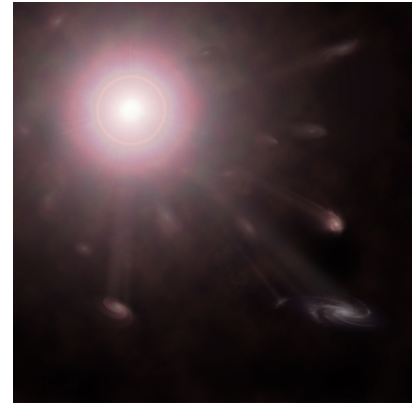


ビッグバン宇宙 宇宙の姿をさぐる

Cosmological Model

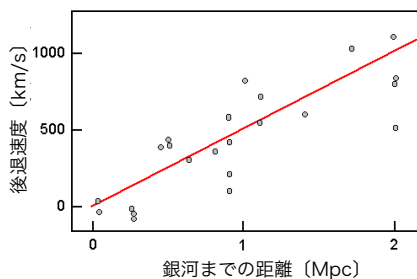
宇宙そのものがどのような誕生をして、進化を遂げて来たのかを議論するのが、宇宙論(cosmology)という分野です。アインシュタインの相対性理論によって、時間と空間もダイナミカルに変化することが予言され、宇宙全体が膨張していることが確認されています。宇宙は138億年前に**ビッグバン(Big-Bang)**と呼ばれる大爆発で誕生しました。そして、宇宙のふるまいは、たった6つのパラメータで説明できることが知られています。ビッグバン宇宙モデルの成功は、20世紀物理学の勝利とも称されています。しかし、ダークマター問題、宇宙の加速膨張問題といった未解決の問題も残されています。



● ビッグバンの証拠となる3つの観測事実

(1) ハッブルによる宇宙膨張の観測 (1929)

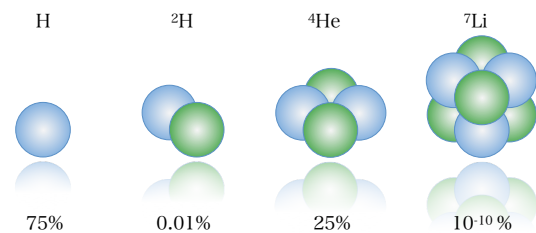
ハッブルは遠方にある銀河ほど太陽系から速く遠ざかることを発見しました。これは宇宙が一様に膨張しているとすると、うまく説明できます。膨張宇宙の最初の発見です。



※ Mpcは326万光年
※ 現在、100万年離れた銀河は太陽系から秒速20.6kmの速さで離れています。

(2) ガモフによる軽元素合成理論※ (1948)

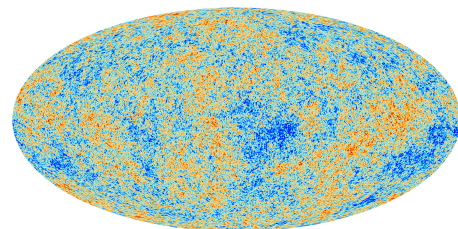
ビッグバンではヘリウムなどの軽い元素は宇宙誕生間もなく陽子と中性子から作られます。その過程を計算するとヘリウムの存在比(質量比)は約25%などとなり、観測値と一致することが確かめられました。



※ ガモフはすべての元素ができる、と提唱し、林忠一郎がHeまでである、と訂正しました。

(3) 宇宙マイクロ波背景放射の発見 (1964)

宇宙が高温高密度な状態では光はとび回っている電子に散乱されてしましますが、温度が下がると電子は原子核に捕獲され、光が直進できるようになります。この光を宇宙マイクロ波背景放射といい、高温高密度状態が存在した証拠となります。それがペンジアスとウィルソンによって発見されました。



Planck衛星によって観測された宇宙マイクロ波背景放射の温度揺らぎ (2013)

● ダークマターの正体は何か

渦巻銀河の回転速度を調べると、見えていない質量が見えている質量の4倍必要なことがわかります。これが**ダークマター問題**です。惑星のような光らない天体、ブラックホールなどでは到底足りません。宇宙空間を飛び回る素粒子ニュートリノが候補になったこともあります。まだ不足です。現在では、未発見の素粒子がダークマターの最有力候補となっていて、アキシオンやニュートラリーノなど、素粒子の標準モデルを超えた理論が議論されています。

● 宇宙の加速膨張の原因は何か

20年ほど前、現在の宇宙が加速しながら膨張していることが複数のグループの観測で報告されました。これは、上空に向けて打ち出した球が加速しながら地球を離れていくのと似ていて、原因が不明です。何らかの万有斥力がはたらいっていると考える**ダークエネルギー説**、アインシュタインの相対性理論を修正すればよい、とする**修正重力理論説**、私たちの周囲が特別に密度が低いためにこの観測結果になった、とする**非一様宇宙モデル説**が議論されています。

