

2016/11/19 最後の1秒間 第1版:©中村卓史(京都大学名誉教授)

最後の1秒間

高校生・大学生にもわかる一般相対性理論と重力波の世界

目次

- 第1章 始めに
- 第2章 2016年2月11日 GW150914 発見の報告
- 第3章 GPS とポケモン GO
- 第4章 一般相対性理論
- 第5章 地球はわずかに曲がった空間の中にいる
- 第6章 中性子星が存在する (学生が発見した)
- 第7章 連星パルサーが存在する
- 第8章 我が国の重力波研究の歴史
- 第9章 再び GW150914
- 第10章 GW150914 の起源はどうしたら結着がつくか

第1章 始めに

この電子本は無料で高校生・大学生に種々の分野の最先端を紹介するものです。シリーズ化を予定しています。著者は時間に余裕のある、大学の名誉教授を中心に現職の大学教授・准教授・助教からなり、これまで社会から受けた恩恵への恩返しと、名誉教授は定年で講義をする必要がなくなったので、その代わりに講義でも有ります。この電子本は**無料**で提供しスマホで読めるようにします。普通の本と違う所は、無料以外にも**動画の URL** を使いますので、それを見てもらってから話が続くと言うスタイルを、採ります。しかし、本には**ミスプリ**が必ず有るものですので、

それは指摘してもらったら直に修正します。また、劣悪な電子本を提供しない為に審査委員会を通過したものしか **upload** しません。1つの電子本の中でも最初の方は解りやすくしますが最後の方は難しくなります。これは、読者に大いに勉強する意欲を持たせる為にわざとやるものですので、あるところから以降、解らなくなっても、落ち込む必要は有りません。「読書 100 回、意自ら通る。」つまり 100 回読んで解らない本はないと言う諺があります。また、この本は定期的に学問の進展に応じて改訂版を配布する予定です。つまり絶版になる事は有りません。

この電子本の趣旨を、もう少し格好良く言うと「空気がタダのように、人類が得た膨大な知識も**無料**で万人が享受すべきである。だから、**無料の電子本を書くのは我々の義務**である。」

では始めましょう。

第 2 章 2016 年 2 月 11 日

それは 2016 年の日本時間で、2 月 12 日午前 2 時の LIGO (Laser Interferometer Gravitational Wave Observatory) の省略形でサイトは www.ligo.caltech.edu/

: 日本語ではレーザー干渉計型重力波天文台と言う意味になる) の記者会見から始まった。この記者会見は事前に周知されており、YouTube で我々も見ることができた。

「We have detected gravitational wave. We did it. (我々は重力波の直接観測に成功した。やったぞ!)」と LIGO の責任者が発表した。その後は一般人向けの話が続いて、専門家の私は聞く気がしなくなったが公開された映像は、なかなか良くできていておもしろいので以下の URL

https://www.youtube.com/embed/Zt8Z_uzG71o

を今すぐ見ること。(クリックないしはタッチして入ろうとしてもうまく行かない時は面倒でもこの URL を直接打ち込むこと。)

以下では上の動画を見た事を前提に話を進める。こんな事出来るのが電子本の利点のひとつである。中心にある2つのブラックホールが重力波を放出して合体する過程を数値的相対性理論のシミュレーションを使って、あたかもすぐ近くで見たかのように表現している。重力によるレンズ効果でブラックホールの周りの星が時間とともに、様々な見え方に変化するのがわかる。最後には2つのブラックホールは合体して、周りの星の見え方も変化しなくなる。注意：現実にはこのような観測は困難である。

さて、この記者会見で LIGO へ資金を提供した日本の学術振興会に相当する NSF (National Science Foundation) の理事長の言葉にしびれた。「LIGO への投資は risky であって成功は保証されていなかった。即ち失敗するかもしれなかった。でも、NSF は今後もこのような成功が保証されていない risky で、LIGO の場合のように 600 億円にも上る投資を続け世界の科学の最先端を牽引して行く予定である。」

LIGO への最初の投資はまずは、400 億円くらいで米国のワシントン州のハンフォードとルイジアナ州のリビングストーンに1辺 (腕) の長さが 4km の L 字型の装置を 2000 年ころに2台作った。この段階では重力波を観測する事は要求されずに、所定の感度を出せば合格であった。実際に重力波は予想通り観測されなかった。次にさらに 200 億円程度をかけて感度を上げる a-LIGO(advanced LIGO の省略)で検出を目指すという2段階の作戦であった。

我が国のこの規模の大型計画では、このような作戦をとらせ

てもらえない。米国の底力を見た思いであった。この差は、ヨーロッパから新大陸にリスク（成功の保証がない）を覚悟して移住し、新しい国を建国した米国と日本の考え方の相違かもしれない。米国では移動することは大事であるという考えが定着している。大学と大学院は別の大学にするのが、規則はないけど習慣である。また、職業を転々とすることも評価される。力があるからいろんな職につけたとして評価されるのだ。日本では腰の落ち着かない人間として逆の評価をされるのが常であろう。日本の何人かの責任ある立場の人々にこの NSF の理事長の発言を理解して欲しいものである。日本の 4 社の新聞記者にもこの発言をどう思いますかと聞いたけれど、納得いくような返事もらえなかった。

我々が待ち望んだのは、記者会見とほぼ同時に公開された専門家向けの論文だった。Physical Review Letters という米国物理学会が出版している学術雑誌である。ところが、世界中の専門家が同時にアクセスするものだから、なかなか繋がらない。約 2 時間後に手に入れて早速読み始めて、「これは、おかしい。なんかの間違ひではないか？」と眠れなくなってしまった。後で聞いたところ、「重力波天体の多様な観測による宇宙物理学の新展開」（期間 2012 年度—2016 年度：領域代表 中村卓史：文部科学省新学術領域 www.gw.hep.osaka-cu.ac.jp/gwastro/）のデータ解析の計画研究代表者の神田展行教授（大阪市立大学）も

「なぜ、こんな綺麗な波形が出ているのか？」で眠れなくなったそうだ。

しかも、正式な観測のはじまる 2 日前の Engineering run と呼ばれる練習の時だったのが、また悩みの種になった。a-LIGO は

重力波しか検出できないので、世界中の電波、赤外、光学、X線、ガンマ線のグループと協定を結んでいて (MOU=Memorandum Of Understanding と呼ばれる)、その協定の下での追跡観測が2015年9月18日から始まる4日前に世界で初めて重力波を直接観測する事に成功したのが結果的に分かったのだ。彼ら自身も「本当かいな?」と思ったそうで、世界中のMOUを結んだ相手に知らせたのは2日後であった。このイベントは2015年9月14日に検出された重力波(Gravitational Wave)なのでGW150914と名付けられた。

私が第1に考えたのは、GW150914は偽のイベントではないかと言うものであった。a-LIGOでは、検出装置とデータ解析並びに論文執筆がうまく行くかどうかを調べる為に匿名の人が機械的にLIGOに偽のイベントを注入する。その内容は金庫にしまわれる。観測チームには、それを知らずに論文を書く所までやらせる。そこで初めて金庫を開けて本物かどうかを確認して本物なら論文を投稿する。偽物のイベントはfake eventと呼ばれるが、私が真っ先に疑ったのはfake eventを間違えて発表したのではないかであったが、わざわざ練習運転の時にfake eventを入れる理由はない。

次の日、眠れないもの同士で大激論がはじまった。我々研究者はどんな論文で、どんな記者会見があろうが、まずはその内容を100%疑ってかかる。あらゆるものを疑っても、疑っても、疑っている自分が存在することは疑えないというデカルトのいわゆる「我思う、故に我有り。(Cogito ergo sum)」と言う精神である。従って、記者会見があった論文について、新聞記者が直にコメントを求めに来るけど、実は論文が発表された時点では、その

主張は障害物競走のスタート点にいると言う以上の意味はない。その後の数々の論争で認められて、初めて本当になるのである。しかも、これは多数決では決まらない。自然と言う絶対的な判定者に認められなければならない。この点が最も科学の好きな所である。ガリレオ・ガリレイは宗教裁判という生死の局面に立たされ、自分の信じている説よりは生の方を選んで、あとでボソボソと「それでも地球は回る」と嘯いたそうである。(後世の伝記作家の装飾と言う説もあるそうだ。)

もちろん、中にはそれは間違っていると即座に返答出来る場合がある。ニュートリノが光速を超えているという実験の記者会見があったので、新聞記者がこれは本当かと電話をして来た。速度を測るには距離と時間を測る必要があるが、なんと距離を GPS で決めたと言うのだ。ここで私は、それは自己矛盾だと笑ってしまった。理由は、後に説明するが GPS は特殊相対性理論と一般相対性理論が正しい事を証明しており、その御陰で、スマホで自分が今どこにいるのかが解るし、ポケモン GO で遊べるのだ。特殊相対性理論と一般相対性理論が正しい事を使った GPS で光速を超える粒子が存在すると言う特殊相対性理論に反する主張をするのは自己矛盾でしかない。でも折角電話して来た記者にそう言ってしまつては可哀想になって来て「いやー、こういう話は時々有るので、今相対論が正しいかどうかと言えるような段階ではありません。もう少し待ったらどうですか？」と返答した。後にケーブルの接続に問題があったそうで、ニュートリノが光速を超えると言う主張は却下された。水戸黄門風にいうなら「この特殊相対性理論と言う印籠が目に入らぬか！助さん角さん、懲らしめてやりなさい」というところだ。

もう一つ経験した例はこれよりは、少し難しいし、まともな研

究者が 1 年程信じてしまった事件であった。それは、XXX 大学のグループが、宇宙背景放射がプランク分布という予想されていた熱分布から違っているというのを、ロケットを使った観測で発見したと発表した事件だ。私は即座に、この観測は間違っていると分かった。それで全く関心を示さなかったのに、素粒子論的宇宙論をやっている人達に「中村さんは、何でこんな面白い事に興味を示さないの！」となじられたのに対して「そんなのは、エネルギーが足りないから、不可能だと言うことを 3 行で示せる。観測が絶対に間違っている。」と返事した。彼は「こんな面白いことに、興味を示さないのはアホだ！」という顔をして去って行った。1 年後に彼に再会して、あれはどうなったと聞いたら「エネルギーが足りないから難しい。」と返事をするので「1 年前にそう言ったでしょう。3 行でわかるのですよ。」と言った。しばらく経って、結局ロケットの噴射ガスを誤って宇宙背景放射と誤解したのが原因だったと、分かった。でもこの観測に対してある学術賞が与えられた。その努力を評価したのかもしれない。

このように、学術賞が与えられた成果ですら、結論は間違いである事が判明した例がある。ましてや、某 N 誌に掲載されただけで、本当だと大騒ぎして自殺者まで出したのには、多くの人にもその責任の一部があると思う。もう一度言うが「論文が発表された時点では、その主張は障害物競走のスタート点にいると言う以上の意味はない。」のである。

従って LIGO の発表もその例にもれないのだ。でも、新聞記者に意見を聞かれるのに決まっているから早急に検証を実施しないといけない。私は、どこまでも結果を疑ったが、神田さんは信じる方向になったので「じゃ、aLIGO とは独立な解析をしてあ

の綺麗な波形を再現してくれませんか？それが一致すれば信じます。」と言った。後に詳しく述べるが生の信号はノイズだらけで、全く波形は見えない。後で分かった波形の振幅はノイズの1000分の1なのだ。aLIGOは生データを公開したので、神田さんがフーリエ変換と言う数学的な方法を駆使して解析した結果、私にも理解出来る手続きで見事にaLIGOの波形を再現する事に成功した。このメールが神田さんから深夜送られて来たとき、一人書斎で「わーお！」と大声を上げた。確かに間違いなくaLIGOは、世界で初めて重力波の直接観測に成功したのだ。

この時点で初めて友人でLIGOの解析チームのリーダーのBruce Allenに「Congratulation!! We can solve the magic. (やりましたね。われわれも波形を出すマジックを理解できました。)」とメールを送った。Bruceは私のマジックという余計な言葉に納得しなかったようで「Takashi. This is not a magic. You should do(これはマジックではないです。貴方は以下の手順でやったらちゃんと出て来るよ。その手順とは.....)」と長文のメールが返って来た。私は「No. I am not saying that you are using the magic but for me it looks like a magic.....(違います。私は貴方がマジックを使ったと言っているのではなく、私にはマジックに見えたと言っただけです.....)」と言ったらやっさと許してくれた。仲良くなると苗字ではなく名前呼び合うのが西洋での習慣だからBruceとかTakashiとかで、お互いを呼び合う。しかし、学問内容の論争は仲が良いとは無関係で、実に激しい。

さて、これ以上の詳細を話すのには一般相対性理論の知識なしに出来ないなので、次章から一般相対性理論の話をしてから、この大事件の詳細に戻る事にする。

第3章 GPS とポケモン GO

先に、ニュートリノが光速を超えているという実験報告に対して、距離を測るのに GPS を使っていると聞いたので、自己矛盾だから笑ってしまったと書いたが、何故笑うような事態になるのかを、今から説明する。GPS とは Global Positioning System の省略形で米軍が艦船や航空機、ミサイルの位置を知る為に作ったものだ。後で、その原理を説明するが既にスマホなどで自分の位置と行きたい所の方向、距離がわかるので便利なものとして使っている人が多いと思う。車のカーナビ (Car Navigation System の省略形) もやはり GPS を使っていて、行った事のないレストランの電話番号か名前を入れると音声でどの道のどの方向に進んで、どこで左折しろとか案内してくれて、それに素直に従えば 10m くらいの精度で目的地に行ける。また、老人に持ってもらうと、今どこにいるのかを確認出来る装置もあるが、これも GPS を使っている。また、携帯電話やスマホを持っていれば、脳梗塞等で急に倒れたとき 119 に電話を掛ける事さえできれば、その後に話せなくなっても、意識を失っても救急車が現場に到着出来て、病院に運んでくれるそうだ。また、アメリカでは出所した、凶悪犯罪者に GPS を持たせて、居場所を常に監視しているそうだ。

GPS は高度約 2 万 km を周期 12 時間で、周回する 24 個の人工衛星からなる。各衛星は精度が極めて正確な原子時計を持っていて、常に自分の正確な「位置と時間」の 4 個の情報を四方八方に放射している。(GPS については英語だが <http://www.gps.gov/> が面白い。) そうすると、地球上のどこにいても最低 4 個以上の衛星からの信号を受信可能となっていることが簡単にわかる。問題は、4 個の GPS 衛星の電波を受けて自分の車のある時刻での位置 (北緯、東経、高度) という 4 つの未知数を如何にして知る

かの方法である。人工衛星からの電波は光速で進むから、ある人工衛星から電波が出発した時間と自分の車はその電波を受信した時間の差に光速を掛ければ、ある人工衛星までの距離が決まる。しかし、この関係式には上に述べた4個の未知数が入ったままである。ところが、図1のように4個の別の人工衛星に対して同じような関係式を立てられるから、変数の数と方程式の数が一致するので、4個の未知数を決定出来る。つまり、自分の位置が正確に分かるという仕掛けである。位置の決定精度はカーナビでの経験から10mくらいであるから、光が10mを進むのに要する1億分の3秒くらいの原子時計の精度が有れば良いが、これは可能である。

一般相対性理論によると重力の強いところの時計はゆっくり進む。GPSの衛星と地上ではその差は約100億分の5、つまりGPSの衛星で1秒が経過したとき地上では正確には、0.9999999995秒しか経過していない。しかし、GPSで60秒(1分)経過したとき地上では正確には59.99999997秒しか経過していない。その差は1億分の3秒だが、これはカーナビが10mの精度を持つのに必要な時間の精度だった。

GPSで600秒(10分)経過すると見かけ上の時計の誤差は1000万分の3秒でカーナビの精度は100mになってしまう。一般相対性理論の効果を入れないで1日も使うと時計の見かけ上の誤差が46マイクロ秒となって、カーナビの精度は14km程度となり全く役に立たなくなる。つまり、この一般相対性理論の効果を補正しないとカーナビは正常に作動しない。

