

授業でお使い下さい



Science Plaza

最新天文学で紐解く宇宙の「子供時代」



云南大学 中国西南天文研究所

島袋 隼士

1. 現代宇宙論

突然ですが、皆さんは子供時代のことを覚えていますか？私の記憶では、3、4歳の頃にショッピングセンターでエスカレーターのスイッチを押して止めてしまい、母がひたすら謝っていたことがあります。

さて、子供時代があるのは皆さんだけではありません。宇宙にも子供時代があったと聞いたら驚くでしょうか？そして、宇宙に子供時代があるということは、今の宇宙はある程度、成熟した大人であることを意味しますが、現在の宇宙は何歳くらいだと思いますか？ちなみに、私たちの住む地球やその他の惑星は太陽の周りを回っており、「太陽系」を形成しています。地球の年齢は約46億歳、太陽の年齢は約50億歳程度ということがわかっているので、宇宙の年齢はそれよりも大きいということがわかります。答えを言ってしまうと、宇宙の現在の年齢は約138億歳ということがわかっています。

では、宇宙の年齢はどうやって測定したのでしょうか？

この問いに答えるためには、現代宇宙論について少し説明しなければなりません。私たちが宇宙という単語の響きから想像するのは、星や銀河、ブラックホールなどの天体かもしれませんが、これらの天体は宇宙という「容器」の中に入っています。そのため、この「容器」である宇宙そのものについても理解したいと思うわけです。そして、「宇宙論」とは宇宙の歴史や進化、構造について研究する分野です。

現代宇宙論の始まりは20世紀の天才物理学者アルバート・アインシュタインによって1915年に提唱された「一般相対性理論」です。一般相対性理論は、難解な数式が登場するため、理解には骨が折れますが、一言でいえば、一般相対性理論は「時空、重力、物質」に関する理論です。時空というのは、私たちが生活する3次元空間に時間を加えたものを指しており、私たちは空間3次元+時間1次元の4次元時空に住んでいます。一般相対性理論で最重要な方程式に「アインシュタイン方程式」があります（次頁図1）。

Contents

Science Plaza

最新天文学で紐解く宇宙の「子供時代」

云南大学 中国西南天文研究所 島袋 隼士

1

Topics

温度感覚のバーチャルリアリティと人間の感覚

筑波大学教授 黒田 嘉宏 / 東京大学特任研究員 許 佳禎

6

過酸化水素に関する4つの課題について

上宮太子高等学校講師 卜部 吉庸

10

連載:PER実践紹介

授業のデザインに生徒の素朴概念を反映させる

早稲田大学高等学院教諭 勝田 仁之

16

改訂教科書紹介

物理基礎 新訂版 / 高校物理基礎 新訂版

21

化学基礎 academia 新訂版 / 化学基礎 新訂版

高校化学基礎 visual / 生物基礎 新訂版

高校生物基礎 visual / 地学基礎 新訂版

科学と人間生活 新訂版

高校生へ私が選んだ1冊の本

「動物たちは何をしゃべっているのか？」

32

$$G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

図1 アインシュタイン方程式

見るからに難しそうな方程式ですが、何となく美しさも感じます。

アインシュタイン方程式は人類の宇宙観に対して大きな意味をもつ方程式です。というのも、アインシュタイン方程式を宇宙に適用すると、宇宙の進化や構造について知ることができるからです。そして、アインシュタイン方程式は宇宙の驚くべき姿を教えてください。何と、「宇宙は膨張している」というのです。アインシュタイン以前の人々にとっての宇宙は、「過去も現在も未来も変わらない永遠の存在」でした。しかし、アインシュタイン方程式は、宇宙はダイナミックに膨張し、進化していることを示唆しました。アインシュタインは自分の方程式が導く結論に納得できず、何とか宇宙の膨張を否定しようと方程式を修正しました。そんななか、1929年、アメリカの天文学者エドウィン・ハッブルによって、宇宙が膨張している証拠が観測によって明らかになります。この発見によって「宇宙は変わらないもの」という考えは覆され、宇宙は膨張していることが確かなものとなったのです（図2）。



図2 宇宙を風船にたとえて、宇宙が膨張している様子を描いた図

「宇宙が膨張している」という結論は、さらなる驚きをもたらします。宇宙が膨張して大きくなっているということは、現在の宇宙よりも過去の宇宙の方が小さいことを意味します。つまり、宇宙は過去にいけばいくほど小さくなり、どこかで宇宙の始まりがあったと考えられるのです。そして、過去の小さな宇宙は高温で高密度と予想される（たとえば、満員電車の車内をどんどん小さくしていくと温度が上がり、よりギュ

ウギュウになりますよね？）という理論をジョージ・ガモフという物理学者が提案しました。これが今日、「ビッグバン理論」と呼ばれるものです。ビッグバンと聞くと、「宇宙の大爆発」を想像する方もいるかもしれませんが、このイメージは厳密には正しくありません。ビッグバン理論の重要な点は以下の二つです。

