかもしれません）。

宇宙最古の光の痕跡

私たちに観測できる、最古の光の名残りが「宇宙マイクロ波背景放射」（図5）。約138億年前、宇宙の始まりからわずか約38万年後に、「宇宙の晴れ上がり」と呼ばれる現象によって放たれた光です。私たちが観測するのは、宇宙の膨張にともなってこの光の波長が伸び、現在は電波となった「光の痕跡」。こうした過去からのシグナルは、宇宙の歴史について多くのことを教えてくれます。

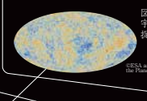


図5 宇宙マイクロ波背景放射を捉えた画像
ESA and the Planck Collaboration

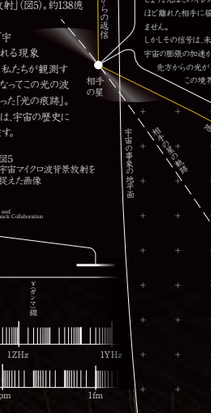
決して返信の届かないメッセージ

地球の私たちから、遠かかなたの星へ、あいさつの伝言を光で届けてみましょう。光はこのオレンジの軌跡をたどり、約120億年後に、180億光年ほど離れた相手に届きます。相手の星は、返信を送ってくれるかもしれません。

しかしその伝言は、未来永劫、地球の存在する地点には届きません。宇宙の膨張の加速が大きすぎて、光が追いつけないためです。

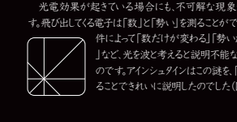
先方からの光が、いずれは届く場所に、決して届かない場所。

この境界が「宇宙の事象の地平面」です。もっともし伝言が相手の星に届く頃には、私たちの太陽はすでに寿命を終えていることでしょう。



光図の読み方

光は、この宇宙でいったどのように、まれ、どんな経路で私たちの目に届いているのでしょうか。遠いいえ！まず、私たちの目は、宇宙の「いつ」どの部分を見ることができるのか、それを表したものが「このグラフです。縦軸は、ビッグバンからの年数。現在を経て、未来へと伸びる時間軸。横軸は、光源を中心とした空間軸です。中央のドーム状の表面が、今現在、私たちに見える宇宙を表しています。ポスター各所に散りばめられた文章も参考に、光の仕組みや秘密を、さまざまな角度から味わってみてください。



この「光図」は、一般相対性理論寄から導かれる宇宙モデル（フリードマン方程式）に基づいた計算結果より描画されたものです。

光と深淵 ―「宇宙の事象の地平面」

光を使えば、どこまでと時分が見えるのでしょうつそれは不可能です。「宇宙の事象の地平面」より外側の光は、地球の存在する地点には決して届きません。この外側より内側のみが、人間が光によって関れる限界です。宇宙に果てはありませんが、観測できる時空には、果てがあるのです。