図 1

GPS の説明。正確な時計（原子時計）を各衛星は積んでいる。また、電波は光速で進むので 4 個の未知数＝現在の時刻、東経、北緯、高度に対して 4 個の関係式があるので解くことができる。10m の精度を出すには各衛星に積んである原子時計が、光が 10m を進むのに要する時間 30 ナノ秒（1 億分の 3 秒）の精度があれば良いがこれは現在可能である。図中の地球は NASA によるものである。©中村卓史

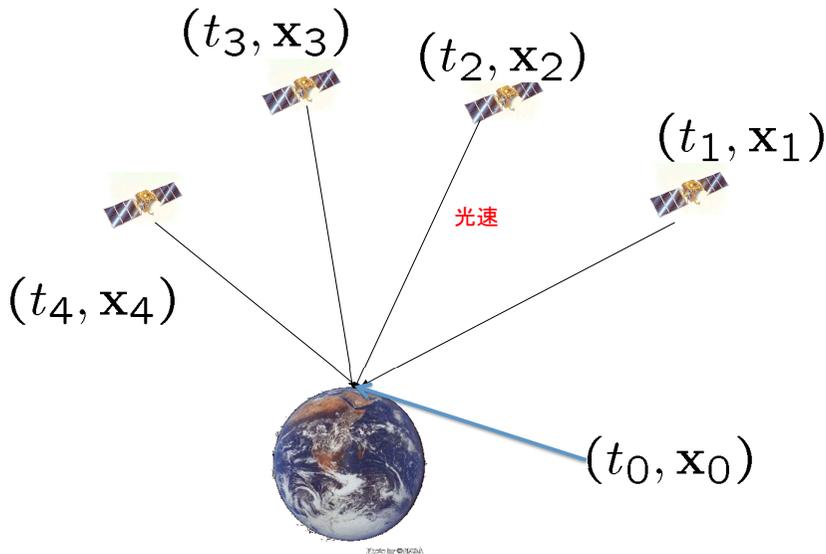
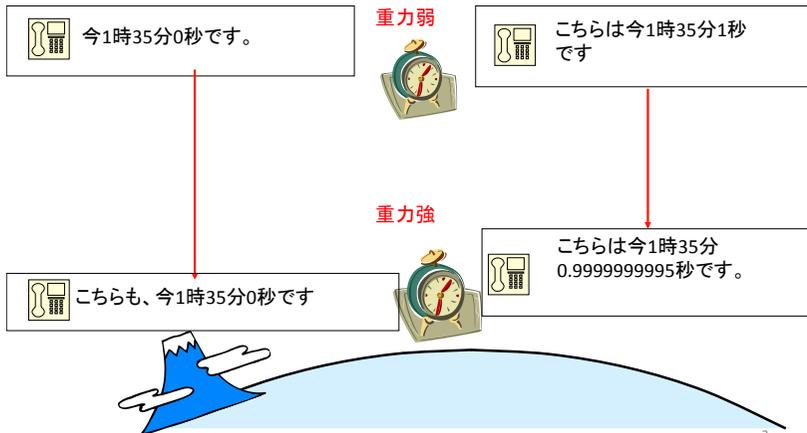


図 2

重力が強い所では時計がゆっくりと進む:©中村卓史



重力の強いところでは時計がゆっくり進むとはどういうことか？時計の精度が重力のせいでは狂うわけではない。同じ性能の時計2つを使ってもこうなる。図2のように地上の原子時計と高度2万 km の GPS の原子時計で、時間比べを行う。上空の GPS 衛星から地上に電話を掛けて、今 1 時 35 分 0 秒だと言う声を地上の人が聞いたときに 1 時 35 分 0 秒だと、2 つの時計を合わせる。次に、先ほどと同じ手続きで GPS から地上に向けて今 1 時 35 分 1 秒だと言った時に、地上では今 1 時 35 分 0.9999999995 秒だという。こんな事は人間業では出来ないが、機械ならできる。GPS は高度 2 万 km にあるから、地上よりは重力が弱い。重力の違いで原子時計の精度が狂う訳ではない。そんな事信じられないと思うかもしれないが、この補正をしないとスマホもカーナビもまともに機能しない。実際我が国の初期のカーナビでは一般相

対性理論の効果を補正していなかったため、まともに機能しなかったそうだ。当たり前である。

「一般相対性理論は我々の生活に何の関係があるのですか？何の関係もないでしょう。ただ学者が難しい式をいじくって楽しんでいるのが一般相対性理論ではないですか！」と多分多くの人が思っていると思うが、今やとんでもない言いがかりで、一般相対性理論抜きではスマホの位置情報サービス機能もカーナビの便利さも全く失われる。また、ポケモン GO で遊ぶこともできなくなる。再び水戸黄門様に登場して頂くと「この一般相対性理論と言う印籠が目に入らぬか！助さん角さん、そんなの自分の生活と関係ないと言っている不埒な人達を懲らしめてやりなさい。」となる。こうも言える。あなたが持っているカーナビ、スマホ、携帯電話の GPS は、あなたが信じようが信じまいが一般相対性理論のおかげでうまく動くのだ。1986 年に相対性理論で有名な某教授が米空軍の外部評価をやって GPS を調べたら、相対性理論を正しく入れていたことを確認したそうだ。実は特殊相対性理論の効果もあるが、ここではそれをやると読者が混乱すると思ってあえて入れなかった。某教授はもちろん特殊相対性理論の方も調べている。もし間違っていたら飛行機が墜落したり、ミサイルがとんでもない所に飛んで来て、甚だ迷惑な事態になるが、そんな可能性はないので、一安心である。

市民講演会では、「そんな私の常識と合わないことは理解出来ない。」と言う質問が有る時があるが、それに対して「貴方の常識が間違っているのだから、そんな常識は捨ててください。今説明したように、このように理解するとカーナビは正常に機能でき

るので、変だと思えても認めざるを得ないので。貴方の常識の方を変えて下さい。」と返事をするにしている。また、時々「一般相対性理論は間違っている。」と言う人がいて、その主張を書いたものを送って来たりするが、そういう人には、貴方の理論に自信が有るのなら是非あなたの理論でカーナビを作る会社を作ってください。でも、私はその会社はすぐに倒産する事を 100% 保証できる。カーナビがまともに動いていることは一般相対性理論が少なくとも地球程度の弱い重力では、正しいことの実験的証明でもある。一般相対性理論が間違っていると言う人は、その人の理論でもカーナビが正常に機能する事を証明しないと、空しい妄想に時間を使っている事になる。昨年 (2015 年)、アインシュタインが 1915 年 11 月 25 日に最終的に今アインシュタイン方程式と呼ばれるものに到達して 100 年が経った。歴史に「もし」と言うのは意味がないと言うが、仮にアインシュタインがいなくても、人類がカーナビを使うようになった時点でアインシュタイン方程式は発見されたと思う。

第 4 章 一般相対性理論

1915 年 11 月 25 日に、現在も使われている基礎方程式にアインシュタインは到達した。それは、 $G_{\mu\nu} = 8\pi G/c^4 T_{\mu\nu}$ と書かれるが $G_{\mu\nu}$ とは、それを記念して昨年 (2015 年) に市民講演会を北は弘前から南は広島まで全国 15 カ所で開催した。主催は JGWC (Japan Gravitational Wave Community: 日本重力波協会: 約 200 名の重力波に関係した研究をしている専門家から構成されている。) で講師謝金はゼロのボランティア活動で、会場費も大学が休みの土曜と日曜を使うのでゼロ。もちろん参加者は無料で聞ける。どうしても必要な講師旅費とポスター代だけ、文部科学省科学研究費補助金新学術領域「重力波天体の多様な観測に

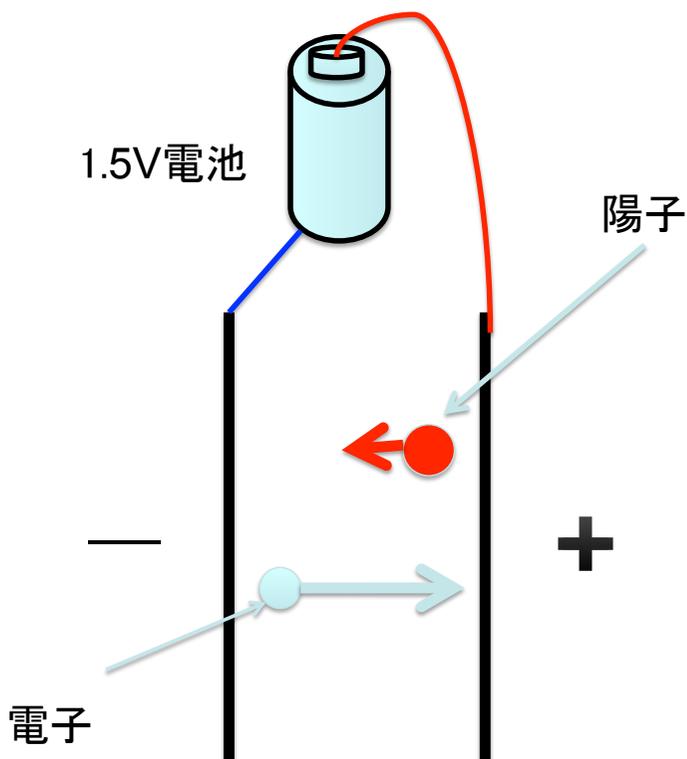
よる宇宙物理学の新展開」(領域代表：中村卓史)と京都大学基礎物理学研究所(所長：佐々木節)が補助した。総計 3500 名程度の参加者があった。この電子本でも、その時に話したことをかなり取り入れているので、聞き逃した人は今その内容に触れる事が出来る。また、可能な限り無料のボランティア精神はここでも貫いた。空気を吸うのがただであるように、人類が獲得した智の宝庫の紹介料も無料でなくてはならない。詳しい内容は次の URL を見る事。

www.gw.hep.osaka-cu.ac.jp/Gmunu100/

等価原理とは何のこと？

さて、一般相対性理論は**等価原理**と**一般相対性原理**を 2 大原理として組み立てられる。

電気による力の場合、陽子と電子では電荷の大きさは等しいが符号は反対なので、同じ電場の中で動く方向は反対になる。ここで電場とは、16 ページの図のように 1.5V の電池のプラスとマイナスの電極を真空中で 1cm の間隔で置いた 2 枚の平行な鉄の平板にコードで繋いだ時に発生する電気の強さの事で 1.5V/cm と表される。この平板の間に陽子を置くと、電荷が正の陽子はマイナスの平板の方に向かうのに対して電荷の大きさは陽子と同じだが符号が負の電子はプラスの平板の方に向かう。また、質量は陽子が電子の 1836 倍程度重いので同じ電場の中では陽子は動きにくい。電子は動き易い。つまり、陽子と電子とでは同じ電場中の運動の方向もその大きさも全く異なる。



さて重力の場合はどうだろうか？ 次のような実験を自分でして欲しい。風もない家の中で真っすぐ立ち右手に金槌（ホッチキスでも可。この方が床を傷つけないので薦める。）、左手に鳥の羽（なければ A4 の紙一枚でも良い。）を両手で同じ高さに持って、同時に手を離し、どちらが先に落ちるかを数回やる。ここで実験の前に次の 3 択問題の答を書いてから実験を始めること。

三択問題

- A：金槌の方が早く床に落ちる。
- B：鳥の羽の方が早く床に落ちる。
- C：両方とも同時に床に落ちる。

ここで実験の為に 20 分程休憩

皆さん、結果は「A」だったよね。

さて、同じ実験を月の表面でやった動画がある。

今度も映像を見る前に 3 択問題の答を書くこと。URL は

http://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/lunar/apollo_15_feather_drop.html

だ。これであまくいかない時は、「Feather & Hammer Drop on Moon youtube」で探して見て欲しい。これは NASA の映像 で Apollo 15 で月面に降り立った David Scott 宇宙飛行士が実験を行っている。この場合右手にハンマー、左手に鳥の羽を持っている。英語だから解りにくいかもしれないので、何度も見ること。(また動画は 8.6MB もあるので、読み込みに時間が掛かる。ダウンロードして、それを見る方が良いかもしれない。)

ここでビデオ鑑賞の為に 20 分程休憩

どうだった？正解は「C」だったよね。正解の人はいた？私も家族に見せたが、みんな目を丸くしてびっくりしていた。私自身がこれを見たのはずいぶん前だ。米国のアポロ計画で宇宙飛行士が月に何回も行った 1970 年代だったから、私も 20 代だったが、物理を勉強していたので「C」と言う正解は知っていたが、実際に見てみるとやはり大変感動した。英語で言う「Seeing is believing」(見る事は信じることである)という諺通りだ。じゃ、何故地球では答えは「A」になるのだろうか？月と地球の大きな違いは空気が有るかないかと、重力の強さが違って、月の重力加速度は地球の 17%くらいだから月では動き易いけどそれは質的な変化を生じない。地球でも本来は月と同じ結果になるべきだが、

空気による抵抗が金槌より鳥の羽の方が大きいいため金槌が先に落ちる結果になったのだ。直感的には質量の大きいものの方がそれに働く重力が大きいので早く落ちると思うかもしれないが、同時に質量の大きいものは、例えば、トラックを後ろから一人で押して動かすのと、自転車を押して動かすのでは質量の軽い自転車の方が楽だ。トラックは多分一人では押しても動かない。だから、質量が大きいものには大きな重力が掛かるけど動かしにくくもあるのだ。その結果質量によらずに重力場では同じ運動をするようになるのだ。月面での実験はこれを明確に示したのである。

これは、先に示した、電場の中での陽子と電子の運動と全く異なる。この場合既に言ったように動く方向も早さも全く異なるのである。これに対して、重力場中での運動は物質の種類、質量に依存しない。これは現在1兆分の1くらいの精度で実験的に確かめられている。難しい言葉では慣性質量と重力質量が1兆分の1くらいの精度で物質が何であるかに依存せずに一致すると言う。これは極めて不思議な現象である。そうだとすると、アインシュタインはどんな物質（人間）でも自由落下すると重力の効果はなくなり無重力になると気がついた。有名なエレベーターの自由落下の思考実験がある。エレベーターに乗り、仮にエレベーターを吊っているロープを切ったら、エレベーターは自由落下をはじめ、エレベーターの中では無重力状態になるのではないか？この実験は現実には、危険なので実行は出来ないが、ジェット機を使えば現実に体験出来る。Zero G という会社がある。この会社を推薦するつもりは特にないが、ジェット機を高度 9000m

<https://www.gozerog.com>

位まで上昇させた後に、エンジンを止めるとしばらくは上昇をす

るが、高度 1 万 m 位から落下をはじめ。そして、9000m くらいにまで落ちた時にエンジンを再噴射させる。エンジンを止めてから再噴射するまでの約 25 秒間無重力を楽しめる。紹介したサイトには、無重力を楽しんでいる動画がいくつかあるので見てみるのを薦める。

もう一度いうが、これは極めて不思議な現象である。例えば電気を考えよう。この Zero G を体験できるジェット機に懐中電灯を持って入っても懐中電灯はそのまま普通に光を出すはずである。つまり電気の力はなくなる。しかし、重力の効果は消えてしまうのである。また、国際宇宙ステーションでも無重力状態を体験できる。この場合国際宇宙ステーションは止まっておらずに地球の周りを 7.67km/s 位の高速で周回しているので、それによる遠心力と重力が釣り合って無重力状態になっているのである。

自由落下すると重力はなくなる。これは加速度系では重力が消えることを意味する。国際宇宙ステーションにいる宇宙飛行士も無重力。この場合地球が及ぼす重力が真空の為、なくなったのではない。宇宙ステーションが高度 400km を秒速 7.67km で地球の周り回っているため遠心力と重力が釣り合って無重力になった。周期は 92.5 分だから地球の自転周期より 16 倍程度短い。以下の URL に無重力状態の面白さの映像があるので楽しんで欲しい。