ブラックホール・重力波 究極の重力を探る

Black Holes and Gravitational Waves

宇宙あるいは天体の運動を支配するのは重力です。アインシュタインは一般相対性理論（1915）を提唱し、それまで「万有引力がはたらく」として理解されていたニュートン力学を、「重力の源は時空のゆがみである」と説明しました。一般相対性理論はブラックホールの存在を予言し、宇宙そのものが動的に振る舞うことを予言し、時空のゆがみが波として伝わる重力波の存在を予言しました。100年が経過し、それらが、宇宙研究の表舞台になっています。

● ブラックホールは明るい天体

物理学者は、ブラックホールを「光が無限遠方に脱出できない強い重力の支配する領域」として定義します。しかし、天文学者は、正体不明の明るい天体があるとブラックホールの存在を疑います。ブラックホールに吸い込まれていくガスが激しく衝突して、X線などの高エネルギー電磁波を放出したり、ブラックホールに吸い込まれなかったガスがブラックホールの回転軸方向にジェットとして吹き出すくみがあるからです。

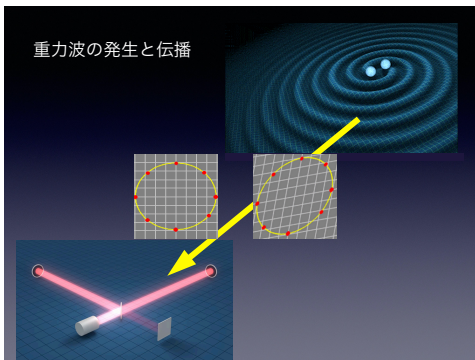
● 2019年に発表された初のブラックホール撮像

世界中の電波望遠鏡を同時刻に5500万光年先のM87銀河の中心に向けるイベント・ホライゾン・テレスコープ(EHT)プロジェクトが実施され、ブラックホールを直接撮像した1枚の写真が発表されました。データ解析に2年を費やしたそうです。リング上に見えるのはブラックホールによって曲げられている光です。



<https://alma-telescope.jp/news/press/eht-201904>

● 2015年9月に初検出された重力波、2021年11月までに 90ものイベントが報告される



夜空の星の半分以上は、連星（二重星）を形成しています。質量の大きな連星は重力波と呼ばれる「時空の波」を放出してエネルギーを失い、やがて合体します。連星ブラックホールや連星中性子星は、合体の瞬間に大きな重力波を放出します。しかし、宇宙空間を伝播するうちに振幅は小さくなり、典型的には、長さスケールの 10^{-22} 程度の振幅です（太陽-地球間の距離に対して、水素原子1個分）。巨大なレーザー干渉計装置を使って、アメリカのLIGOグループが重力波の初観測に成功したのは、2015年9月でした。現在は欧州のVirgoグループと、日本のKAGRAグループも共同で観測・解析を行っています。

KAGRA (かぐら：大型低温重力波望遠鏡)

Kamioka Gravitational wave detector, (Large-scale Cryogenic Gravitational wave Telescope)

大型低温重力波望遠鏡

望遠鏡を神岡鉱山内に建設
地面振動が小さい岐阜県飛騨市にある神岡鉱山

鏡をマイナス250度(20K)まで冷却
熱雑音を小さくするため

鏡の材質としてサファイア
光学特性に優れ、低温に冷却すると熱伝導や機械的損失が少なくなる

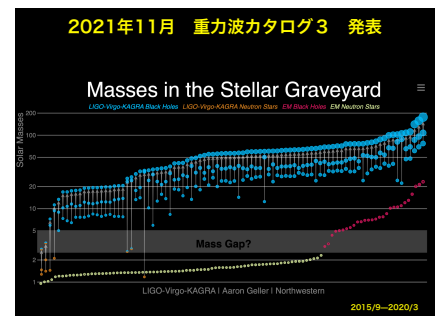
<http://gwcenter.tokyo-u.ac.jp/plen/history>

望遠鏡の大きさ：基線長 3km

鏡の材質としてサファイア
光学特性に優れ、低温に冷却すると熱伝導や機械的損失が少なくなる

2021年11月、LVKの国際共同観測グループは、これまでに85例の連星ブラックホール、2例の連星中性子星、3例のブラックホール・中性子星の合体からの重力波が観測されたことを発表しました。