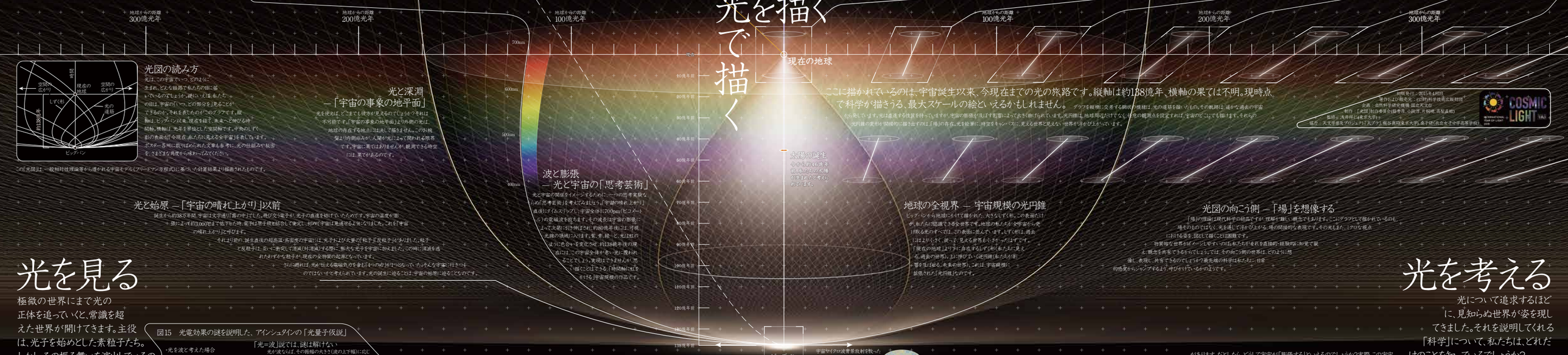
光と始原 ―「宇宙の晴れ上がり」以前

誕生から約38万年間、宇宙は文字通り「霧の中」でした。飛び交う電子が、光子の直進を妨げていたためです。宇宙の温度が1万度によって約3,000度まで低下した時、電子は陽子と結合して電荷を失い、ガスとなりました。これを「宇宙の晴れ上がり」と呼びます。

それより前の、誕生直後の超高温・高密度の宇宙には、光子よりも大量の「粒子と反粒子」がありました。粒子と反粒子は、互いに衝突して消滅（対消滅）する際に、膨大な電子を宇宙に加えました。この時に消滅を逃れたわずかな粒子が、現在の全物質の起源となっています。

SNS に溢れる、光が「伝える電磁気力」を通じて「ものの」を「つなぐ」ものだったらどうなっていたか？そんな宇宙に行きつくのではないかと考えられています。光の誕生に迫ることは、宇宙の始原に迫ることです。

光を描く



ここに描かれているのは、宇宙誕生以来、今現在までの光の旅路です。縦軸は約138億年、横軸の果ては不明。現時点で科学が描きうる、最大スケールの絵といえるかもしれません。

グラフを縦横に交差する網状の軌跡は、光の通路を描いたもの。その軌跡は、遠かな過去の宇宙から発しています。光は進進そう性質を持っていますが、宇宙の膨張が及ぼす影響によって歪められています。光図は、光の速度は、観測する人と、観測される光だけの関係を示すものとなります。

光の図の向こう側 ―「場」を想像する

「場」の理論は現代科学の結晶ですが、理解が難しい概念でもあります。ここにグラフとして描かれているのは、場そのものではなく、光を通して浮かび上がる、場の関係的な表現です。その光は、ミクロな視点における姿を、図にして描くことは困難です。

物質優先の世界のイメージしやすいのは、私たちが、それを直接的・経験的に知覚で観る、概念を共有できるからでしょう。では、その向こう側の世界は、どのように想像し、表現し、共有できるのでしょうか？最先端の科学は私たちに、日常的感覚からジャンプするよう、呼びかけているかのようです。

初版発行：2015年4月吉日
著作および権利者：公開利用可能国際広報財団
企画：宇宙科学研究機構（国立天文台）
制作：「光図」制作委員会（藤巻浩、小澤淳子、杉崎恵、高梨直樹）
監修：大阪府立高等学校物理教諭 高梨直樹
協力：天文学普及プロジェクト「スプラ」（桜井真理奈氏大学）、桑子研（兵庫県立天文学高等学校）

COSMIC LIGHT Ver.1

光を見る

極微の世界にまで光の正体を追っていくと、常識を超えた世界が開けてきます。主役は、光子を始めとした素粒子たち。しかし、その振る舞いを演出しているのは「場」という"性質"です。

光は波か？―ヤングの実験

一本のスリットを用意して、光源とスクリーンとの間に立ててみよう。スリットを通り抜けた光は、「回折」という現象を起こしながらスクリーン上に広がります（図12）。今度は、平行な2つのスリットを通しますと、スクリーンには「干渉縞」と呼ばれる模様ができます（図13）。それぞれのスリットから出た波どうしが干渉すると、波の山どうしは「より高い山」を、波の谷どうしはより低い谷をつくり、波の山と波の谷は打ち消し合のです。19世紀初頭、光にこの性質があることを証明したトーマス・ヤングの実験によって、「光は波である」と考えられるようになりました（図14）。