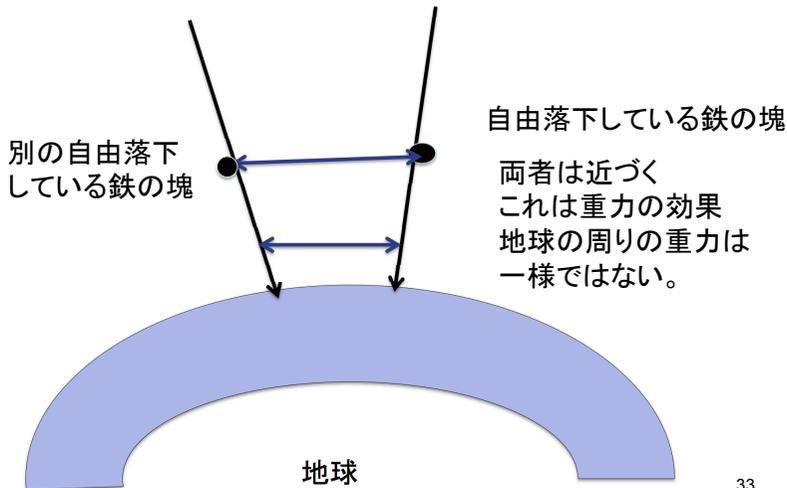
<http://www.nasa.gov/microgravity>

自由落下系や回転系では無重力状態になる。と言う事は、重力は物理量ではないのではないか？これに対して電気力は自由落下系や回転系でも消えないので物理量である。等価原理とは、「重力の効果は適当な系、例えば 自由落下系とか回転している系では、物質によらずにゼロにできる。すなわち、無重力状態にできる事を言う。」(等価原理は難しく言うと慣性質量と重力質量が等しいことに由来する。その結果、座標系に依存する慣性力と重力は局所的には区別できないことを意味する。)つまり、重力は、遠心力とかエレベーターが急に上がった時に感じる下向きの見かけの力と区別出来ない。しかし、一般にはこのような事が出来るのはごく狭い範囲だけである。

図 3

重力の本質は異なる場所での重力の差。これは、適当な座標系をとってもゼロにできない。 :©中村卓史

**何が重力の効果を実現するのか？
それは、異なる場所の重力の差である。**



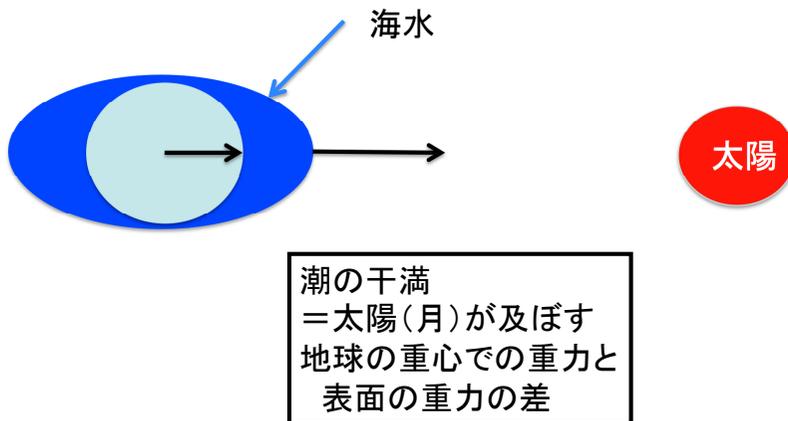
33

何が重力の効果を座標系によらずに表すのか？ それは、異なる場所の重力の差である。図3のように、上空から自由落下している鉄の塊を一つ考える。これに対してすぐ近くで自由落下している別の鉄の塊を考える。両者は近づくがこれは重力が非一様である為の効果である。そして、両者が近づくと言うのはどんな座標系を使っても同じである。つまり、広い領域で考えると地球の周りの重力は一様ではない。解りやすく言えば、日本での重力の方向と南米のアルゼンチンでの重力の方向はほぼ正反対である。

図 4

海水面の変化は重力の差＝潮汐力で起こる。：©中村卓史

重力の差＝潮汐力



では重力の差とは具体的には何だと呼ばれているのか？それは潮汐力である。海面の上下を引き起こし、大潮、小潮として知られているものである。海面の上下を引き起こす天体には太陽と月があるが、簡単の為に太陽の効果のみをまず考えよう。地球は太陽の重力下で太陽の周りを回っている。詳しくは地球の重心で

の太陽の重力と地球の太陽の周りの回転による遠心力が釣り合っている。しかし、地球上で太陽に近い部分では太陽による重力はより強くなるとともに、遠心力も減るので太陽の方に相対的に引きつけられる。液体である海水は、この力の差に敏感で図4のように太陽の方に少し膨らむ。一方地球の中心に対して太陽から遠い部分では、遠心力は増えるとともに太陽の重力は弱まるので、やはり海面が膨らむ。従って図4のようになる。

月の質量は小さいけど太陽より地球に近いので潮汐に及ぼす効果は約2倍だ。したがって満月と新月の時には太陽の効果と月の効果が加わり海面の膨らみが増えて大潮と言う現象になる。新月と満月の中間辺りでは両者の効果が打ち消し合う事になり、小潮となるのである。

アインシュタイン理論(一般相対性理論)

アインシュタインの考え ~その1

重力場中での粒子の運動は粒子を作っている物質の種類(例えば、金槌か羽毛か)と質量に依存しない。ということは何か別の原因が重力場中での粒子の運動を決めている。それは、空間の性質ではないのか? その為には数学者リーマンが何の役に立つかは考えずに作ったリーマン幾何学と呼ばれる非ユークリッド幾何学を使ったら良いのではないか? つまり、空間が非ユークリッド幾何学に従っているせいではないのか?

アインシュタインの考え ~その2

リーマン幾何学によると、曲がった空間の中で最短の距離(測地線と呼ばれる)で全ての粒子は運動する。これは等価原理と整合している。その運動を我々は重力と感じているのだ。だから、

運動は粒子を作っている物質の種類と粒子の質量に依存しないのだ。局所的には適当な座標変換をすれば重力は消せる。しかし、大局的には消せない。その事を表すのが潮汐力を一般化したリーマンテンソルなのだ。アインシュタイン方程式はリーマンテンソルを使って書かれ以下のようなになる：注意（ここで、式を見ると鳥肌が立つ人は以下の式を模様だと見なすこと）：

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

ここで $G_{\mu\nu}$ はアインシュタインテンソルと呼ばれるリーマンテンソル(潮汐力)から作られる非ユークリッド幾何学の量で、 $T_{\mu\nu}$ は物質のエネルギー密度や運動量密度を表す量である。また、同じ G が使われて少しややこしいかもしれないが G は $G_{\mu\nu}$ とは全く違いニュートンの万有引力定数であり c は光速である。

アインシュタインはこの方程式に1915年11月25日に到達し、現在、アインシュタイン方程式と呼ばれ、一般相対性理論の基礎方程式である。簡単にはリーマン幾何学と言う非ユークリッド幾何学の量が物質のエネルギー運動量で決定される事を主張している。解りやすい言い方をすると、物質が存在すると空間は非ユークリッド幾何学に支配され曲がることを表している。さらに、アインシュタイン方程式は自動的に「一般相対性原理=いかなる座標系を使っても物理法則は同じ形式で書かれる」を満たしている。一般相対性原理は簡単に言えば物理学での民主主義で、あらゆる人間が平等であるように、あらゆる座標系が平等で特別な座標系がないことを主張している。つまり、絶対権力を持った暴君と言う特別な人が今や存在するのは不当であると考えられているように、物理法則が特別な座標でのみ成り立つ事を否定してい

ると言えば少しは解ってもらえるのではないだろうか。

一般相対性理論と関係した学者の研究は全てこのアインシュタイン方程式から始まり、数学的に大変な作業が必要だが、この電子本では、もちろんその詳細には、これ以降一切触れずに高校生にも解るレベルでの説明に徹する。不満な大学生は一般相対性理論の教科書は何種類も出回っているので、気にいったものを図書館で借りて勉学を進めて貰いたい。量子力学でもそうだが、なかなか1冊の教科書では解らないので何冊か読んで、自分に合うのを探るのが極意だ。

「物質があると空間が曲がっている？ それって本当？信じられない！」と言う読者も多いであろう。実は我々の地球の周りの空間もわずかではあるが、曲がっている事が実験的に確かめられている。次章ではその話をしよう。

第5章 地球はわずかに曲がった空間の中にいる

ある理論を信じられない人を信じさせるには、実験でその理論の証拠を示すのが一つの方法である。じゃ、実験してみようと言うのが、米国が2004年に打ち上げた Gravity Probe B という衛星である。正確なコマを、地球を周回する衛星に積んで1年間経つとコマの軸が遠くの星に対して1000分の1.8度ずれるというのが一般相対性理論の予想である。

空間が平坦でユークリッド幾何学に従うとするとこのようなことは起こらない。どういう事かと言うと、次元を2つ下げて2次元空間で話すのが解りやすい。平面を考える。この中で三角形を考えると中学の頃から習ったように三角形の内角の和は180度となる。これがユークリッド幾何学の大きな特徴である。このことを別の方法で特徴つけるのがリーマン幾何学の考え方であ

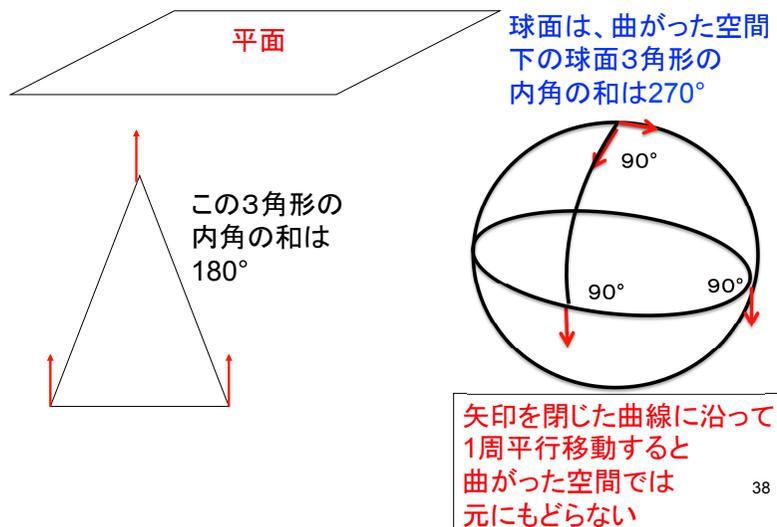
る。三角形の頂点に図5の左のように赤い矢印を付ける。(正確にはベクトルのことであるが、それを説明しだすと難しくなりすぎるので、ここでは矢印と言っている。) この矢印を三角形の辺に沿って、矢印の方向と辺の傾きの成す角が変わらないように平行移動すると、矢印は左下に来る。今度は三角形の底辺に沿って、同じ事を実行すると右下のような矢印になる。次に右側の辺に沿って出発点まで戻ると出発点の矢印と同じものになる。これがユークリッド空間の大きな特徴で、これは三角形だけでなく任意の閉曲線に対して成り立つ。

図 5

空間が曲がっているのはどうしたら確かめられるか？

:©中村卓史

3次元空間が曲がっているというのは判りにくいので、2次元空間で考える



一方、球面はやはり2次元空間の一種で明らかに曲がっているが、球面内に住んでいる生物がいたとすると、自分の住んでいる

空間が、曲がっているかどうかは外から見る事が出来ないから解らない。これは我々が今置かれた状況と同じである。我々が住んでいる空間が非ユークリッド空間かどうかをどのようにして知る事が出来るのかを球面に住んでいる生物の立場に立って考えなくては行けない。図5の右側の球面上の三角形は外から見ると3つの円弧からなる。そこで先ほどと同じようにして赤い矢印をこの円弧に沿って平行移動して元に戻すと、どうなるかを調べる。平行移動するとは矢印と円弧の接線の成す角を一定にしたままに円弧に沿って移動する事である。まず球面状の三角形の頂点から下に向いた矢印を左下まで平行移動すると左下のようなになる。次に底面に沿って右端まで平行移動すると一番右側まで移動される。さらに、右側の辺に沿って平行移動して元にもどる。すると、今度は元の矢印と全く異なる事がわかる。

これは球面状のどんな閉曲線でも同じ様になる事を示せる。これはユークリッド空間の性質とは全く異なるので、2次元球面は非ユークリッド空間だと言う事を、球面に住んでいる生物にも知る方法があるのだ。そもそもこの球面三角形の内角の和は270度で180度になっていないから、それを調べたら済むではないかという読者がいるかもしれないが、非常に大きな半径の球面を考え、そこで小さな三角形を考えれば、球面三角形の内角の和は180度に近くなるので、そう簡単にはわからない。内角の和を270度にしたのは、解りやすくしただけである。

米国が2004年に打ち上げたGravity Probe Bと言う衛星では磁気浮上効果で浮かせたコマを、地球を周回する衛星に積む。1年間経つと矢印の代わりにコマの軸が遠くの星に対して1000分の1.83度ずれるというアインシュタイン理論の予想を0.07%の

精度で確認した。地球が回転している為に周りの空間を引きずり回すという **Lense-Thirring** 効果は、1年に0.0000114度が理論値だが、これは5%の精度で確認された。この効果は一般相対性理論の大学の理学部の講義で最初の頃に教わる事。しかし、実験的検証はなかった。次のURLは**Gravity Probe B**の打ち上げのビデオで、デルタロケットは静止軌道に4トンの衛星を打ち上げ可能な大型ロケットである。

http://einstein.stanford.edu/Media/Launch_Video_Flash.html

ここでも米国の底力を見る思いがしてならない。我が国で同じ提案をしたら、そんな教科書に載っている事を調べて何の意味があるのかと言われて却下されるだろう。でも米国の態度は違う。実験で検証されていない以上やってみないと解らないではないかと言う実証主義である。確認する事に意味があるし、ひょっとしたら大発見が有るかもしれないと言うのだ。全くもってその通りで、この快挙を聞いてもらいたい人が何人かいる。これも国民性の差だろうか？新しい大陸でリスクを承知で新国家を作った国民と、ずっと同じ場所に住んでいた国民との考え方の差かなと思う。どちらも正しい生き方だろうが、科学に関する限りは米国のようにリスクを恐れない考え方が必要だと思う。

この成果は重大である、我々地球も明らかに非ユークリッド空間である事が証明された。遠くのブラックホール周辺とか宇宙全体ならまだしも、自分が住んでいる地球ですら非ユークリッド空間である事が解ったのだ。これに文句のある人は自分の理論で**Gravity Probe B**の実験結果を説明してもらいたい。それから「先

生、三角形の内角の和は正確には 180 度ではないと中村さんの電子本に書いてありました」などと言って高校の数学の先生を困らせないようにお願いしておく。ユークリッド幾何学を仮定すれば三角形の内角の和は 180 度である事には変更がない。

重力とは何か？

改めて、問おう！重力とは何か？ 実は科学者ですら、これへの決定的な解答を持ち合わせていない。その基本的な理由は、解答は素粒子の弦理論の中にあると見られているが、弦が実際に存在すると言う証拠は一つもない。「弦理論とは何のことですか？」と言う質問が出て来そうであるが、ここではとにかく本質的な重力の起源に対する解答は、今はまだないとだけ言っておこう。

今までアインシュタイン理論で良いと言ったではないかと迫られそうだが、アインシュタイン理論には量子力学、即ちプランク定数が入っていない。量子力学を入れないと実は水素原子すら存在出来ない。古典的には水素原子は陽子の周りを電子が運動している訳だが、それだと電子が加速度運動をするために電磁波を放射して 1 兆分の 1 秒位で中心の陽子に落下してしまい水素原子は存在不可能である。しかし、現実には量子力学の御陰でそんな悲惨な事態にはなっていない。私は実はブラックホールも古典的に考えた水素原子のようなものではないかと思っている。

さて、現在、量子重力理論は完成からは程遠いので、古典的なアインシュタイン理論に戻ろう。「重力とは何か？」は、すでにいくつか説明したが、いまからさらに直感的な説明を試みる。我々が住んでいる時間と空間（4次元時空と呼ばれる）をトランポリンの2次元面と見なそう。以下の URL を見ている事を前提

に話を進める。

<https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/b8/Trampoline.jpg>

トランポリンに人が乗るとその面が変形して沈む現象を重力だと例えることができる。するとその近辺に粒子を置くと動き出す。具体的には一番右側の人の足の下の面が沈んでいる。この近くに小さなピンポン玉を置いたら落ち出す。これを重力だと我々は感じているが、それは単に時間と空間（4次元時空）が歪んだだけなのだ。一方誰も乗っていない左側では面は平らなのでピンポン玉を置いても何も変化がなく動かない。これを我々は重力がないと感じているのだ。そして時間と空間（4次元時空）は平坦だと呼ばれる。