- (1) 宇宙の始まりはどの場所でも高温で高密度だった。
- (2) そんな高温で高密度な宇宙で水素やヘリウムなどの軽い元素が作られた。

とはいえ、いきなり「宇宙に始まりがあり、過去の宇宙はとても熱かった」といわれても疑ってしまいますよね。しかし、いくつかの観測的証拠によってビッグバン理論が正しいことが確かめられています。その一つが、「宇宙背景放射」です。宇宙背景放射は Cosmic Microwave Background (CMB) ともいわれており、ビッグバンの時期の宇宙で至る場所に存在した電磁波（光子）です。現在の我々は宇宙の始まりに起きたビッグバン時のCMBを観測することができるので、CMBは「ビッグバンの化石」ともいえます（図3）。

CMBはビッグバンが起きた証拠であると同時に、さまざまな情報を教えてください。そのなかの一つが「宇宙の年齢」です。CMBの観測によって宇宙の年齢が約138億歳であることがわかったのです。これが、宇宙の年齢がわかるまでのストーリーです。ちなみに、宇宙の年齢が138億歳だとわかったのは21世紀に入ってからのものであり、つい最近の話です。

宇宙の年齢が現在138億歳なら、たとえば、宇宙が3億歳くらいの年齢のときは「宇宙の子供時代」といってもよさそうです。では、宇宙の子供時代はどんな様子だったのかについて考えていきたいと思います。

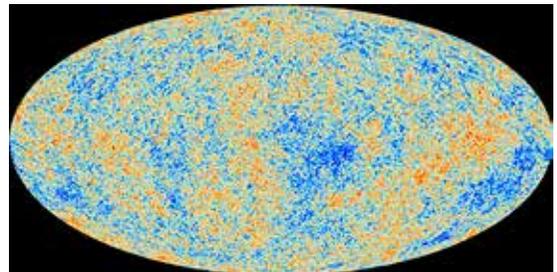


図3 観測された宇宙背景放射 (CMB) 出典：ESA

2. 宇宙の子供時代

現在、我々が夜空を見上げると、空には数多の星たちが輝いています。しかし、子供時代の宇宙には星や銀河が存在せず、宇宙は真っ暗だったと考えられています。このような、宇宙に星や銀河の存在しなかった真っ暗な時代は「宇宙暗黒時代」と呼ばれています。すると、以下のような疑問が湧いてきます。

「宇宙暗黒時代には星や銀河が存在していないのに、現在の宇宙には星や銀河があふれて夜空を彩っている。一体、どうやって真っ暗な宇宙から色とりどりの宇宙に変化したのだろうか？」

この疑問こそ、現在、世界中で多くの天文学者が解決しようとしているけど、未だに完全には答えがわかっていない問いです。しかし、大まかな方向性は得られているので、以下で説明していきたいと思います。

宇宙暗黒時代に星や銀河など輝く天体は存在していませんでしたが、ビッグバン時代に作られた水素やヘリウムなどの軽い元素は存在していました。加えて、「暗黒物質（ダークマター）」という粒子も存在していました。ダークマターは重力を及ぼす物質という点では水素やヘリウムなど普通の物質と同じですが、普通の物質と違って電磁波を放射しないという大きな違いがあります。そして、暗黒物質の正体は未だにわかっていないので、宇宙物理学、素粒子物理学の両方から積極的な研究が行われています。

標準的な宇宙論モデルでは、ダークマター粒子が集まってきて「ダークマターハロー」と呼ばれる大きな塊を作ります。ダークマターハローは軽いものだと太陽数百万個の質量で、重いものだと太陽数兆億個分の質量です。そして、このダークマターハローの中で星が作られるので、ダークマターハローは「星の揺りかご」ともいえます。星の作り方については、それだけで本1冊が書けるくらい難しく面白いテーマなのですが、簡単に説明すると、ダークマターハロー内にはビッグバン時代に作られた水素やヘリウムのガスが存在しており、これらのガスが重力でお互いに集まってきて、「ぎゅっ」と潰れることで星が形成されます。これが初代星（ファーストスター）の誕生です。星というのは自分で輝いている天体を指すので、ファーストスターの誕生によって宇宙暗黒時代に光が灯されました。これを「宇宙の夜明け」と呼びます。そして、ダークマターハローの中で星がたくさん作られると、

それは銀河になります。こうやって、宇宙初期の銀河が作られるのです。

では、ファーストスターは宇宙のいつ頃に作られたのでしょうか？実はこの問いに対する答えはわかっていません。物理学理論に基づいたシミュレーションでは、ビッグバンから数億年後には作られたと予想されています。また、2021年12月にアメリカが総額1兆円以上をかけて開発したジェームズ・ウェッブ宇宙望遠鏡（JWST）は、ビッグバンからわずか3億年後に存在していた銀河を発見しました。最新の観測技術の発展で、人類はいよいよ宇宙の子供時代に手が届きつつあります（図4）。