図12

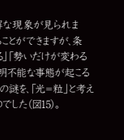


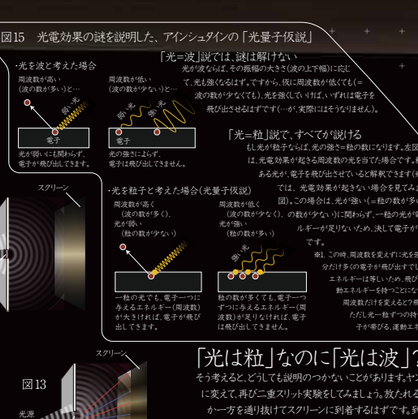
図13

光は粒子か？―光量子仮説

この「光＝波」説を覆したのが、アインシュタインの「光量子仮説」でした。物質に光を当てると、電子が表面から飛び出してきます。これを光電効果と呼びますが、光がある周波数（＝波の数）以下の場合には、なぜかこの現象は起こりません。周波数を変えずにその光をいくら強くしても、電子は飛び出してこないのです。

光電効果が起きている場合にも、不可解な現象が見られます。飛び出してくる電子は「数」と「勢い」を測ることができますが、条件によって「数だけが変わる」「勢いだけが変わる」など、光を波と考えると説明不能な事態が起こるのです。アインシュタインはこの謎を、「光＝粒」と考えることでそれいに説明したのでした（図15）。

図15 光電効果の謎を説明した、アインシュタインの「光量子仮説」



「光は粒」なのに「光は波」？

では、光は粒子なのでしょうか？そう考えると、どうしても説明のつかないことがあります。ヤングの実験（図13）の「光」を「一粒の光」に変えて、再び二重スリット実験をしてみましょう。放たれる光は一粒ですから、2つのスリットのどちらか一方を通り抜けてスクリーンに到着するはずです。到着を確認した後で、次の光の粒を放ちます。こうすれば、光の粒は干渉を起こしませんから、「縞ができない」はずです（図16）。ところがこの実験を繰り返すと、独立に放たれたはずの光が、干渉縞をつくってしまうのです（図17）。

これは一体、どういうことなのでしょうか？科学者たちは、「光は、空間的な広がりを持たない「粒」と、空間的な広がりを持つ「波」の性質を、併せ持っている」と考えました。あまりに常識外な結論に思えますが、そう考えなければ、これらの実験結果を説明できません。ミクロの世界では、「粒か波か、どちらかに決まっている」という私たちの常識を、覆すような事態が起こっているようです。

図14 波の性質

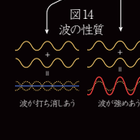


図16

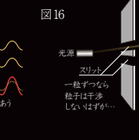
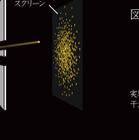


図17



光の正体

光とは、素粒子の一種です。物質を細かく分解していくと、分子は原子に、原子は原子核と電子に、原子核は陽子と中性子に分解され、最後にはそれ以上分解できない素粒子という存在に行きつきます。電子やクォークは、素粒子の一種です。

素粒子にはさまざまな種類があり、この世のありとあらゆる物質の元となっています。また、この世界に存在するすべての力（「重力」「電磁力」「弱い力」「強い力」）も、素粒子が伝えています（図18）。光の正体は、その中で「電磁力」を伝える素粒子で、「光子」と呼ばれます。

図18 この世界に存在する「4つの力」の例

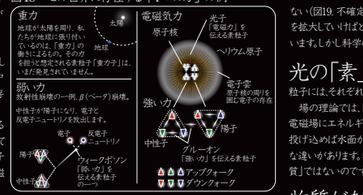
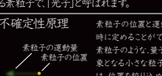


図19 不確定性原理



素粒子の位置と運動量は、同時に定めることができません。素粒子のような、量子力学の対象となる小さな粒子の世界では、位置を絞り込めば運動量があいまいになり、運動量を絞り込めば位置があいまいになる、そんな性質があるからです。

図20 真空のゆらぎ

全くなにもない真空では、なにも起こらないと考えられてきましたが、量子力学的な視点で見ると、真空では素粒子と反粒子が対で生まれては消えを繰り返し起こっていると考えられています。この現象は、後述する「場」という存在の証でもあります。

