



窮理の部屋 133

宇宙の膨張

3月に原始宇宙の証拠の発見について、「原始重力波：宇宙誕生時の痕跡観測」などと様々なところで報じられ、大きな話題になりました。原始宇宙とは、約138億年前に誕生した直

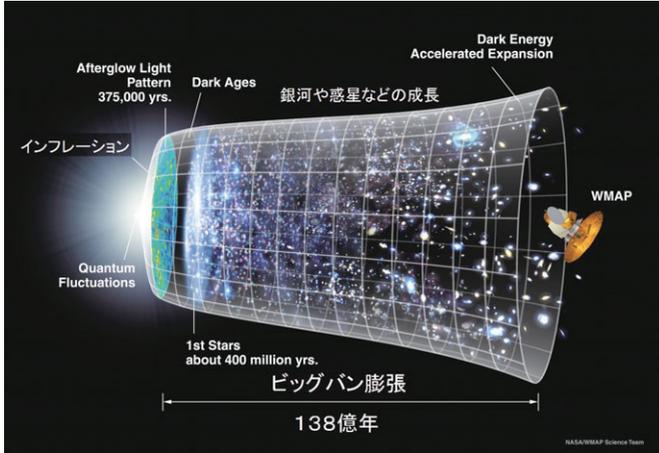


図1 宇宙の誕生から現在までの宇宙の膨張
(c)NASA / WMAP Science(一部和訳)

後の宇宙のことで、宇宙は 10^{-36} 秒から 10^{-34} 秒という極めて短い時間にインフレーションと呼ばれる急膨張をしましたと考えられています。インフレーションが終了すると、その時に放出されるエネルギーで宇宙は火の玉のような灼熱の状態になって(ビッグバン)、今日まで冷え

ながら膨張を続けていると信じられています。図1はこのような宇宙の歴史を描いたもので、現在も宇宙にある銀河は膨らみ続けるブドウパンの干しぶどうのようにお互いの距離を拡げています。報道された原始宇宙の証拠については先月号に花垣先生が書かれていますので、本稿では「宇宙が膨張する」という意味に挑戦します。かの有名なアインシュタインの一般相対性理論で、空間イメージの大転換を味わっていただきたいと思います。

一般相対性理論はアインシュタイン方程式

$$G(g) + \Lambda g = T$$

を解くというものです。右辺のTは宇宙にどのように星やエネルギーが分布しているかを表す物理量で、そのようなTに対してgを求めるのです。後で説明しますがgが宇宙の構造を与えるのです。Gはgのとても複雑な関数なので、科学者は並大抵の努力以上の苦勞をして、コンピューターを使った計算でgを求めています。限られた条件の時

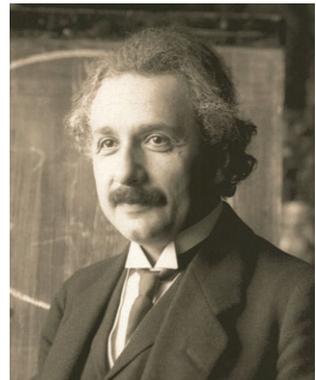


図2 アインシュタイン



図3 地球の衛星写真(c)NASA

だけ紙と鉛筆で解くことができます。例えばブラックホールや上で述べたビッグバン膨張がよく知られています。 Λ は宇宙定数といって、現在の膨張宇宙の観測から0ではないけれど、極めて小さい値とされています。それでは g がどんな量かを考えることにしましょう。これがわかれば「宇宙が膨張する」の意味がわかるので、頑張って読み続けてください。

g は計量と呼ばれるもので、一言でいうと2点間の距離を決めるものです。例えば、大阪からオーストラリアのシドニーまでは約8千km、パリまでは約1万kmですが、シド

ニーまではほとんどが海、パリまではほとんどが陸地、この違いをアインシュタイン方程式の右辺の T に入れて計算したら g にも違いが生じ、両者の距離にも違いが現れるはずですが、著者の力量ではこれを見積もることはできませんし、たとえその計算ができたとしても陸地や海の質量は小さいのでその効果はほとんどないでしょう。そこで、 g の意味が理解しやすいように次のような極端なことを考えることにします。