一般相対性理論は 100%正しいか？

アインシュタイン方程式は弱い重力場の極限ではニュートン重力が出てくるが次の近似では

- 1) 太陽の端を通る光の曲がり
- 2) 水星の近日点移動
- 3) レーダーエコーの時間の遅れ

等の一般相対性理論に特有の効果が予言されていた。それらの精度は現在驚くべきレベルに達している。

1) 光の曲がりには長基線干渉計で 0.01%の精度で確認されている。つまり、遠くの星の光が太陽の端を通る時に一般相対性理論理論の予想値は真っ直ぐから角度で 1.7505 秒ずれる。

2) 水星の近日点移動は 0.01%の精度で確認されている。

一般相対性理論の予言は 42.98 秒/世紀である。

3) レーダーエコーの時間の遅れは 2002 年に Cassini 衛星で 0.0023%の精度で確認されている。

でも、これらでは重力の強さを表す量 $=2GM/R/c^2$ は百万分の 1 $=0.000001$ 程度で大変小さい。(ここで G, M, R, c はそれぞれ重力定数、重力源の質量、重力源からの距離と光速である。) つまり、弱い重力場でのみアインシュタイン理論の正しさが実験的に確認されているのが現状である。重力の強さを表す量 $=2GM/R/c^2$ が、1 に近いブラックホールや中性子星近傍での強い重力場でのアインシュタイン理論の正しさは実験・観測的に確認されていない。それが、これからの重要なテーマなのである。

第 6 章 中性子星が存在する (学生が発見した)

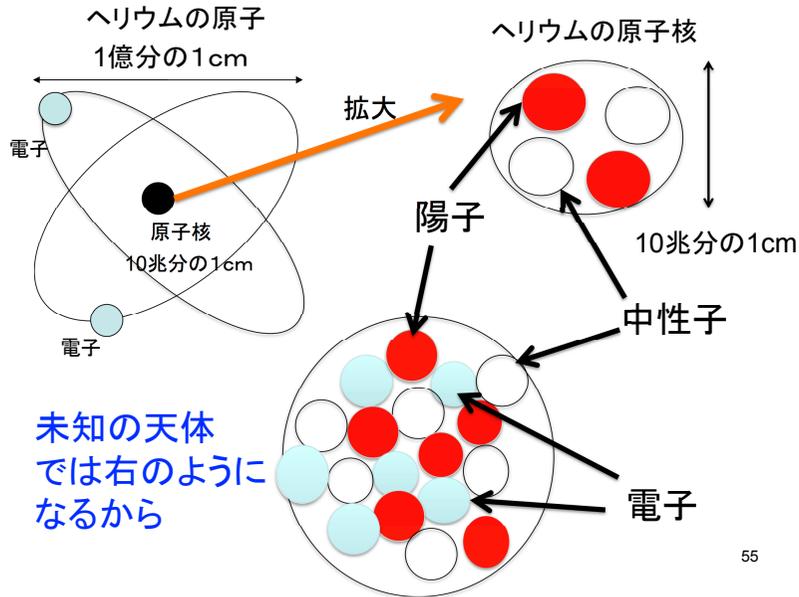
1967 年 11 月 28 日ケンブリッジ大学の学生ベルは、指導教授 (ヒューウイシュ) に与えられた星が瞬く現象の電波の場合の研究をしていたところ、宇宙のある方向から規則的な電波がやって来ていることを見つけた。周期は 1.3373011 秒の規則正しい電波パルスで後に電波パルサー (Pulsar = Pulsating Radio Source) とベルによって命名された。最初は冗談交じりに宇宙人からの通信かもしれないと言われていたが、それは違うことが分かった。理由は、宇宙の全く反対の方向からも似たような電波パルサーが発見されたからである。現在は 2000 個以上の電波パルサーが発見されていて周期の長いのは 10 秒程度で一番短いのは 1.4 ミリ秒である。周期はいろいろな議論から未知の天体の自転周期であろうということになった。すると、1 秒間に 714 回転もする天体は何か? 例えば、スケーターはスケート靴を中心にしてくるく

ると回る、目の回るような技を見せてくれるが、1秒間に714回転もできない。地上の重力加速度の10万倍もの遠心力で体がバラバラになるからである。この未知の天体の場合、極めて強い重力で地上の重力加速度の10万倍もの遠心力に打ち勝つ必要があり、これは自動的に超高密度天体であることを意味する。重力が遠心力より大きくなないと、天体はバラバラになってしまうから未知の天体の平均密度が、6000万トン/cm³より十分大きくないといけない事が簡単な式からわかる。これを満足して我々が知っているものは原子核の密度=3億トン/cm³である。星を作っているヘリウムや炭素等では陽子の数：中性子の数：電子の数=1:1:1になっている。普通、電子は原子核のはるか外にあるが、このような高密度では電子と陽子が接する事になる。

もう少し詳しく説明しよう。例えば、ヘリウムの原子は1億分の1cmくらいの大きさで、図6の左上のような構造をしている。2個の電子が中心にあるヘリウムの原子核の周りを回っている。このサイズが1億分の1cmくらいなのである。一方、原子核のサイズは10兆分の1cmくらいで、原子全体の大きさの10万分の1くらいである。この原子核の中を詳しく見たのが図6の右上の図で、ヘリウムの原子核は2つの陽子と2つの中性子が、湯川秀樹が発見した核力という強い力で10兆分の1cmくらいの狭いところに閉じ込められている。陽子は正の電荷を持ち中性子は電氣的には中性で、電子は陽子の電荷と大きさは同じだが、符号が反対の負の電荷を持っている。

図 6

原子核と中性子星の違い:©中村卓史



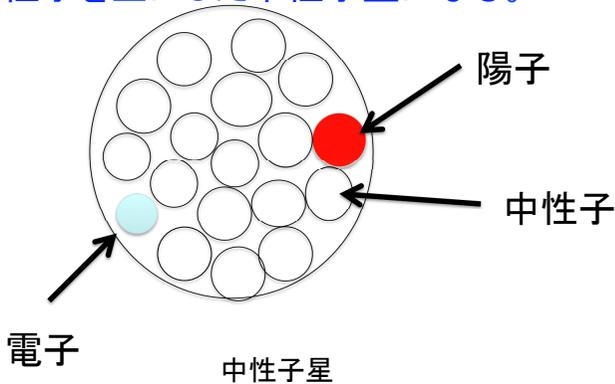
55

さて、未知の天体の密度は原子核の密度と同じくらいなので、図6の左上のような原子核と電子の間に大きな隙間があるような構造は採れない。そうすると図6の下のような状況にならざるを得ない。この結果、電子と陽子がぶつかる事が頻繁に起こる。電子と陽子が合体すると中性子になることが知られているので未知の天体は図7のようにならざるを得ない。つまり中性子を主体にした星=中性子星となるのである。科学者の推論の力はすごいと解ってもらえるだろうか？ 遠心力と重力の大小だけから、ベルが発見したパルサーは中性子星だと結論を出してしまうのだ。

図 7

中性子星の内部:©中村卓史

未知の天体は陽子が電子を捕獲して中性子になり、
中性子を主にした中性子星になる。



つまり、電波パルサーの周期の観測だけから電波パルサーは中性子星という全く新しい天体の発見だとなったのだ。このような可能性はチャドウィックが 1932 年に中性子を発見したすぐ後の 1934 年にバーデとツヴィツキーが予言していた。このような高密度での物質の状態は今もよく分かっていない。しかし、半径は 10km くらいで質量は太陽質量程度ということは解っている。すると、中性子星の表面から脱出するには光速の 30% くらいの速度 10 万 km/s が必要なので、中性子星の表面は極めて強い重力、すなわち地球表面の重力加速度の約 1000 億倍であり、一般相対性理論が必要な初の天体の発見となった。中性子星は極めて強い磁場（約 1 兆ガウス又は約 1 億テスラで地磁気の約 1 兆倍）を持っていて、それが原因で強力なビーム状の電波を出しており、パルサーとして見えると考えられている。しかし、その詳細は未

だに良くは解っていないので、今も盛んに研究されている。

電波パルサーの発見では数々の教訓と逸話が存在する。

- 1) 大学院生が偶然に世紀の大発見をした。
- 2) 1974年にベルの先生ヒューウィッシュがノーベル賞を貰った。ベル自身はノーベル賞を貰わなかったが、数々の賞を貰った。
- 3) 「電波パルサー＝自転している中性子星」は、捜そうとしてではなく、偶然に見つかった。
- 3) 理論家の30年以上前の予言は正しかったが理論は直ぐに検証されるとは限らない。
- 4) 自然は我々の想像を超えている。つまり、中性子星が電波パルスを出すとは誰も予言できなかった。

ベルは2000年頃に京都大学に来て学生相手に講演をしてくれた。そのとき、ある人が「あなた自身がノーベル賞を貰えなかったのを、どう思っていますか？」と小心ものの私にはとても出来ない質問をした。それに対する彼女の返答は「ノーベル賞を貰うと一度だけストックホルムで、大パーティーがあります。でも私はそれ以外の数々の賞をもらい、沢山のパーティーに出席できて幸せでした。」であった。私は「うーん」となった。何と言う、うまい返事で、何と言う強烈な皮肉だろうか。さすがイギリス人だと感心した。

第7章 連星パルサーが存在する

1974年頃には約100個の電波パルサーが見つかった。

パルサーの自転周期は時間とともに増大する。電波はエネルギーをパルサーから持ち去るので、ゆっくり自転するようになるからである。マサチューセッツ大学のテーラー教授と大学院生ハルスはアレシボ（プエルトリコ）にある、世界最大の口径 300m の電波望遠鏡でさらにパルサーを探していた。1974 年、7 月 2 日、12 日、8 月 25 日、9 月 1 日、2 日の観測で自転周期が増大したり、減少する不思議なパルサー PSR1913+16 を発見した。パルサーの名前は、その天球上での方向で決められる。それは地球上の位置を東経と北緯で表すようなもので、例えば、明石市は東経 135 度北緯 35 度にある都市と言える。これに対応するものが赤経、赤緯で 360 度を 24 時間と対応させると赤経 19 時 13 分、赤緯 16 度にある電波パルサーと言う意味である。

自転周期が長くなるのは理解出来るが、自転周期が短くなるのは、どこかからエネルギーをもらっているのか？ それとも観測装置の故障か？ニュートリノが光速を超えると言う間違っただ結果を実験装置を詳しく調べもせずに発表した人達と違って、彼らは発表する前に、最初に装置や解析法に問題がないかを徹底的に調べた。しかし、問題がない事が判明した。じゃ、何故自転周期が短くなるのだ???

PSR1913+16 はどこかからエネルギーをもらったり、与えたりしているのだろうか？

答えはあつけない所からやって来た。ドップラー効果と言うのを聞いた事有るよね。パトカーや救急車が近づいてくる時にはサイレンの音が高く聞こえ、遠ざかると低く聞こえる言う現象だ。高い音は振動数が大きい、低い音は振動数が小さいのに対応する。振動数の逆数は周期だから、近づいてくる時には周期が短くなり、

遠ざかる時には周期が長くなる。つまり PSR1913+16 は初めて見つかった連星パルサーだったのだ。連星だとお互いの周りを回るので、我々の方向に近づく時と遠ざかる時がある。

普通の太陽のような星は連星が多いことが知られているので、連星パルサーがあっても不思議ではないが、それまでの 100 個近くのパルサーは全て単独星であった。連星はケプラーの法則にしたがって楕円運動をする。だから近づく時にはドップラー効果でパルサーの自転周期が短く見え、遠ざかる時には自転周期は長くみえる。周期の変化量はパルサーの速度に比例するので、速度が解る。速度に時間を掛ければ長さになるから連星のサイズが解る。その結果、連星の広がり太陽の半径 70 万 km くらい、公転周期は 8 時間くらいで、軌道は円ではなく楕円でその離心率は 0.6 くらい。ここで離心率とは円からのずれを表す数値で円の場合は 0 で直線に近い細長い楕円の場合は 1 に近づく。だから 0.6 と言うのは長軸と短軸の比が 0.8 なので結構、円からずれている。この情報は 1975 年に発表された。

<http://ads.nao.ac.jp/full/1975ApJ...195L..51H>

これを読んで全世界の一般相対性理論の研究者が、興奮した。何故だろうか？パルサーの周期は原子時計と比較できるくらい正確なものがあって、例えば PSR1917+21 の場合、パルス周期が 1.55780646819794 ミリ秒と決まっており 15 桁の精度がある。また、PSR1913+16 の場合、相手もパルサーと考えられているので両星の間隔が太陽半径程度だから、自然が与えてくれた一般相対性理論の実験場なのだ。15 年間のデータを解析した結果、テイラーとワイスバーグは以下の URL に結果を発表した。

<http://ads.nao.ac.jp/full/1989ApJ...345..434T>

それによると、東経に対応する赤経は 24 時間を 360 度に対応させる単位で 19 時 15 分 28 秒.00018(15)、北緯に対応する赤緯は 16 度 6 分 27 秒.0043(3)。PSR1913+16 は運動している事も解っていて、赤経方向には -0.0032 ± 0.0018 秒/年、赤緯方向には 0.0012 ± 0.0020 秒/年、パルス周期をその逆数の振動数で表すと $16.940539303295(2)$ Hz、振動数の変化率は $-2.47583 \times 10^{-15}/s^2$ 、またテイラーによると（文献は Taylor, J.H. Testing relativistic gravity with binary and millisecond pulsars. In R.J.Gliser, C.N. Kozameh and O.M. Moreschi(eds) General Relativity and Gravitation 1992 Insitute of Physics Publishing Bristol and Philadelphia, 291page) 軌道の離心率 $e=0.6171308(6)$ 、太陽系の水星の近日点移動に対応する近伴星点移動率は 1 年に $4.226621(6)$ 度、重力と横ドップラー効果による時間の遅れの振幅は $4.295(2)$ ミリ秒、軌道周期は $27906.9807804(6)$ 秒、軌道周期の減少率は $-2.422(2) \times 10^{-12}$ 秒/秒と極めて正確にわかった。個々の数字での最後の()中の数字は最後の桁の誤差を表している。横ドップラー効果とは視線と直角に運動していても起こる特殊相対性理論特有のドップラー効果である。とにかく色々なものが正確に決まっているのと同時に、例えば近日点移動は太陽系の水星の場合 1 世紀に角度にして 42.98 秒だったけれど、何と PSR1913+16 の場合 1 年で $4.226621(6)$ 度と桁違いの大きさである。この中の近伴星点移動と重力と横ドップラー効果による時間の遅れを使うと両星の質量が決まり、パルサーの方は $1.4411(7)$ 倍の太陽質量、伴星の方は $1.3874(7)$ 倍の太陽

質量と決まった。伴星も中性子星と考えられている。前章で中性子星はパルサーとして発見され、その質量は太陽質量程度だと書いたが、それはこれに基づいていた。重さ(質量)を測るのは日常生活では簡単な事だが、電波パルサーの質量を測るのは簡単な事ではなく、それ自体が大きな研究テーマになるのだ。中性子連星 PSR1913+16 の質量が測られたのは人類最初の快挙であった。

それ以外の大発見として、公転周期が1年間に 76.43 マイクロ秒短くなっていることが分かった。これは、何を意味するのか？それは重力波の存在の間接的な証明と言われている。ケプラーの法則によると公転周期の2乗は軌道長半径の3乗に比例するので、両中性子星が近づいていることになる。