図21 素粒子は区別がない

この問いに意味がないのは、素粒子の世界では、素粒子どうしには区別がないのです。

素粒子とは、言葉から連想されるようなさらさらボール状のものではなく、実に奇妙な振る舞いをします。例えば、位置と運動量を、同時に正確には決められない（図19、不確定性原理）。なにもないところからでも生まれてくる（図20、真空のゆらぎ）。果ては、お互いの区別がつかない（図21）など。私たちの世界を拡大していけばどこにでも、このように不可思議なミクロの世界が広がっているのです。世界のありようを認識することで、私たちの常識は形成されています。しかし、科学の目をひたすら研ぎすましていったとき、その常識は大きく揺らがされます。

光の「素」と、光の「場」

素粒子を理解するためには「場（ば）」という概念が必要になってきます。さまざまな素粒子にはそれぞれに対応した「場」が存在しています。光の場である「電磁場」を例に、イメージを思い描いてみましょう。

場の理論では、「光子＝電磁場の興奮した状態」と考えます。まず場があり、次いで素粒子があるという順番で考えるわけです。電磁場にエネルギーが与えられると、その強さに応じて、場が興奮状態（励起状態）になります。鏡のように静かな水面でも、石を投げ込めば水面が波立つでしょう。この水面を波動に、波を光に例えることができます。ただし水面と電磁場には、決定的な違いがあります。水面の場合、波を伝える水は「物質」です。しかし電磁場は、波を伝えるという「性質」は備えていても、「物質」ではないのです。図を使って、見ていきましょう。

物質がないのに、性質がある？

川の流れの上を、波が伝わっていくとします。このとき波の速度は、静止した水の上を伝わる「波自身の速度」と「川の流れの速度」を足したものになります（図22）。しかし電磁場や、他のすべての場）においては、勝手が違います。場は物質ではないため、そもそも「速度」という概念を持ちません。「場が動かない」のではなく、「動くという概念自体が、場には当てはまらない」のです（図23）。結果として、光子は電磁場に対する速度を持たず（光子と電磁場の間に「速度」という関係は成立せず）、光子はそばいろる観測者に対して、常に一定の速度で動くことになります（すなわち「光速度不変の法則」）です。

電磁場、重力場、ヒッグス場…この宇宙には、さまざまな場が存在します。これらの場は、いずれも物質的存在ではありません。しかしなにもない」というわけではなく「物理的な性質」があります。性質という言葉は、日常的にはなんらかの物にともなって使われます。この常識に反して、場とは「物のない状態」「性質だけの存在」なのです。

見えない「場」を描き出す

「光で考える」の章で見たように、地球を基点にすると、遠く離れた場所の光円錐は変形します。これを、場の観点から考えてみましょう。

光は、電磁場を伝わる波です。そして光は、電磁場のみならず、重力場と呼ばれる場にも関わっています。重力場とは、その名の通り、重力を伝える場のこと。私たちが地球に張り付いているのも、重力場の影響です。光円錐は、この重力場の影響を受けて歪んでいるのです。このポスターに描かれた数々の光円錐から、時空がいかに歪んでいるのか、宇宙がどのように影響しているかを、見て取ることができます。

ただしこの時、図23で見たように、「場には目印を置くことができない」ことに注意する必要があります。だとしたら、どうして宇宙が「膨張する」といえるのでしょうか？実際、この宇宙を満たし、膨張している「物質」があるわけではありません。銀河や星を互いに遠ざけているのは、場という「物理的な性質」なのです。目に見えず、目印も置けない、この宇宙の性質。光の進路を描いた光円錐の歪みは、それを間接的に私たちに教えてくれています。

光を見るのは、科学の目

光は、私たちが世界を知るための手段。この宇宙で最速の存在にして、時空のモノサシ。その正体を探っていくと、日常感覚の拡張では理解しがたい、世界の成り立ちや振る舞いが姿を現しました。こうした世界の秘密を、現代の科学は、私たちにのぞいま見せてくれます。

科学は「とりあえずの正解」

科学の発展が、それ以前の科学的主張を書き換えることがあります。その時、新しい科学から見れば、古い科学が「誤」とかには、世界は存在していなかったことになります。

例えば、かつての科学において「光を伝える性質」を担っていたエーテルという概念は、相対性理論によって存在を否定されました。光は「波か、粒子か」ではなく、まったく新しい性質を持つことを、現代の科学は明らかにしました。科学は常に現在進行形であり、「だいたい正しい」より正しさを世界の仕組みを提示してはそれまでの世界観を改訂していくのです。