大阪ーシドニー間の中間地点の海底10kmに地球の質量の100万倍というとても重く重い物体が潜んでいたとします。このような場合なら、シュヴァルツシルト解と言って、アインシュタイン方程式が提唱されてすぐに見つかった g が使えます。エクセルを使って計算してみました。大阪ーシドニー間の各地点における距離の伸び率を示したのが図4です。物体の近くでは最大17%伸びますが、横切るときは伸びません。物体から離れるにしたがって伸びは小さくなり、大阪やシド

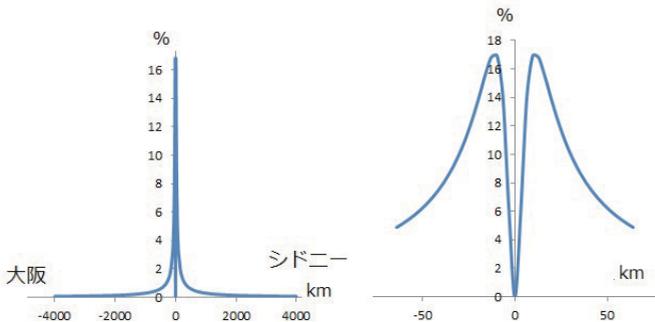


図4 距離の伸び率

ニーではほとんど伸びません。大阪からシドニーまでを合計すると約40km伸びるという結果になりました。大阪ーパリ間は物体からシドニーと同じくらい離れていてほ

とんど変化しません。この変化を一目瞭然にするため、1マス5km×5kmの網目を地球表面に強引に描くことを考えてみましょう。伸びているところが詰まった網目になりますよね。例えば最も伸びているところが17%の伸び率なので、5kmは $5\text{km} \div 1.17 = 4.3\text{km}$ の網目に押し込まれます。誇張して描いたのが図5です。中心付近の歪みが図4右に対応しています。このような網目を地球表面全体に描いたとすれば、物体の近くだけが歪んで、大阪、シドニー、パリなどはきれいな網目になって普通の距離と変わらないことが一目瞭然になります。

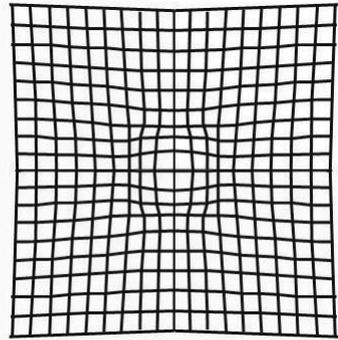


図5 等距離の網目

さて、ここまで地球表面に描いた網目でしたが、想像をふくらませて宇宙全体に描いた網目で「宇宙が膨張する」を考えることにしましょう。「宇宙が膨張する」とは宇宙の全ての2点間の距離が伸びることです。つまり、宇宙全体に描いた網目がどんどん小さくなることを意味します。ここで逆に網目の大きさが変わらないとすると、宇宙の方が膨張しているというイメージが湧いてきます。膨張するブドウパンと似ています。図1はこのようなイメージで描いたもので、観測事実などをアインシュタイン方程式の右辺に代入し、 g を求めて、網目を固定して描いた宇宙です。

ここまでくると冒頭の「原始重力波」も理解できます。もし物体が動いたら、網目の歪みが四方八方に伝搬します。これが重力波です。「原始重力波」は原始宇宙時代の急膨張で生じた網目の振動のことなのです。

一般相対性理論は g を求めて、宇宙の2点間の距離を決めるというものです。海底に地球質量の100万倍の物体という現実離れた想定にもかかわらず、この物体から100km以上離れるとほとんど影響はありませんでした。じつはこの質量での計算、図4や図5は、海底に半径9kmのブラックホールがあったという計算だったのです！一般相対性理論は、地球のような規模よりもはるかに大きな宇宙を考察する時や、極めて重い物体を扱う時に顕著に効果が表れるのです。現実とは無関係のことを空想しているようですが、現代人の多くはこの理論の恩恵で便利な生活を送っています。じつは、携帯電話のナビゲーションに使われているGPSは地球質量による一般相対性理論の効果を考慮して設計されたもので、人工衛星との通信で現在位置を正確に求めています。そして、GPSは科学実験の現場で必須とされる場合も少なくありません。現代科学による知見は我々の感性とかけ離れたものになっていますが、それが技術に応用され、その技術がまた科学を、そして現代文明を支えているのです。

齋藤 吉彦(科学館学芸員)