重力波とは何か？

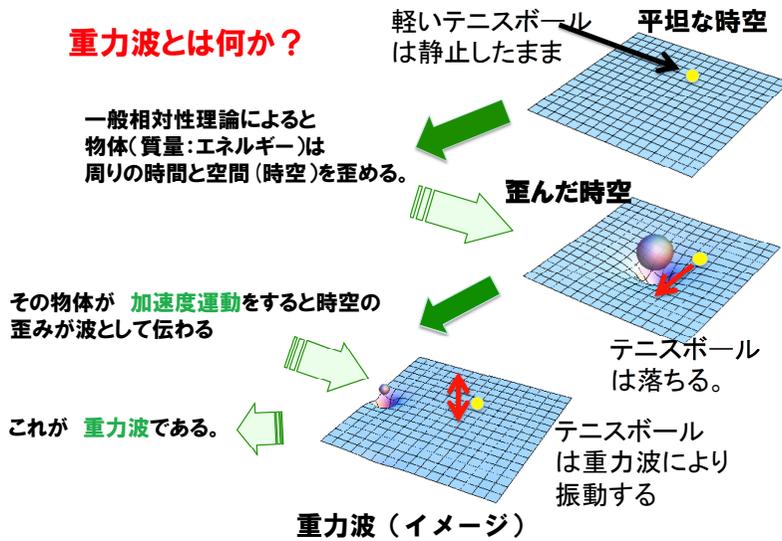
重力とは何か？これについては既に例え話をした。我々が住んでいる時間と空間(4次元)をトランポリンの2次元面と見なそう。トランポリンに人が乗るとその面が変形して沈む現象を重力だと例えることができ、そこにボールを置くと落ちる現象を重力と例えた。そこで、乗っている人が2人になってグルグルお互いの周りを回転するとどうなるだろうか？人間では上手に回る事は難しいが以下の図9のようにする。

動画の方が感じをつかみ易いので以下の URL で大阪市立大学の神田教授作の動画を見て欲しい。

<http://www.gw.hep.osaka-cu.ac.jp/GRforPublic/files/BinWave.mp4>

図 9

一般相対性理論によると物体（質量：エネルギー）は、周りの時間と空間(時空)を歪める。その物体が回転して加速度運動をすると時空の歪みが波として伝わるこれが重力波である：©神田展行



70

以上で重力波が何かを大凡理解してもらったとすると、PSR1913+16 の観測で重力波の存在の間接的証明がなされたと言える。理屈はこうだ。電気を持ったものが加速度運動すると電波が放射される。電波は真空中を光速で進む横波で、電場と磁場が周期的に変化する。電気を持たないものが加速度運動したら電波は放射されないが、重力波という波が放射されるというのを一般相対性理論にもとづいてアインシュタインが 1916 年に予言した。重力波も真空中を光速で進む横波で、“重力”(潮汐力)が周期的に変化する。また、重力波は正のエネルギーを持っているの

で、放射体はエネルギーを失う。PSR1913+16 は連星系なので加速度運動をしている。すると重力波が放射されている。重力波は正のエネルギーを持っているので連星系はエネルギーを失う。つまり、連星は近づき周期は短くなる。アインシュタインの一般相対性理論による理論計算によると 1 年間に 76.37 マイクロ秒公転周期が短くなるはずである。先に得られた観測値 76.43 マイクロ秒との誤差はわずかに 0.1% 程度である。

この業績でハルスとテイラーは 1993 年にノーベル物理学賞を受賞した。受賞理由は

"for the discovery of a new type of pulsar, a discovery that has opened up new possibilities for the study of gravitation"

で重力波の言葉はないが、重力波そのものを見たのではなく、その影響によるパルサーの軌道周期の変化から間接的に重力波の存在を確かめたからであろう。直接検出の時の受賞理由を残して置いたのだと思う。ベルの時との大きな違いは、今度は大学院生も貰った。ここで注意をしておくが、パルサーの自転は重力波のエネルギー源とはなっていない。あくまでも公転運動のエネルギーが重力波のエネルギー源なのだ。パルサーの自転に伴うエネルギーは電波のエネルギー源なのだ。

ハルスは実は PSR1913+16 の発見後すぐに研究分野をプラズマ物理に変更した。ノーベル賞を取りそうな人が分野を変えるなどと言う事は日本では考えられないかもしれないが、受賞講演で次のように述べている。

"In particular, I had the classic problem of how a two-career couple could stay in reasonable geographical proximity, since my friend, Jeanne Kuhlman, was then doing her graduate work at the University of Pennsylvania. I therefore decided to

try falling back on my broader interests and my physics Ph.D., exercising the option which I had left myself when I started at UMass.

While even with this broader view not many good career opportunities seemed available, I did discover from an advertisement in Physics Today that the Princeton University Plasma Physics Laboratory (PPPL) was hiring. Not only did controlled fusion seem an interesting and diverse field, but the lab was located in Princeton, not too far from Jeanne in Philadelphia.

After interviewing at PPPL, I was offered a position with the plasma modeling group, based on my physics and computer background. Starting at the lab in 1977, my first task was developing new computer codes modeling the behavior of impurity ions in the high temperature plasmas of the controlled thermonuclear fusion devices at PPPL. I had never really done computer modeling before and the art and science of computer modeling is one of the most valuable things which I have learned in the 16 years which I have now been at the lab. ""

出典は

http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1993/hulse-bio.html

和訳の良い練習問題になるので、訳すのは止めておく。読者の中には、何で日本語の電子本なのに英語が出て来て、和訳もされて

ないのと文句を言う人がいるかもしれないが、この本の対象は高校生・大学生なので英語は習っているはずである。英語を上手になるには基本的には英語で相手に何かを伝えたいとか相手の言っている事を理解したいという意志がない限り無理である。また英語と言えは BBC や CNN のアナウンサーのような英語をみんな使っていると思っているかもしれないが、それは誤りで日本語にも方言があるように英語にもいっぱい方言がある。

私の傑作な経験がある。ある国際会議で英国のスコットランド出身のノーベル賞をとりそうな有名な学者が 1 時間講演をした。それを聞いていた隣のイングランド出身の友達が、「Takashi 今の英語わかったか？私は全く英語がわからなかった。」と言うのだ。これは、日本のある地方の方言での講演を、全く別の方言の人が聞いた時のような状況なのだ。英語のその辺の機微の解らない私は「いや一良く解ったよ。何で英国人が同じ英国人の話を聞いてわからないの？」と答えた。実は英国と言う国はなく、あるのはイングランド、ウェールズ、スコットランドとアイルランドの 4 カ国が連合王国を作っているだけなのだ。昔の日本の藩のようなものだ。だから、BBC や CNN のアナウンサーのような英語を話そうと言うのを目指してはいけない。三単現なんて間違っても良いし、実際私は間違える事がある。発音も少々の間違いを気にする必要はない。言葉の目的は相手に何かを伝えたいと言う所にあるのだから、「わざわざ英語を話してやっているんだぞ」と言う態度で相手が解るまで、しゃべり捲るのがこつである。

つまり、一言で言えば慣れたら良いのだ。我々は日本語を話せるが、それは日本語の文法の本を読んだ結果ではなく、小さい時に日本語にいつの間にか慣れてしまっただけだ。だから英語も慣れたらいいだけで、小さい子供が変な日本語を言っても誰も気に

しないように少々変な表現だろうが発音だろうが慣れさせて、相手に自分の言いたい事を伝えられるようになれば良いのだ。だから、この文章もそう言う態度で読んで欲しい。これはセンター試験問題でも何でも無い。

私が代表をしている新学術領域という研究グループには5つの小グループが有ってその内の1つの代表が日本語は話さない英語圏の人だ。従ってあらゆる会議は全て英語で、最初は予算とかのややこしい話では困るだろうなと思っていたが、やってみると目的は同じだから何の問題もなく大学院生も英語で上手に発表と質疑応答が出来るようになった。要は、**実に簡単に慣れれば良いのだ。**

Taylor もノーベル賞をとった人に対する日本人のイメージとは異なる。京都に来てくれた時に彼と奥さんに桂離宮と修学院離宮を案内した。その時に、奥さんが「Joe は農家出身で、鶏を食べられるようにする為に首を落とすのがすごくうまいのよ。」と喜々として話してくれた。テイラーは若い人に非常に良い事を言ってくれている。

"I have noticed in recent years that many budding scientists worry much more than I ever did about what the future may bring: how to get into the best university, work with the biggest names, find the best post-doctoral fellowship, and secure the ideal university position. My own psychological bent, insofar as it has influenced any professional decisions, is to pursue a path promising enjoyment along the way, without looking too far ahead. Perhaps related to my Quaker upbringing, I've always valued personal involvement in a difficult task over appeals to eminence or authority; I like the

challenge of re-examining a problem from fresh perspectives. Ultimately, I believe that in important matters we are mostly self-taught, but in a way that is strongly reinforced by cooperative human relationships. I have worked in two extremely stimulating intellectual environments, first at the University of Massachusetts and more recently at Princeton. I'm fortunate to have associated with some uniquely gifted individuals who have been especially compatible co-seekers of diverse truths and pleasures: among them Dick Manchester, Russell Hulse, Peter McCulloch, Joel Weisberg, Thibault Damour, Dan Stinebring, students too numerous to name, and especially my dearly beloved wife, Marietta Bisson Taylor. "

出典は

http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1993/taylor-bio.html

これも、和訳の良い練習問題になるので、訳すのは止めておく。先ほどは日本の英語教育に注文を付けたが、上の文章と関係はないが高校の物理教育にも注文を付けておく。物理には微分と積分は必須のもので、微分学を築き上げたのは物理学者のニュートンだとも言える。であるにも拘らず高校の物理では高校の数学を使ってはいけないという。これの起源は悪名高い縦割り行政がその大元だと私は思う。したがって、大学入試の試験問題を作るのは極めて大変で、物理学者に微分・積分を使ってはいけないと言うのは「手足を縛られてプールに放り込まれて泳げ！」と言われるようなものである。中には微分・積分を曖昧な言い方で実際には入れている教科書や試験問題もある。それなら、スッキリと高校

レベルの微分・積分を使って物理の教科書を作れば良い。私は、高校時代あまりにも物理の教科書がつまらなかったのので、放送大学や大学の教科書を読んで本当の面白い世界を覗いていた。

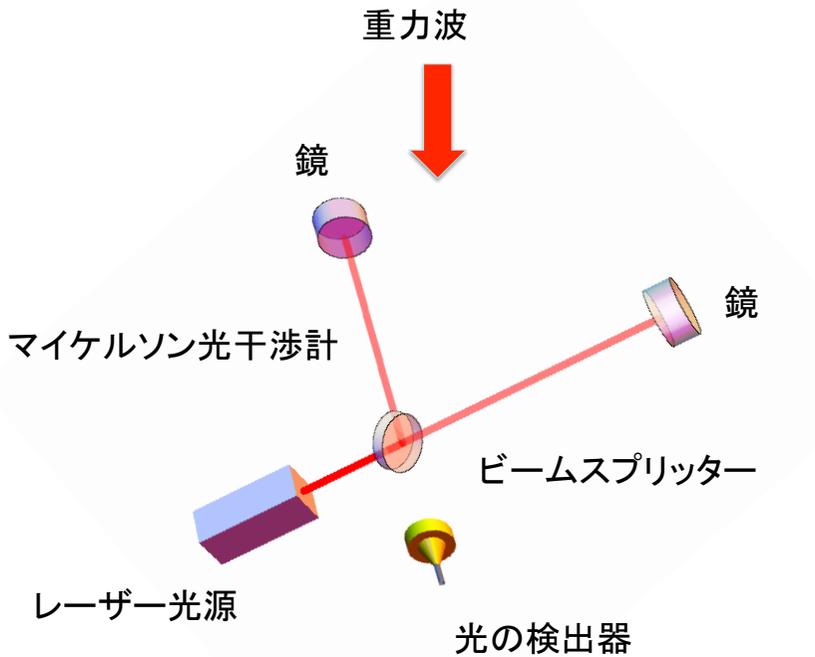
重力波の直接観測

PSR1913+16 の今後の運命は約 3 億年後に合体してブラックホールになると考えられている。その時に強い重力波を放出するので、直接重力波の観測が可能だと考えられているが、もちろん 3 億年も待てない。全ての種類の恐竜が生まれ滅んだのが 2 億 3000 万年程度なので、今から 3 億年後には人類はたぶん存在していないであろう。じゃ、どうするのか？ 似たような連星パルサーは 5 つ発見されている。しかし、遠くのものには暗くてみえない。パルサーの電波ビームがこちらに向いていないのも見えない、等を考慮すると全部で我々の銀河中に連星中性子星が 3000 個程度存在すると推定される。連星中性子星は今から約 3 億年後に合体してブラックホールになる。したがって我々の銀河では 10 万年に 1 回程度連星中性子星の合体が起こる。そして、そのとき強力な重力波の源となる。

でも 10 万年は 3 億年よりはましだが、やはりそんなに待てない。でもうまい具合に宇宙にはたくさんの銀河がある。だから、約 10 万個の銀河からの重力波を直接観測できれば、1 年に 1 回程度連星中性子星の合体を重力波で観測することができるはずである。aLIGO の最終目標感度では、連星中性子星の合体を年に 10 個程度観測できて、その時に重力波だけではなくガンマ線や X 線、光、電波も出ると予想されている。さらには金や銀などの貴金属もこのとき出来るのではないかと予想されている。

図 10

重力波検出のためのレーザー干渉計：©神田展行



干渉計の動作原理は動画で見た方がよくわかるので神田大阪
市立大学教授作の以下の URL で見て欲しい。

<http://www.gw.hep.osaka-cu.ac.jp/GRforPublic/files/IFandGWdet.mp4>

重力波を検出するにはレーザー干渉計を使う。上の動画サイトに
有ったように、レーザー光の半分は真っすぐに別の半分は直角
方向に反射させるビームスプリッターと呼ばれる特殊な鏡で2等
分される。重力波がない時には右側と左側の完全反射鏡までの距
離を等しくして置く。すると、反射された光は同時にビームスプ
リッターに戻って来る。ところが、重力波がやって来ると、同時

にはビームスプリッターに戻ってこない事を簡単に示せる。レーザー光は位相がそろった波だから、重力波の振幅に比例した干渉パターンが見える。これから、どんな重力波がやって来たかが解ると言う仕組みである。知りたい事は例えば、

1. 本当に連星中性子星は合体後ブラックホールになるのか？
2. そもそも、本当にブラックホールは存在するのか？

何をいまさらと思う人がいるかもしれないが、時々新聞や雑誌の紙上を、にぎわしてるブラックホールは実はブラックホール候補でしかない。ブラックホール候補は、何も出て来れない面（事象の地平面と呼ぶ。）の存在が確かめられて晴れて堂々とブラックホールと言えるようになるが、今まで言われて来たブラックホール候補は単に質量が中性子星にしては重過ぎるとか、我々の銀河系の中心に有ると言われている約 400 万倍の太陽質量程度のブラックホール候補は、質量は大きいのに、もし星の集まりとしたらそれに対応するような光が出ていないからブラックホールではないだろうかと言うのが正しい態度である。実はホーキング自身も情報喪失問題と関連して事象の地平面はないのではないかと言いだしている。URL は

<http://arxiv.org/pdf/1401.5761v1.pdf>

3. だから、ブラックホール時空の存在の観測的証明が必要である。

4. 本当にアインシュタイン理論通りの強い重力場になっている

のか？

5. 本当に金や銀などの貴金属ができるのか？

等である。上のような疑問に答える為には日本でも重力波の検出装置を作る必要があるというのが 1988 年頃から言われ出した。

第 8 章 我が国の重力波研究の歴史

そこで、1988 年に京都大学基礎物理学研究所モリキュール型研究会「動的時空と重力波」を開催した。モリキュール型とは参加者が 10 人程度の研究会だ。参加者は：早川学長(名大)、河島教授(宇宙研 ISAS)、宅間教授(電通大)、坪野助教授(東大：三尾が代理)、藤本助教授(天文台)、森本教授(KEK)、理論：中村、前田、佐々木、観山、大原、小畷、二間瀬、長沢であった。

平川浩正東大教授はカニパルサーからの連続重力波の検出を低温共鳴型の観測器で実験をしていた。しかし、残念な事に 1986 年逝去。坪野助教授が平川研究室の後を継いだ。森本教授は KEK で平川教授の実験を引き継いだ。河島宇宙研教授は宇宙研(ISAS)で 10m の Delay Line 方式のレーザー干渉計を作って実験を始めていた。主な目的は今から数年間、何をすべきかを議論して決定することだった。重点領域(新学術に対応)を出す事、そのために科学研究費補助金総合(B)を早川代表で申請する事を決定した。