見えないものは、実在するといえるだろうか？

科学の最前線においては、しばしばしばその時代の技術では直接観測できない事柄を仮説が前提にして、理論が展開されます。そこで素朴な疑問が生まれてきます。このポスターで見てきたような不可思議な光の世界は、果たして、理論が説明する通りに実在しているのでしょうか？そもそも私たちは、それを確認するすべを持っているのでしょうか？

科学の見方、文化の見方

このように、科学自体を考察の対象とするのが科学哲学です。「科学は発達するにつれて実在の世界に迫っていく」と考える立場がある一方で、「科学が世界の真の姿をとらえているかどうかを問うことはできない、もしくは科学にとってそれは重要ではない」と考える立場もあります。科学が人間の営みである以上、科学と世界の関わりについては、さまざまな考え方が存在するのです。

光を考える上では、文化史的な側面も見過ごせません。例えば私たちは、「明るい」「暗い」というシンプルな言葉にさえ、即物的な意味を超えたイメージを抱きます。光について、その実際の体感と、言語やイメージの連関とが、私たちの世界を、複雑で豊かなものにしているのです。

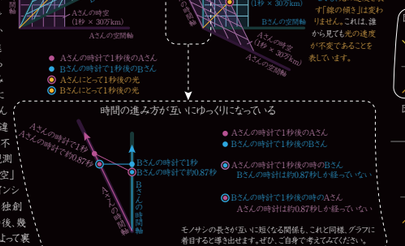
光、世界、そしてあなた

「光で見る」ことは、私たちが世界を知り、世界とつながる出発点でした。そして私たちは「光を考える」ことで、世界を認識する主体である、私たち自身へと帰ってくることになります。光をめぐる4つの視点を、縦横に行き来すること。それが、広く深い この世界を把握し、私たち自身について考えるための手がかりとなるのです。

光を考える

光について追求するほどに、見知らぬ世界が姿を現してきました。それを説明してくれる「科学」について、私たちはどれだけのことを知っているでしょうか？

互いに歪む時間と空間



A さんは、もしも、秒速約30万kmの光を、その半分の速度で追いかけたら。光は、秒速約15万kmに見えるのではりところが光は、相変わらず秒速約30万kmです。その秘密は？ようこそ、相対性理論の世界へ。

光速度不変の法則

ここに、2人の観測者がいます。A さんがレーザーで宿を指すと、放たれた光は秒速約30万kmで進んでいきます。さて、光速の半分のスピードで光と同方向に進む B さん が、その光の速さを測ると―？私たちの日常的な感覚に従えば、秒速約15万kmのはず（図6）。ところが B さんが測っても、光は依然として秒速約30万kmです。光の速さは、観測者によらず不変なのです（ただしこの時、観測者は一定の速度で直線運動をしているものとします）。これを「光速度不変の法則」といいます。

図6

特殊相対性理論で考える

この不思議な現象を、アインシュタインの「特殊相対性理論」を使って考えてみましょう。この理論によれば、それぞれの観測者は、光の速さが不変になるような、異なる「時間」と「空間」のモノサシを持つことれます（時間と空間は相対って変化するため、「時空」という1つの概念で考えます）。さて、常識的には、時間や空間は、人によって違ったりはしませんが…？具体的に、図で見てみましょう。

光円錐は、光のモノサシ

日常生活を送る限りでは「時間や空間は共通」と考えて差し支えありません。しかし光速に近い観測者を考えると、時空の歪みが無視できなくなってきます。そのため、不変の光をモノサシにしてグラフを描く必要がでてきます。これが、左に紹介した「光円錐」。ご覧のようにこのポスターは、光円錐をグリッドにして描かれています。私たちと、光と、この宇宙との関係が、一つの大きなグラフになっているのです。

光円錐さえ歪める、宇宙の膨張

どの観測者にとっても、光の速さは不変。これだけでも驚きですが、この宇宙には「光の速さが、光速を超える」ように思われる現象も存在します。言葉の矛盾のようですが、一体どういうことでしょうか？