図4 JWSTによって観測されたビッグバンから約3億年後に存在する銀河 出典：NASA

ところで、ファーストスターや宇宙初期の銀河によって光が灯った「宇宙の夜明け」の宇宙の様子はどのようなものだったのでしょうか？キーワードは「電離（イオン化）」です。化学を履修した先生や生徒の皆さんなら一度は「電離（イオン化）」という単語を聞いたことがあると思います。原子は原子核とその周りを回る電子によって構成されていますが、その電子が原子から飛び出していくのが電離でした。宇宙には大量の水素が存在していますが、ファーストスターや宇宙初期の銀河から放射されるエネルギーの高い「紫外線」によって水素の電離が起ります。宇宙暗黒時代には中性状態だった水素ガスたちは、ファーストスターたちの登場によって徐々に電離が進行し、最終的には宇宙の水素のほぼすべてが電離します。この時期

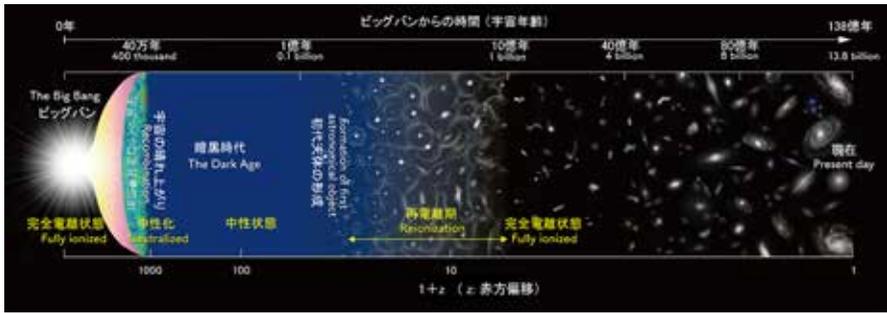


図5 宇宙の歴史。天文学辞典より。 <https://astro-dic.jp/cosmic-reionization/>

のことを「宇宙再電離期」と呼びます。たとえていうなら、早朝の森に立ち込める霧が晴れるように、宇宙に満ちる中性水素という「霧」が消えていく、それが宇宙再電離です。

ここまでの話をまとめると、宇宙の始まりにはビッグバンがあり、ビッグバンの痕跡はCMBによって確認されました。ビッグバン以降、宇宙には輝く天体の存在しない宇宙暗黒時代が続きますが、ファーストスターや銀河の登場によって宇宙に光が灯り、宇宙の夜明けが幕を開けます。その後、ファーストスターなどから放射される紫外線により、宇宙に満ちている水素ガスが電離する宇宙再電離期を経て、現在の宇宙へと発展します。これが天文学者の考えている宇宙の歴史です（図5）。

3. 21cm 線で探る宇宙の子供時代

宇宙の歴史や、子供時代がどのようなものだったのかわかりましたが、では、宇宙の子供時代を調べるためにはどうしたらよいのでしょうか？キーワードは「中性水素」です。ダークマターを除いたら、宇宙の大部分を占めるのは水素で、宇宙全体に広がっています。そのため、水素からの信号に注目するのはごく自然な発想です。次に、宇宙暗黒時代の水素は電離をしていない「中性状態」で、宇宙再電離期のときの水素は「電離状態」なので、スイッチがオン・オフになっているみたいなものです。そこで、たとえば中性状態のときの水素で「オン」になり、電離状態の水素では「オフ」になるような信号があると、宇宙に存在する水素の状態を調べることができそうです。実は、そんな都合の良い存在が「21cm 線」と呼ばれる信号です。21cm 線は中性水素から放射される電波で、その波長が21cmということから「21cm 線」と呼ばれています。中性水素からは21cm 線が放射されますが、電離した

水素からは21cm 線は放射されないので、21cm 線を用いて宇宙を観測したら、どの領域が電離していて、どの領域が中性状態かを知ることができます（図6）。

21cm 線信号のありがたい点は、中性水素が存在すれば、21cm 線信号を発することが可能なので、宇宙再電離期のみならず、宇宙暗黒時代も調べることが可能という点です。宇宙暗黒時代には星や銀河が存在せず、星や銀河から出る「光」は存在しませんが、ビッグバン以降の宇宙では中性水素ガスが宇宙を満たしているため、中性水素から発せられる21cm 線を用いれば宇宙暗黒時代の様子を知ることができるのです。