理論的に説明できない、太陽質量の3-5倍の天体の存在や、100倍以上のブラックホールの存在が確認され、今後の観測データの蓄積から、天文学に新しい展開がなされていくと期待されます。

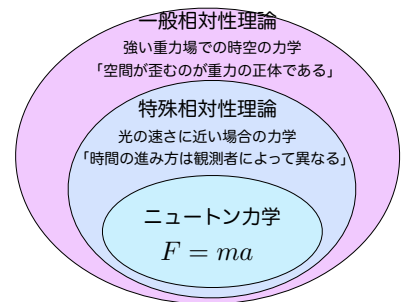


縦軸に太陽質量を単位にして、どのような連星合体から重力波が検出されたのかを示す図。

アインシュタインはどこまで正しいか 相対性理論を検証する

Test of General Relativity

アインシュタインは、特殊相対性理論（1905）と一般相対性理論（1915）の2つの理論を提唱しました。前者は光の速度に近いときの力学、後者は強い重力のふるまいを表す力学です。どちらも、これまで100年以上にわたり、すべての観測・実験の検証をパスしてきました。現代の素粒子物理学は、特殊相対性理論をベースに構築されています。一般相対性理論は、重力波観測をよく記述していますが、「どこまで正しいか」という点が注目されています。

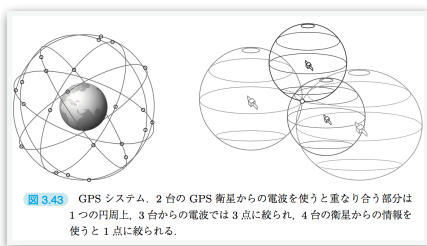


● なぜ相対性理論には限界があると考えられているのか

宇宙全体のふるまいを記述する相対性理論は、電子や原子などミクロの物質を対象とする量子論と整合しません。そのため、宇宙の始まりを矛盾なく記述することができず、両者を含んだ究極の物理理論の誕生が待たれています。また、相対性理論が導く時空には、時空特異点とよばれる点が必要存在し、相対性理論自身が適用できない領域が含まれます。そのため、ブラックホールの中心部がどのようになっているのかは議論ができません。

究極理論の候補として、時空を11次元で考える超弦理論と、時空を複素4次元で考えるループ重力理論の研究が進められていますが、実験室では到底再現できないレベルの話です。連星ブラックホールの合体など強い重力場で、一般相対性理論の適用限界が判明すれば、究極理論の構築が一気に進むはずですが。

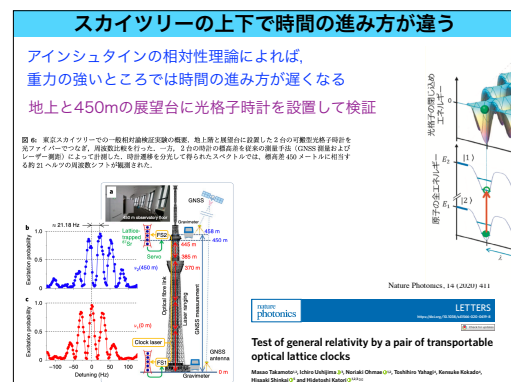
● GPSには、相対性理論が使われている



私たちが使うカーナビには、GPSが使われています。地上20000mを飛ぶ衛星に搭載された原子時計の電波を用いて三角測量をしているのです。

- ・ 正確な位置と時刻の情報を含んだ電波で、三角測量→精度±15m
 - ・ 高速飛行の特殊相対論効果と地球重力の一般相対論効果
- ⇒ 1日につき、38x10⁻⁶秒ずつ衛星の時計を遅らせる必要あり

● スカイツリー450m展望台と地上との時計の進み方のちがいを測定



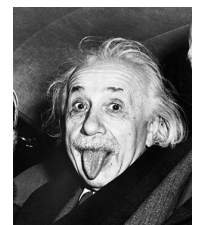
10⁻¹⁸ の精度を実現する光格子時計
(300億年でずれは1秒以内)

多数の原子をレーザー光線で作った格子に閉じ込める技術で、原子時計よりも高精度な光格子時計が開発されています。それを用いて、450mの高度差で生じる「重力による時間の進み方の遅れ」を測定した結果が2020年4月に発表されました。その結果は、一般相対性理論と矛盾がないものでした。

● 重力波観測による相対性理論の検証

相対性理論を使って計算された重力波の波形と実際に観測された重力波の波形がどこまで一致するのかを検証することで、相対性理論のテストが可能です。これまでの解析では、相対性理論の破れは見つかっていません。

相対性理論が正しいことが繰り返し報告されていますが、これは、研究者としては、嬉しいような悔しいような複雑な心境です。



ほらね！