私たちの宇宙は、誕生以来、膨張し続けています。より遠くの宇宙空間は、より速く地球から遠ざかります（図8）。ポスターでは、この膨張は、光円錐のかたちの変化として描き出されています。2つの光円錐を抜き出して、少し詳しく見てみましょう。

図9の左側は、現在の地球がある空間に描いた光円錐。右側は、地球より約150億光年彼方の天体を中心とした光円錐です。右側の光円錐は大きく歪んでみえますが、この天体が存在する空間を基点に光円錐を描けば、歪みはなくなります。そして逆に、地球の光円錐が歪んでみえます（図10）。

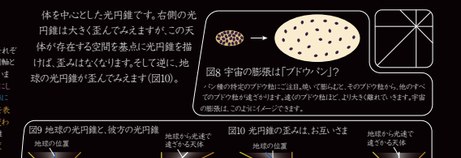


図8 宇宙の膨張は「プドウ・パン」？
パン種の特定のプドウ粒に注目。焼いて膨らむと、そのプドウ粒から、他のすべてのプドウ粒が遠ざかります。遠くのプドウ粒ほど、より大きく離れていきます。宇宙の膨張は、このようにイメージできます。

図9 地球の光円錐と、彼方の光円錐

図10 光円錐の歪みは、お互いさま

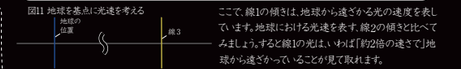


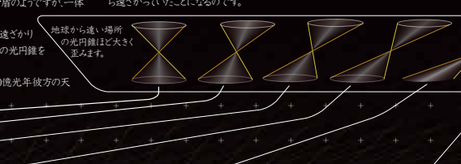
図11 地球を基点に光速を考える

ここで、線1の傾きは、地球から遠ざかる光の速度を表しています。地球における光速を表す、線2の傾きと比べてみましょう。すると線1の光は、いわば「約2倍の速さで」地球から遠ざかっていることが見て取れます。

線3の傾きは、地球に向かって（左方向に）進んでいる光の速度を表しています。しかし、宇宙の膨張によって光円錐が歪んでいるため、傾きが垂直になっています。すなわち、光は近づきも遠ざかりもせず、地球を基点としたときの速度は0となっていることが見て取れます。線1も、線3も、「その空間において」はあくまで光速であることに注意してください。特殊相対性理論は、破られていないのです。

特殊相対性理論から、一般相対性理論へ

特殊相対性理論においては、不変のモノサシだった光円錐。しかし、このポスターのように宇宙を俯瞰して描くと、そのモノサシさえもが変化することがわかります。このような現象は、やはりアインシュタインが築いた「一般相対性理論」によって説明されています。私たちが観測によって関与できる存在のうち、もっとも遠くにあるのは「宇宙マイクロ波背景放射」（図5）が放たれた地点にある物質ですが、その物質は、光速の約60倍もの速度で、本ポスターの中心軸から遠ざかっていることになるのです。



光の向こう側 ―「場」を想像する

「場」の理論は現代科学の結晶ですが、理解が難しい概念でもあります。ここにグラフとして描かれているのは、場そのものではなく、光を通して浮かび上がる、場の関係的な表現です。その光は、ミクロな視点における姿を、図にして描くことは困難です。

物質優先の世界のイメージしやすいのは、私たちが、それを直接的・経験的に知覚で観る、概念を共有できるからでしょう。では、その向こう側の世界は、どのように想像し、表現し、共有できるのでしょうか？最先端の科学は私たちに、日常的感覚からジャンプするよう、呼びかけているかのようです。

光図の読み方

光は、この宇宙でいったどのように、まれ、どんな経路で私たちの目に届いているのでしょうか。遠いいえ！まず、私たちの目は、宇宙の「いつ」どの部分を見ることができるのか、それを表したものが「このグラフです。縦軸は、ビッグバンからの年数。現在を経て、未来へと伸びる時間軸。横軸は、光源を中心とした空間軸です。中央のドーム状の表面が、今現在、私たちに見える宇宙を表しています。ポスター各所に散りばめられた文章も参考に、光の仕組みや秘密を、さまざまな角度から味わってみてください。

この「光図」は、一般相対性理論寄から導かれる宇宙モデル（フリードマン方程式）に基づいた計算結果より描画されたものです。