早川名大学長代表で重点領域を 1 回申請したが、不採択だった。

大きな理由は文部省から待ったがかかったらしい。「学長は研究をしてはなりません。」そこで早川名大学長はなんと理論屋の私に後を継ぐように命令された。何故命令などと言う「きつい」言葉を使うかと言うと、私の大学院での指導教官の林忠四郎教授と早川名大学長は、ともに湯川秀樹門下でよい友達だった。従って、指導教官だった林忠四郎教授に言われたのと殆ど同じだったので、「Yes, Sir」と言うしかなかったのだ。申請書は私が高エネルギー物理学研究所の助教授だった、平成2年3月に文部省に提出し、ヒアリングの結果、1991-1994年の4年間に総額約6億円で認められた。文部省に呼ばれて言われた事は「予算にメリハリをつけて特徴を出してください。」だった。

重力波の理論には詳しくはなかったが、観測に関しては全くの素人の私は文部省から大変な宿題を貰ってしまった。早速初めて実験装置の詳細を読み出した。それで、感度を上げる為に何をすれば良いかを見つけた。鏡の温度を下げれば温度の平方根で感度が上がるので、有頂天でみんなに提案した。

中村> 鏡を冷やしたらどうだろうか？感度はあがるよ。

X 氏> 真空中に吊るしている鏡をどうやって冷やすのですか？まわりの真空チューブを液体ヘリウムで冷やして放射冷却させるのでしょうか、そんな予算ないですよ。それに大して温度は下がらない。絶対温度で200K (=−73°C) くらいがせいぜいかな？

Y 氏> だいたい、我々は共鳴型検出器で冷やすのがいかに大変か良く知っている。レーザー干渉計は冷やさなく良いと言うから

始めたのに、また冷やせと言うのですか？（後に KAGRA で採用される低温鏡につながる検討がすでにあった。KAGRA では鏡を吊るサファイアの紐の熱伝導で鏡を絶対温度で 20K (=−253°C) まで冷やす。）

Z 氏> やってみると、5 つのミラーを波長の整数倍にコントロールして直接干渉なんてとても出来そうにない気がしてきた。

別の大きな問題もあった。必要な 200mW の連続発振のレーザーが、できるかは不明だったのだ。当時レーザーの大半はパルスレーザーだった。

中村> 200mW で周波数安定度 $10^{-19}/\text{Hz}^{0.5}$ の YAG レーザーが天文台の 20m のプロトタイプに必要なのですが、なんとかありませんか？

宅間> そりゃ大変難しい。植田君にやってもらおうけど、出来るという保証はないよ。連続発振かつ周波数安定性と言うのは、ほとんど矛盾した要求ですから。

いやはや、とんでもないものを引き受けたと愕然とした。最後に文部省に怒られ責任をとるのは領域代表者の私だからである。それで月に 1 回、主要な実験関係者が全員集まって 6 つある計画研究の進行をそれぞれ毎回報告してもらい、議論する事を始めた。私はその頃、高エネルギー物理学研究所から京都大学基礎物理学研究所教授に転出したので、殆どの実験屋さんのいる東京に最低月に 1 回は四年間、出張した。

重点領域は、しかし、結果的に大成功であった。重点領域の事後評価で評価委員の宅間宏教授と合意した事がある。「科学者が作ろうと考えた装置で、エネルギー保存則、エントロピーの増大則、不確定性原理、因果律等の基本法則に反しないものは、時間はかかるかもしれないけれど必ず完成する。」スタートは少人数だったが、レーザー、真空、地球物理、地震等の研究者に参加してもらい、領域として人数が増えていった。この当時、LIGO (KAGRA より先に建設された米国の装置) を見に行ってみて、片方の腕 4km の中間まで歩いたが、往復 4km もあり、歩くのに一時間近くかかったので、実感として「でかい!!!」と感じた。だから、でかいものを作った経験者が代表者にならないと無理ではないかと感じていた。実際、LIGO の代表者は素粒子実験屋 (元 SSC) だった。現在、KAGRA の代表者もニュートリノ実験経験者の梶田さんである。

重点領域の成功の後で、新プロというトップダウンの研究費で国立天文台に腕の長さが 300m の TAMA300 を作ろうと言う話が出て来た。研究期間は 1995 年-2001 年だった、トップダウンと言うのは上から予算がついてくるスタイルで申請はできないのだ。しかし、私は TAMA300 に大反対であった。

中村> そんな検出を期待できないものを作ってどうするの？ 中途半端な装置だから断るべき。重力波の測定可能な感度は腕の長さが長い程良い。300m と 3km では達成可能感度が 10 倍違い、重力波源の数は 1000 倍も違う。だから、TAMA300 なんか苦労するだけだから止めるべきだ。

V 氏> 一挙に 20m から 4km に行くのは risky. 中間段階で

300m というのはいい戦略だと思う。長さは中間だけど世界に先駆けて動かせるから、うまくすれば検出できるかもしれない。

中村> 重力波で方向を決めるには、大陸間の距離を離れた3台の装置がいる。日本独自の物である必要はなく、LIGOのコピーで良い。

V氏> そんなのは、実験家としては受け入れられない。

W氏> 中村さん、断るのはいいけど、じゃ、どうやってこの研究を継続するの？Vさんの方針でいいのではありませんか？

中村>

と言う訳でお金を持っていない私は実験屋さんを説き伏せる事は出来ずに新プロに参加する事になった。代表は元国立天文台長の古在由秀名誉教授であった。

risky という言葉は、この本の最初の方で日本の学術振興会に対応するNSFの理事長がLIGOへの投資はriskyだったと言ったのを思い出して欲しい。LIGOは先ず、40m x 40mのプロトタイプの実験の後、一挙に100倍の4km x 4kmを2台作ると言う計画は、V氏ならriskyと言って却下するだろう。しかし、LIGOはriskyな計画を実行して成功したのだ。何故2台作ったかと言うと米国だけで両者に同時に重力波のシグナルを受ければ雑音ではないと言えるからだ。その為にも腕の方向がほぼ同じになるようになっている。今となってはVirgoとKAGRAが参加できるのでLIGOの2台の腕の方向は違っていた方が良いのだが、LIGOは最初の作戦通り、見事に初検出に成功したのだ。

大体、人生そのものが **risky** なのだ。最近では外国でも日本でもテロに会うかもしれない。また、いつ交通事故や、地震、豪雨で死ぬかもしれないのだ。私も 2015 年 7 月に自転車に乗っていて、もう少しで車に轢かれて死ぬところだった。まして、科学は **risky** に決まっているのだ。risk のない研究とは最初から殆ど解っている詰まらない研究でしかないと思う。科学に関してだけは早急に米国の真似をしなくてはならないと思う。

中村>うーん。わかった。じゃ、TAMA300 でかかるかもしれない重力波源を考えましょう。

となった。そこで、私は TAMA300 で年間 5% くらいの確率で原始ブラックホール連星合体が見つかるかもしれないと言う論文を今度の GW150914 の発見でノーベル物理学賞が確実視されているカルテクの Kip Thorne と書いた。

<http://arxiv.org/abs/astro-ph/9708060>

5% は当時の日本の消費税くらいなので多くもないが少なくもないと冗談を言っていた。しかし、歴史とは不可解なもので、少しパラメーターを変えるだけで、この話が GW150914 の起源かも知れないと今なっている。

<http://arxiv.org/abs/1603.08338>

実に 19 年前の論文が息を吹き返しひょっとしたらノーベル賞かも？となっている。学問は **risky** で有るとともに不可解でもあるのだ。

ゼロから始めて 13 年後の 2001 年に TAMA300 は 1038 時間の連続運転に成功した。稼働率は平均 87% で理論家も shift と呼

ばれる運転に参加した。2003年には1157時間連続運転に成功した。TAMA300は大成功であった。しかも、LIGOが動き出すまでは2年間程、世界一の感度を誇った。現在このTAMA300の実験論文の被引用回数は223もある。

しかし、私の予言通り重力波は掛からなかった。LIGOですら、やっこの14年後に初めて重力波を直接検出したのだから、結果的には、当然TAMA300では検出できなかったと言える。私の進言に従って、1995年の時点で100億円があったら事態は違ったかもしれない。でも歴史に「もし」は意味がない。

TAMA300の図は以下のURLにある。

<http://tamago.mtk.nao.ac.jp/tama/facility/faciliti.html>

このTAMA 300の運転は文部科学省科学研究費補助金・特定領域研究「重力波研究の新展開」（代表：坪野公夫東大教授：期間2001年-2005年）の間に行われた。必死の思いで、TAMA300で掛かるかもしれない重力波源を考えたが、自然はそれに対して「NO」という答えを出した。特定領域の審査委員は重力波の初検出が可能だと見なしたようで、この特定領域の事後評価はなんと「B」（期待した程の成果が出なかった。）私に言わせれば、期待する方が間違っていたのであって、LIGOのように、約束した感度のものが出来れば合格のはずである。連続運転に成功し2年間程世界一の感度だったのだから「AA」（大変良くできました）という評価をすべきであった。使った予算はLIGOの3%だった。そんなもので初検出が出来たとしたらLIGOの全員が首になったであろう。私がTAMA300の建設に反対したように、さらには

2015 年に出た初検出からも結果的にも初検出は不可能だったのだ。その根本原因は risky なものには手を出さないと言う、国民性の問題ではないだろうか？

当時、私は重力波の我が国での研究に対して次のような事を言っていた。重力波の研究は物理として筋がいい。進み方にふらつきはあっても必ず研究は 21 世紀に発展する！！その理由は

- ① 重力波は確実に存在する。だから、努力すれば必ず目標に近づく。
- ② 電磁波による天文学と同じ位広大な未開拓領土が存在すると思われる。
- ③ このフロンティアを順番に切り開きたい！！
- ④ LCGT(現在の名は、KAGRA)はその 1 番バッテリーである。
- ⑤ 2 番 (DECIGO: DECi herz laser Interferometer Gravitational Observatory)、3 番(PTA:Pulsar Timing array) のバッテリーが控えている。
- ⑥ そして、21 世紀に重力波の物理学は我が国で大きく開花するに違いない。我が国はそれが可能な国家であると信じる。

電磁波(光子)は電磁相互作用の力を媒介する 粒子であり、電磁波を使った天文学は電磁相互作用という力の研究である。ここで光子とは電磁波構成している粒子で電磁波の振動数に比例したエネルギーを持っている。量子力学を切り開いたプランクが溶鉱炉の中の電磁波のスペクトルを説明するために導入したもので、1905 年にアインシュタインによって光電効果の説明にも使われた。

重力波(重力子) は重力相互作用の力を媒介する粒子である。重

力は未だによくわかっていない。したがって、重力波の研究は未
解明な重力という力の研究をする物理学の最重要なテーマであ
る。

2005 年には特定領域「全波長重力波天文学のフロンティア」
(期間：2006-2011 領域代表 中村卓史) を提案したが、ヒア
リング (聴聞会) にも呼ばれずに落選した。「まだ、一つも見つ
かっていないのに全波長とは何を言っているのか？」という評価
だった。私は重力波の検出器の建設を一時諦めてガンマ線バース
トの研究に転向した。(2007 年ー2010 年)

日本の重力波研究の闇の時代 (2005-2010)

その後も特定領域は領域代表者を何回も変えたが不採択の連続。
腕の長さが 3km の LCGT (Large Cryogenic Gravitational wave
Telescope: 現在の名前は KAGRA) の概算要求を出し続けたが不
採択が続く。2007 年頃 LCGT を取り下げて LIGO に入ると言う
前提での概算要求に切り替えようと実験家が言い出した。私は怒
り狂って猛反対した。そんな方針は実験家として受け入れられな
いと 20 年前に言ったではないか？今更何を言っているのだ？初
心は貫徹すべきだと言う説得に実験家は私の剣幕に負けてか、や
っと同意してくれた。

私は言った「待てば、認められる日が必ず来る。」

その通り 2010 年に LCGT 計画が遂に承認された。

東大宇宙線研究所の LCGT (Large Cryogenic Gravitational
Wave Telescope) 計画は 2011 年に KAGRA (神楽と言う説と

KAmiokaにあるGRAvitaitonal wave detectorの略だと言う2説が有る。)と名称変更した。神岡鉱山内の地下に3kmのトンネルをL字型に2本掘る。2011年建設開始で地面振動の少ない地下にある点と絶対温度20Kの低温鏡を用いる点が他のa-LIGO,a-Virgo等の第2世代の検出器にはない大きな特徴で第2.5世代の重力波検出器と呼ばれている。2011年の東北大震災で1年遅れたが、2014年3月にトンネル掘削終了。2016年3月から2016年4月に掛けて常温で試験運転した後、現在低温鏡の設置段階に入っている。KAGRAのURLは

<http://utf.u-tokyo.ac.jp/project/pjt56.html>

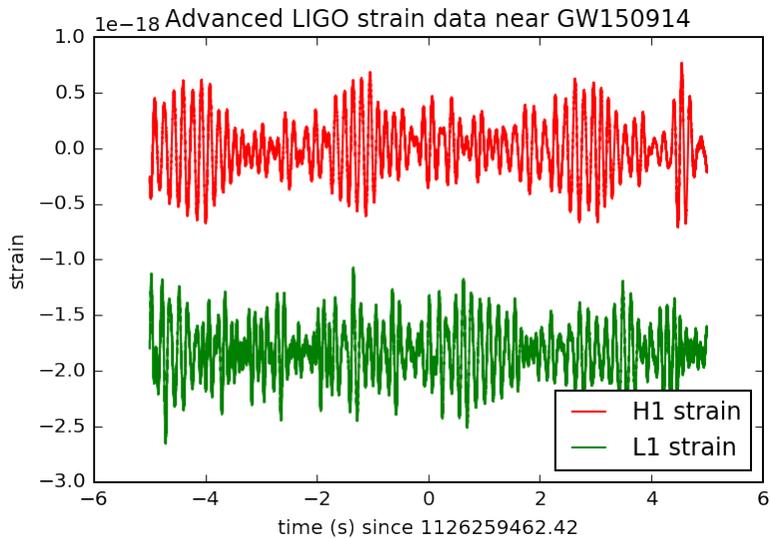
第9章 再びGW150914

それでは、第2章の最後に戻って、我々が独立にaLIGOの結果を確認したプロセスを紹介しよう。まず、重力波の振幅は h という無次元の量を使い、又 f を重力波の振動数として $h \sin(2\pi ft)$ のように時間(t)に依存して変化する。 h の意味は図10でビームスプリッターを同時に出発して右と左に別れたレーザー光が端の反射鏡で反射されて再びビームスプリッターに戻ってくる時間が重力波の影響で同時でなくなり、その時間差は h に比例するので、逆に時間差を測ることで、重力波の振幅 h がわかるという仕掛けである。

重力波は波なので、この時間差も当然時間変動する。GW150914の場合の生データをaLIGOは公開した。それは図11のようになる。しかし、図11はとても波のように見えないし、専門家が見ると振幅が三桁ほど大きくて、重力波とは無関係な電源の60Hz付近とか高低振動数でのノイズしか見えていない。

図 11

aLIGO が公開した GW150914 からの重力波の生データ、赤がハンフォードで緑がリヴィングストーンのものである。横軸は秒での時間で0は世界標準時のある時刻である。また縦軸が雑音を含む重力波の振幅を 10^{-18} の単位で書いている。同じところに描くと重なるので、赤と緑は縦軸方向に 2×10^{-18} ずらせてある。