我々は21cm 線という武器を用いて、宇宙暗黒時代から宇宙再電離期という、宇宙の「子供時代」を探ることができるのですが、具体的に何を調べればよいのでしょうか？これらの時代には謎がたくさん詰まっています。宇宙暗黒時代には星や銀河といった天体が存在しないため、純粋な宇宙論的な効果、たとえばダークマターの性質などを調べることができます。また、宇宙再電離はファーストスターや宇宙初期の銀河の性質と深いつながりがあるので、21cm 線を通して、これらの天体の情報

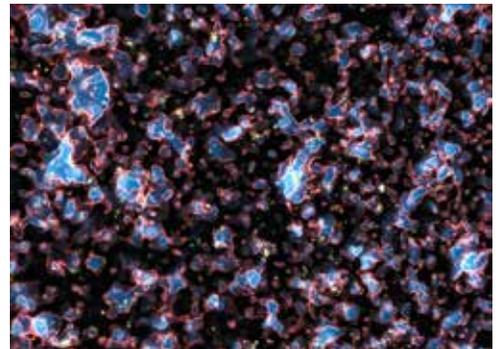


図6 21cm 線で見た再電離の様子。青白い部分が電離している領域を表し、黒い部分は水素が中性状態となっている。出展：MWA

を調べることが可能になります。たとえば、学校で身体測定をすることで、クラスの生徒たちの身長や体重の分布を知ることができますが、同じことはファーストスターにも当てはまりません。ファーストスターの質量の分布はどうなっているのか？この疑問に対しても21cm線信号はヒントを与えてくれる可能性があります。また、「そもそも宇宙再電離は何が引き起こしているのか？銀河？ブラックホール？」や「重い銀河と軽い銀河、どちらが宇宙再電離を引き起こしやすい？」など、疑問は尽きません。これらの問いに対して21cm線は有意義な情報を提供してくれると期待されています。

4. 21cm線の観測に向けて

宇宙暗黒時代から宇宙再電離期を探るうえで重要な役割を果たす21cm線ですが、何と未だに観測がされていません！（正確にいうと、宇宙再電離期以前の21cm線は観測されていないのであり、近傍の宇宙からの21cm線はすでに観測されている）

そのため、宇宙暗黒時代から宇宙再電離期の21cm線が観測されたら大発見であり、21cm線観測に向けて既にいくつかの電波望遠鏡が動いています。また、現在観測を行っている望遠鏡に加えて、2030年代にはヨーロッパを中心とした国際プロジェクトである大型電波望遠鏡SKA（Square Kilometer Array）も観測を開始する予定です（図7）。SKAの目標は21cm線を通して宇宙の子供時代を観測するだけでなく、「宇宙人の探査」や「宇宙の磁場の起源」「ダークマターやダークエネルギーの正体解明」「重力波の検出」など、ワクワクするようなテーマがたくさんあります。

日本は残念ながら国としてはSKAに参加していませんが、参加を目指して活動中です。一方で、研究者個人としてはすでにプロジェクトに参加しています。私自身、SKA宇宙再電離の国際チームのメンバーの一員ですし、SKAの日本チームの宇宙再電離研究班の班長を務めています。

また、2030年代後半から2040年代にかけては、さらに夢のある話があります。それが「月面電波望遠鏡」です。地球上では、スマホの電波など、人間が生活で使用する電波が電波観測を阻害したり、地球大気の高電離層が、宇宙からやってくる電波を跳ね返したりするので、そうした難点から逃れるために月で電波観測を行うのです。たとえば、アメリカのNASAは月のク



図7 SKAの完成予想図 出典：SKA



図8 月面のクレーターを利用した電波望遠鏡 出典：NASA

レーターに電波望遠鏡を設置する計画を提案していますし、中国は月面に小さなアンテナタイプの電波望遠鏡を10万個程度設置する計画を提案しています（図8）。

宇宙暗黒時代の中性水素からの21cm線信号は地上観測での検出は難しいですが、月面での観測なら検出可能です。宇宙暗黒時代の中性水素からの21cm線を調べることで、たとえば、ダークマターの性質に迫ることができる可能性や、さらには、ビッグバンよりも過去の、宇宙の始まりに起きたと考えられている宇宙の急激な加速膨張「インフレーション」の性質を調べられる可能性が指摘されています。

しかし、SKAや月面望遠鏡による21cm線信号の観測には困難なことも多いです。宇宙には明るすぎる電波天体が数多く存在するため、21cm線信号が明るすぎる天体に埋もれてしまうのです。そのため、21cm線信号を「発掘」する作業が重要であり、AIを用いた方法などが提案されています。

5. 高校生の皆さんへ

困難はありますが、21cm線を用いた宇宙の子供時代の探査には魅力が詰まっています。特に現在の高校生の皆さんが大学院生を修了する頃には、SKAのデータが手に入り、研究が活発になっている時期ですので若い皆さんの参入をお待ちしています。