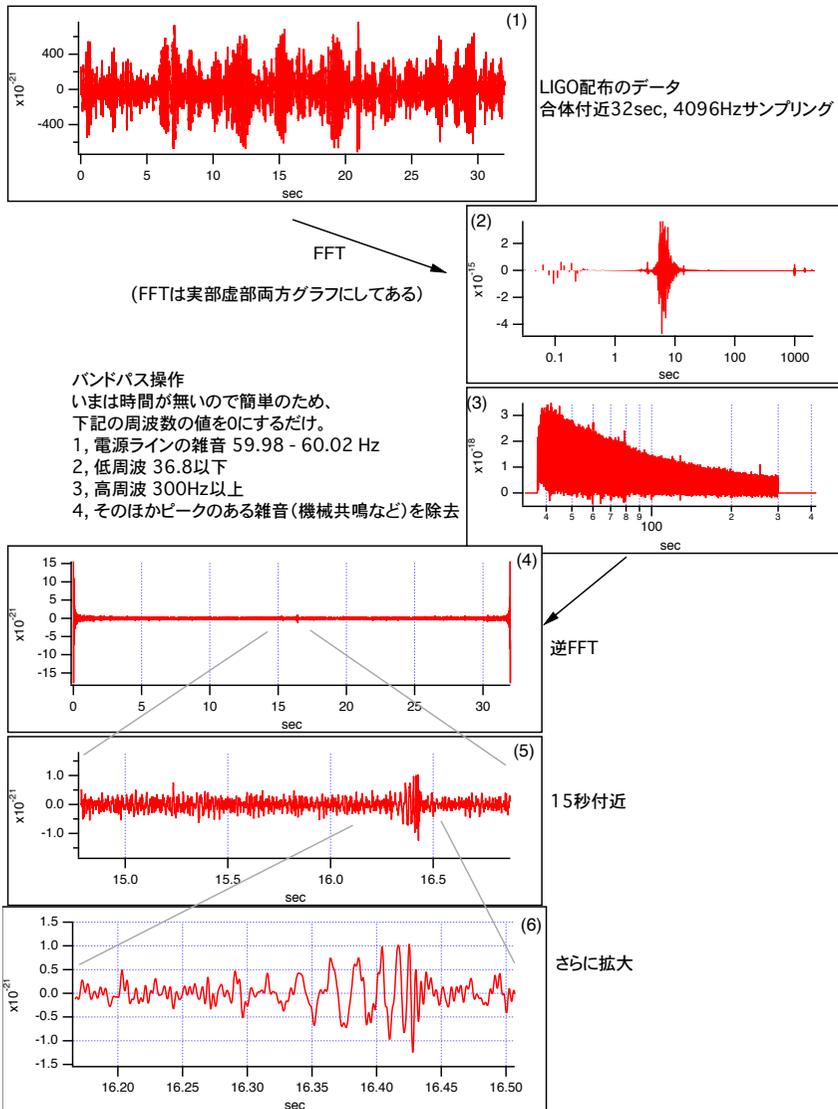


そこで神田教授は図 12 のような作業をした。まずハンフォードの生データをフーリエ変換という数学的な変換をして色々な振動数の成分に分割したのが図 12 の一番上から右下 2 つの図である。なぜ 2 つの図になるかと言うと、この操作で複素数の振幅が出るからである。右下の上の図が実部で下の図が虚部である。そこで、電源の 60Hz 辺りと機械振動等の原因のわかっているノイズを取り去る。さらに感度の良くない 36.8Hz 以下と 300Hz

以上のノイズを取り去る。その後逆フーリエ変換をして元に戻すと左下ののようにほとんど直線の振幅しか出ないし、振幅の大きさも3桁下がって 10^{-21} 程度である。

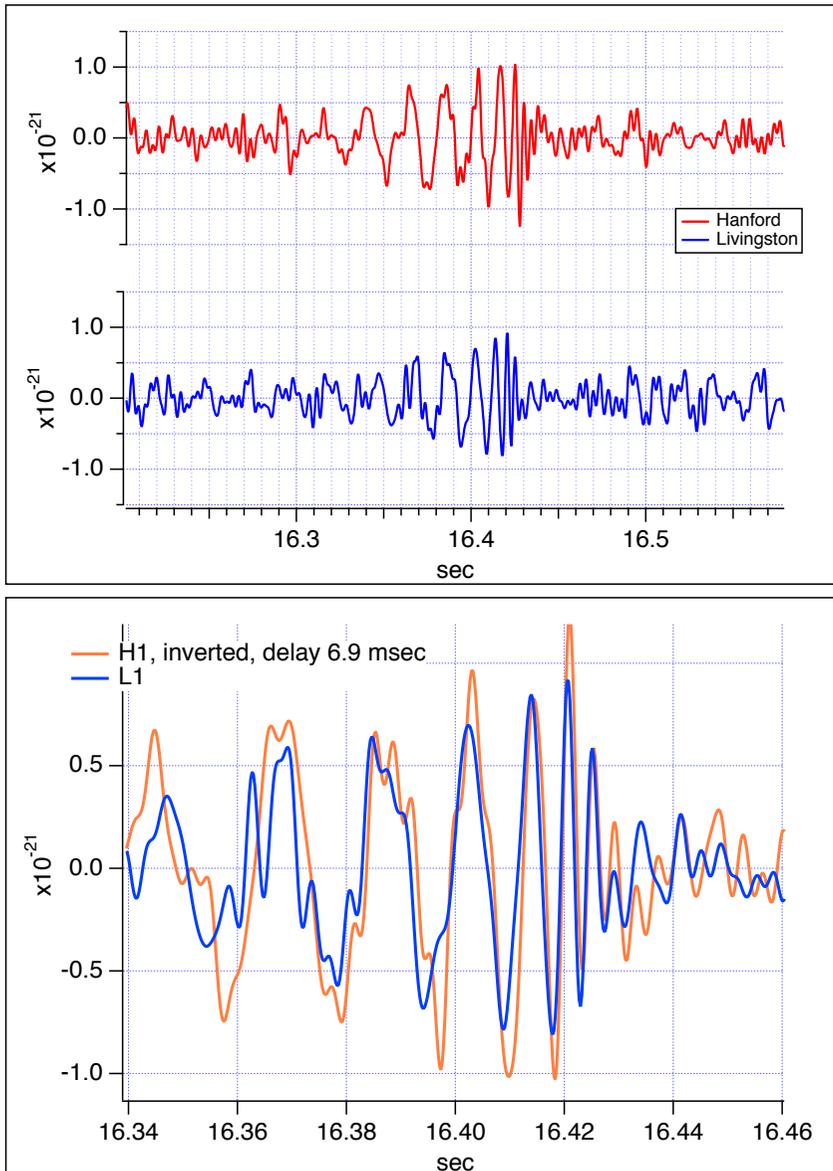
図 12

神田教授による aLIGO の生データの解析©神田展行



しかし、図 12 に示されているようにある部分の拡大を続けると最後に一番下にあるように、だんだん振幅が増大するとともに振動数も増大している波のようなものが出てくる。

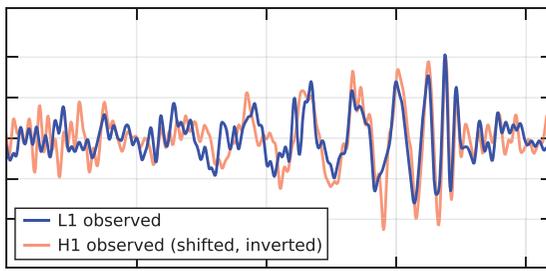
図 13 GW150914 の aLIGO とは独立な再現©神田展行



同じ作業をリビングストーンのデータにも施すと図 13 の上から 2 番目の図になる。さらに、両者を重ねると図 13 の一番下のようになり、明らかに 2 つの検出器がほとんど同じ波形を捉えているのでノイズではなく、まさしく我々専門家が予想していた波形なのである。この図を添付したメールを神田教授から深夜受け取った時「わーお！」と書斎で大声をあげたのであった。我々は自分達で確かめもしないで、ある学術雑誌に載っただけでは、「大成果です。」とか「極めて面白い成果です。」などというコメントを新聞記者にはしない。疑って、疑って、それでも否定できない証拠が出てきて初めて、「これは本当です。」とコメントをする。デカルトの方法序説の精神は科学には必須である。比較のための aLIGO の論文の同様の図を図 14 に示す。

図 14

aLIGO Phys.Rev.Letters116 061102(2016)より



解析の結果、これは質量が太陽質量の 36 倍と 29 倍の連星ブラックホールの合体に伴う重力波放出と考えられることが解った。この連星の重力波が aLIGO で検出できた時間は 0.2 秒くらいであるが、GW151226 というのも見つかっていて、その aLIGO で継続時間は 1.6 秒くらいであった。質量が太陽質量の 14 倍と 8 倍だったのがその原因である。質量が大きい程 aLIGO で観測できる時間が短くなるのだが、最終的には重力波を放出した後に合

体して大きな太陽質量の 62 倍と 21 倍のブラックホールになったと考えられる。なぜ質量が元々の質量の和より太陽質量の 3 倍と 1 倍少ないのかと言うと、それだけの静止エネルギーが重力波として放出されたからである。

ここで、やっこの電子本のタイトルの意味を説明できるようになった。aLIGO 等が初めて直接に重力波を観測できた GW150914 とか GW151226 は最後の約 1 秒で合体してさらに大きなブラックホールになることが初めて解ったのだ。これを指して「最後の 1 秒間」というのがこの電子本のタイトルの意味である。

図 13 の波形から、何故これが太陽質量の 36 倍と 29 倍の連星ブラックホールの合体に伴う重力波放出と考えられるのだろうか？図 13 の 16.35 秒から 16.41 秒の 0.06 秒の間に 4 回ほど振動しているので、振動数は 70Hz 程度である。これが簡単のために質量が同じハルスとテイラーが見つけたような連星系からの重力波と考えてみよう。連星の公転の周期は重力波の周期の 2 倍であるので公転周期は 0.03 秒くらいである。するとケプラーの法則により、軌道半径の 3 乗は公転周期の 2 乗に比例するが、その比例計数は連星の全質量と重力定数 G で決まっている。一方、図 13 で 16.42 秒以降重力波の振幅が小さくなるとともに振動数が急激に増大している。これは連星系の 2 つの星が合体したためと考えられる。16.35 秒から 16.42 秒の 0.07 秒が重力波放出のために連星が合体するのに要した時間である。これから 16.35 秒の時の軌道半径は 700km くらいというのが出てきて、これをケプラーの法則に代入すると全質量は太陽質量の 50 倍くらいというのが出てくる。観測値は太陽質量の 65 倍であるが、実はこれには誤差があって、全質量は太陽質量の 53 倍から 74 倍となってい

るが、これは精密なデータ解析によるものなので、今のような概算で 50 倍の太陽質量と出てきたのは立派なものである。

従って、重力波の観測からのみで GW150914 は質量が約 30 倍の太陽質量程度の連星の合体からのものであることがわかる。では GW150914 は何の連星なのか？まず、質量が 30 倍の太陽質量程度の普通の星の連星ではありえないことが言える。というのはそのような星は半径が 380 万 km くらいになるので軌道半径が 700km という評価に矛盾する。中性子星なら、半径が 10km くらいで良さそうであるが、中性子星の最大質量は 3.2 倍の太陽質量であるという定理が存在しているので、中性子星でもない。このような消去法でブラックホールが唯一の可能性なのである。

上の定理は 1) アインシュタインの一般相対性理論が正しい。2) 物質中の音速が光速以下である。3) 原子核の密度程度での圧力と密度の関係は解っている。と言うもっともな仮定の下で証明されている。中性子星中の高密度物質の性質の詳細には一切関係しない一般定理であるので、否定するのは難しい。唯一の可能性は一般相対性理論が強い重力場では正しくないというもので、これは否定できない可能性である。むしろ、重力波の直接検出の大きな目標は強い重力場でアインシュタインによる一般相対性理論が正しいかどうかが一番重要なテーマなのである。だから、実はブラックホールはまだ未確認で正確にはブラックホール候補というべきである。さて、約 30 倍の太陽質量のブラックホール候補というのは今まで観測されたことがなかった。今まで観測されたブラックホール候補は X 線星であった。X 線星はブラックホール候補と普通の星の連星系で、ブラックホール候補の強い重力で、ブラックホール候補が普通の星のガスを剥ぎ取り、それが回転しながらブラックホール候補に落ちる過程で X 線を出すも

のである。普通の星はその星のスペクトルを見ると星の質量を天文学の知識で予測できる。また、ケプラーの法則で両星の質量の和が食を起こすとき等でわかる場合がある。そして、X線星はコンパクトな星と考えられているので、中性子星かブラックホール候補となるので、質量が中性子星の上限質量 3.2 倍の太陽質量を超えると先程言った一般定理から中性子星では有り得ない。だから、X線星はブラックホール候補となるのである。しかし、このようにして決めたブラックホール候補の今までの最大質量は太陽質量の 15 倍程度であり、GW150914 の約 30 倍程度というのは、観測されたことがなかったので、その起源が大問題になっている。ところが、GW150914 の発見の 2 年前にその存在可能性を予言していた人達がいた。現宇宙線研究所研究員の衣川を始めとする京大のグループである。その論文の URL は

<http://arxiv.org/pdf/1402.6672v3.pdf>

Possible Indirect Confirmation of the Existence of Pop III Massive Stars by Gravitational Wave

Tomoya Kinugawa¹*, Kohei Inayoshi¹, Kenta Hotokezaka¹, Daisuke Nakauchi¹, Takashi Nakamura¹

¹Department of Physics, Graduate School of Science, Kyoto University, Kyoto 606-8502, Japan

27 May 2014

ABSTRACT

We perform population synthesis simulations for Population III (Pop III) coalescing compact binary which merge within the age of the universe. We found that the typical mass of Pop III binary black holes (BH-BHs) is $\sim 30 M_{\odot}$ so that the inspiral chirp signal of gravitational waves can be detected up to $z=0.28$ by KAGRA, Adv. LIGO, Adv. Virgo and GEO network. Our simulations suggest that the detection rate of the coalescing Pop III BH-BHs is 140(68) events/yr ($\text{SFR}_p / (10^{-2.5} M_{\odot} / \text{yr} / \text{Mpc}^3) \cdot \text{Err}_{\text{sys}}$ for the flat (Salpeter) initial mass function (IMF), respectively, where SFR_p and Err_{sys} are the peak value of the Pop III star formation rate and the possible systematic errors due to the assumptions in Pop III population synthesis, respectively. $\text{Err}_{\text{sys}} = 1$ correspond to conventional parameters for Pop I stars. From the observation of the chirp signal of the coalescing Pop III BH-BHs, we can determine both the mass and the redshift of the binary for the cosmological parameters determined by Planck satellite. Our simulations suggest that the cumulative redshift distribution of the coalescing Pop III BH-BHs depends almost only on the cosmological parameters. We might be able to confirm the existence of Pop III massive stars of mass $\sim 30 M_{\odot}$ by the detections of gravitational waves if the merger rate of the Pop III massive BH-BHs dominates that of Pop I BH-BHs.

Kinugawa, T., Inayoshi, K., Hotokezaka, K., Nakauchi, D., & Nakamura, T.
2014, *MNRAS*, 442, 2963

この論文は上の *MNRAS* という専門学術雑誌に掲載されているが、これを手に入れるには大学の図書館を通じてでないとお金がかかり、この電子本の何でも無料という精神に反するので内容は同じだか無料で手に入る URL を示した。これは e-print と呼ばれ、我々が論文を書いたら真っ先に upload するサイトである。この論文の予言は、a-LIGO が発表した論文の中でも以下のように高く評価されて引用されている：

a-LIGO ApJL 818:L22 2016 より

separations). However, if one assumes that the properties of PopIII massive binaries are not very different from binary populations in the local universe (admittedly a considerable extrapolation), then recently predicted BBH total masses agree astonishingly well with GW150914 and can have sufficiently long merger times to occur in the nearby universe (Kinugawa et al. 2014). This is in contrast to the predicted mass properties

英語ばかり出てきてこれでは何を言っているかわからない人もいるだろうから、詳しい説明を今からしよう。まず、我々の宇宙は今から約 138 億年前のビッグバンで始まった。その名残りが、現在電波領域での観測から絶対温度 $T=2.735\text{K}$ と決定された宇宙背景放射である。ビッグバンの理論の元になったのは 1929 年にハッブルが発見した宇宙の膨張である。その結果、遠くの銀河の、例えば水素のスペクトル線を観測すると、波長が伸びる。これは以前に説明したドップラー効果である。振動数は光速を波長で割ったものだから、振動数は減少する。宇宙背景放射は宇宙が膨張するとその温度が下がる。それはこのドップラー効果のためである。

さて、よく新聞等で例えば遠くの銀河でブラックホール候補が

見つかった時、その銀河までの距離が 100 億光年だとか今から 100 億年前だとか書いてある。これは、読者にはわかりやすいかもしれないが、我々専門家には極めて分かりにくい。我々は宇宙背景放射の現在の温度と過去での温度の比を $(1+z)$ として z を赤方偏移と呼んでいる。(ある天体を今見たと言っても、その天体の距離/光速の過去を見ていることになることに注意。) 現在は $z=0$ に対応する。我々が赤方偏移 z を使う理由は z までの距離とか宇宙が始まってから z までの年齢だとか、赤方偏移 z の天体は現在から実は何年前の姿だとかは、 z さえ指定すれば自動的に計算できるので、便利なのだ。例えば、何年前という言い方にこだわると 138 億年前に近くなると困ってしまう。人間に例えると、今から何年前という言い方にこだわると、65 歳の人が「今から 64 年前に私は初めて立った。」というような奇怪な文章になってしまう。「生まれて一年で立った。」と言うのが普通であろう。宇宙に適用した場合、赤方偏移 z を使うと言い方を変える必要はないので全く問題はない。だから赤方偏移 z に慣れて欲しい。

さて、赤方偏移が 30 億の宇宙初期の時、宇宙の温度は 100 億度であった。この時にあったのは光子以外には陽子、中性子、電子とニュートリノで、ここで宇宙初めての元素合成が始まった。その時間は、ビッグバンから 3 分くらいなので「最初の 3 分間」と呼ばれる。その時、合成されたのは、水素とヘリウムとリチウム等の軽元素のみで炭素以上の元素 (=これを重元素ないしは金属と呼ぶのが、この業界での習わしである。) は、形成されなかった。では、我々を作っている炭素、酸素、窒素等はいつどこでできたのか？ また、金や銀といったまさに重元素はどこで形成されたのだろうか？ 最初の問いに関しては以下の 3 段階説が定説である。

① 種族 III 星：水素、ヘリウムとごくわずかのリチウムのみからなる宇宙で出来た最初の星であるが未発見である。星は核融合をエネルギー源としているので、種族 III 星は原子番号 26 の鉄までの元素を作った。なぜ鉄以上ができないかという、鉄が最も安定な元素なの原因である。(難しい言葉では 1 核子 (陽子と中性子は原子核を作っている) の総称として核子と呼ぶ) あたりの結合エネルギーが鉄で最大になるからである。) 種族 III 星は鉄までの重元素を辺りに撒き散らす。また、太陽質量の 30 倍程度の種族 III 星は、巨星にはならずそのままブラックホール候補になる。この点が他の種族 I/II 星との大きな違いである。

② 種族 II 星：種族 III 星で形成された金属がダスト(塵)をつくるためその熱放射による冷却が効いて、種族 III 星とは形成シナリオが変わる。球状星団の星が典型的で金属量は重量で 0.1% から 0.01% 程度である。典型的な年齢は 100 億年程度である。

③ 種族 I 星：太陽のような星である。典型的な年齢は 50 億年程度より若い。金属量は重量で 2% くらいである。

なぜ、今まで太陽質量の 30 倍のようなブラックホール候補がなかったかというと、星の金属量と関係している。種族 I 星の進化では、水素がヘリウムになる核融合で光っている水素燃焼段階が終わるとヘリウム燃焼段階が始まり、星の光度が上がるとともに半径が大きくなり、巨星段階になる。この時、金属は星の光を受けて星から水素も引き連れて飛び出すことが起こる。この結果、星の質量が大幅に減少して太陽質量の 30 倍のような大きなブラックホール候補はできず、せいぜい 15 倍の太陽質量のブラックホール候補しかできない。しかし、種族 III 星では金属がないため、このようなことは起こらずに、太陽質量の 30 倍のブラックホール候補の形成が可能なのである。これを、世界で初めて指

摘したのが、衣川らの論文であった。論文のタイトルはこのような事情から太陽質量の約 30 倍のブラックホール候補が見つかったらそれは種族 III 星の存在の間接的な存在の証明であるとしている。

さて、2015 年 2 月 11 日の記者会見以来、当然 GW150914 の異常に重いブラックホール候補を説明する論文がたくさん出た。理論屋とはあらゆる可能性を指摘するのが仕事だから当然である。もちろん、大半はハズレである。今 GW150914 の起源の説を列記すると：

- 1) 種族 III 星説
- 2) 種族 II 星説
- 3) 原始ブラックホール説
- 4) 球状星団での 3 体衝突説
- 5) 活動銀河核の周りでの降着円盤の分裂説
- 6) 非常に大きな星での分裂説

等々がある。

既に理論の数の方が見つかった 2 つのイベントより多いのでこのまま理論での論争を続けても結着は付かない。さらに困難にしているのは、aLIGO の 2 台しか動いていないので方向決定精度が 600 平方度程度と言う広大なもので、母銀河の同定は、ほとんど不可能である。3 台あれば、それぞれの干渉計への重力波信号の到着時間の差から 10 平方度くらいに絞れるが、これでも天文学的には広すぎて母銀河の同定は困難である。したがって、どんな重力波のデータが今後出てきても、それを説明する理論には不定のパラメーターや不定の関数が多数あるので、それらを変えて観測データに理論値を合わせることは可能であると思う。歴史的にはこのような論争は既にあって、どのように結着がついたのかの

例があるので、次にその話をしよう。

第 10 章 GW150914 の起源はどうしたら結着がつくか

1967年に米国とソ連(今はロシア等の10カ国程度に分裂した。)が大気圏核実験禁止条約を結んだ。昔は、米国は日本人の船員にも被害者が出たビキニ環礁等で核実験をしていた。それを止めようという一見平和的な条約であるが、本音は、実験は十分やったので、もう止めようというのだったと思う。そこで米国はソ連が条約を守っているかどうかを監視するためにベラ衛星と言うガンマ線を検出する衛星を打ち上げた。核実験に伴って発生する原子核からのガンマ線を検出するのである。このためには重力波と同じで3機以上の衛星が必要だが、4機を高度12万km周期4日の軌道に1967年に打ち上げた。そうしたところ、ソ連からではなく宇宙から継続時間10秒位のガンマ線バーストを検出した。この事実は1973年まで、軍事機密とされたが、1973年に学術雑誌に公開された。何が軍事機密であったかというガンマ線バーストではなく検出器の性能が軍事機密であったのである。

直ちに研究者の中でその起源が大問題になり数々の説が出され現在のGW150914のように理論の数の方が見つかったガンマ線バーストの数より多かった。まずガンマ線しか観測されない事態が長く続いたので、ガンマ線バーストまでの距離が全く不明であった。したがって起源論も一番近いのは太陽系の端から一番遠いのは宇宙の果てまで、あらゆる距離での学説が横行し、1995年頃にはガンマ線バーストの論文の数が2000編程度あったが、決定打は一つもなかった。1995年にLambとPaczynskiがワシントンで公開論争を行った。

Lambは我々の銀河のハロー中にある古い中性子星説を唱え、

Paczynski は宇宙論的な距離を唱えた。1990 年に打ち上げられた BATSE(Burst And Transient Source Experiment)というガンマ線バースト専用の衛星 (CGRO という巨大な衛星の 1 つの実験装置であったが) は、ガンマ線バーストの方向分布が等方であることを示していた。しかし、ガンマ線バーストの方向決定精度は極めて悪く、良くて 1 度、悪いと 8 度くらいで母天体の発見はできていなかった。この辺は現在の重力波の状況と同じであった。Lamb は、ガンマ線バーストに要求される幾つかの性質をあげて銀河のハロー中にある古い中性子星説を熱っぽく説いた。その場にいた人も、その議論が出版されたのを読んだ私も Lamb に軍配があがると感じた。

Paczynski は、「等方なものは近くか遠くしかない。しかし、近くの説が BATSE によって否定されているので、遠くの説しか残らない。したがって、宇宙論的な距離にすれば、宇宙は一様等方なので、矛盾しない。」と言っただけなので支持しにくかった。

しかも宇宙論的に遠い距離にするとコンパクトネス問題というのが、解決できない。ガンマ線バーストは立ち上がる時ミリ秒の時間スケールのものであるので、サイズはミリ秒で光が移動できる距離 300km 以下である。宇宙論的な距離にすると源でのガンマ線の光子密度は莫大なものになる。ガンマ線バーストの中には電子の静止エネルギーを超える光子があるので、2つの光子が衝突して電子-陽電子対生成が、光子が 0.00000001cm 進む間に起こってガンマ線光子が外に出られないと言う矛盾を生む。すなわちガンマ線バーストの宇宙論的な距離説を唱える人は電子陽電子対生成と言う物理を知らない不勉強な人だと見なされていた。

1997 年に Beppo-SAX 衛星が打ち上がって状況が一変した。

Beppo-SAX 衛星には X 線望遠鏡も搭載されており、角度で 4 分くらいに位置を絞れるようになった。ここまで絞れると、話は変わってくる。ガンマ線バーストは年間 1000 イベントくらいあるので名前は日付を用いる。GRB970508 とは 1997 年 5 月 8 日に見つかったガンマ線バーストという意味である。このバーストに関しては母銀河が同定されるとともにスペクトルの中に $z=0.768$ と $z=0.835$ の吸収線が見つかった。これは波長が 1.768 と 1.835 倍になったわけで、こんなに大きな赤方偏移が出るのは宇宙の膨張しかない。つまり、ガンマ線バーストは宇宙論的距離のものがあることが確定した。この 1 つのスペクトルの図で約 2000 編の論文の殆どが死んだ。悲しいことに私の論文もその中に入っている。その後も続々宇宙論的な距離のガンマ線バーストが見つかり、現在ではガンマ線バーストは宇宙論的な距離の天体ということが確立している。

科学では自然と言う絶対的な判定者がいるので多数決が役に立たないことの教訓的な結果となった。ほとんど 1 人に近かった Pacynski が正しかったのだ。ではコンパクトネス問題はどうか？ 極めて簡単な答えがあった。ガンマ線バーストは電子陽電子対生成を起こさないためには 100 億 km くらいのサイズでないといけない。しかしそれでは、継続時間はその距離を光速で進むくらいの 10 万秒となってしまう、観測の 10 秒と矛盾する。ところが、ガンマ線を発光する発光体が光速の 0.99995 倍という極めて光速に近い速度で進むと先に放射されたガンマ線光子に発光体がほとんど追いつきながら進むので、我々は継続時間が 10 秒の現象として観測することになる。ガンマ線バーストについてはもっと多くの性質の説明があるし、また理論と観測の進展があるが、今回はこの辺りで止めて置く。

GW150914 の諸説の中からどれが正しいのか決める話に戻ろう。aLIGO は 2016 年 10 月から 6 ヶ月間、O1(Observing run 1)より感度を上げて O2 観測をするが、GW150914 のような連星ブラックホール候補に対する検出数は 10 程度で最高の赤方偏移 $z=0.26$ くらいである。ところが、PopII モデルでは最大の $z\sim 5$ 位、PopIII モデルでは $z\sim 10$ 位、原始ブラックホール説では $z\sim 30$ 位である。だから、 $z\sim 30$ くらいまでのこれらからの重力波を検出する必要があるが、重力波も赤方偏移して振動数が低くなるので、現状の aLIGO 等では難しい。

図 15

Pre-DECIGO の想像図 : $z=30$ までの GW150914 のような重力波源を検出可能。出典は

<http://arxiv.org/pdf/1607.00897v1.pdf>

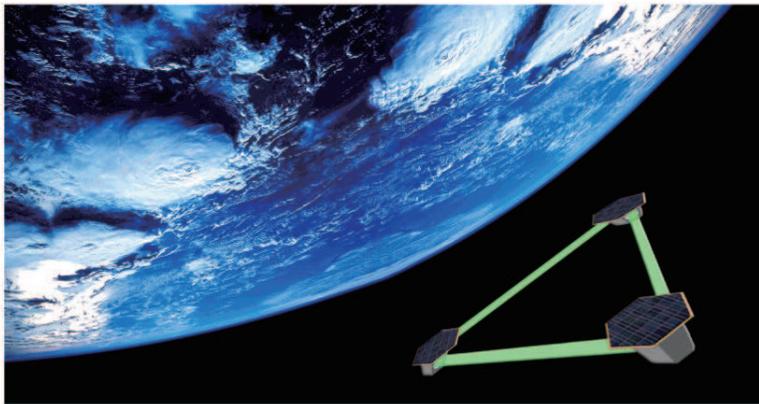


Fig. 1 Image of Pre-DECIGO which is smaller size DECIGO consisting of three spacecraft arranged in an equilateral triangle with 100 km arm lengths orbiting 2000 km above the surface of the earth.

そこで、我々が最近提案しているのが 0.1Hz 帯の宇宙重力波干渉計 DECIGO(DECi herz laser Interferometer Gravitational wave Observatory: デシヘルツレーザー干渉系型重力波天文台 :

別名 Decide and Go project)である。これを地上ないしは地下で作ろうとしても地面振動が強くて防振は不可能なので宇宙で作る。今のデザインは pre-DECIGO で、図 15 のように地表から 2000km のところに腕の長さが 100km の正三角形の干渉計を作ろうというものである。

最近 LIGO は Cosmic Explorer と称して腕の長さ 40km、鏡の質量 320kg の干渉計を地下に作ってやはり $z=10-30$ までの GW150914 のような重力波を検出しようとしている。

<http://arxiv.org/pdf/1607.08697v1.pdf>

我々の最大の狙いは何か？

図 13 に戻って一番下の図の 16.42 秒後の波形を見て欲しい。なんとなく減衰しながら振動している波形が見えないだろうか？これは我々が最も注目している部分である。O1 は aLIGO の最終感度の 3分の1くらいで O2 は半分くらいなので GW150914 を最終感度で見ればこの減数振動はもっと綺麗に見えるはずである。減衰振動は振動数と減衰率の 2つの量で特徴つけられる。この 2つの量はアインシュタイン理論が正しければ、予言値がある。これと、実際の観測とを比べるとアインシュタイン理論が強い重力場でも正しいかがわかるとともに、ブラックホール候補の事象の地平面を殆ど確認したことになり、晴れてブラックホール候補の候補という文字が取れて、ブラックホールと言える。

もう少し難しく言おう。アインシュタインの一般相対性理論によるブラックホールには中心に潮汐力（リーマンテンソル）という物理量が発散する特異性がある。普通の物理学の理論では物理量が発散すれば、直ちにその理論は棄却される。しかし、うまい具合にカー時空というのに限って、この特異性が事象の地平面に

覆われて外から見えない。つまり、物理の破綻が外界に影響を与えないので一般相対性理論は事象の地平面の外ではオーケーとなっている。しかし、これはおかしい理屈である。不運にもブラックホールに自由落下する人を考えよう。この人にとっては事象の地平面に到達しても等価原理により局所的には無重力だ。潮汐力が強くてバラバラにされると思うかもしれないが、質量の大きなブラックホール、例えば太陽質量の1億倍のものを考えると事象の地平面を通過するときの頭の上と足の先での重力加速度の違いは地上の重力加速度 g の100万分の1で痛くも痒くもない。この不運な人はその先で何を見るのだろうか？現実には、量子重力の効果が効いて発散はないはずである。もし発散がなければ、事象の地平面も不要なはずである。だから、この減衰振動から量子重力の効果が見えてくるのではないかと私は考えている。

さて、O1が始まる前に最も期待されていたのはハルステイラーパルサーのような連星中性子星の合体に伴う重力波の検出であった。この連星中性子星の合体では、金や銀ができるかもしれないとも言われている。また、ハルステイラーパルサーのような観測例はないが中性子星-ブラックホール連星の合体も興味深い対象である。しかし、まだ検出されていないので、O2で検出されてから、この電子本に書き加えることにして、今回はここで筆を置く。

御礼

原稿に目を通してくださり、有益なコメントを下された真貝寿明さん、伊藤洋介さん、森田正亮さん、中野寛之さん、譲原浩貴さん、神田展行さん、久徳浩太郎さん、大橋正健さん、宮本晃慎さん、植田憲一さん、吉田宇一さんに感謝します。

