

講演 7

ブラックホールだらけの宇宙

基礎物理学研究所教授 井岡 邦仁



こんにちは。井岡と申します。京都大学の基礎物理学研究所というところから来ました。

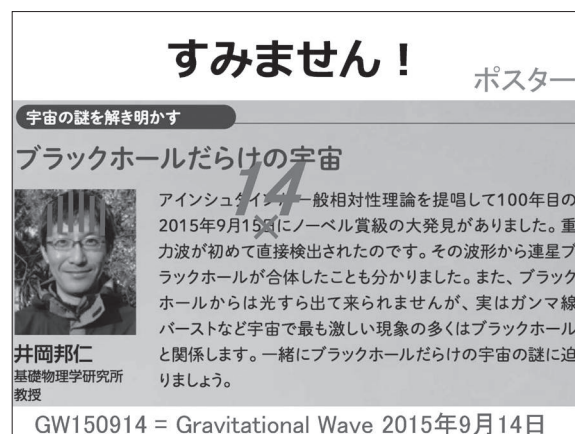
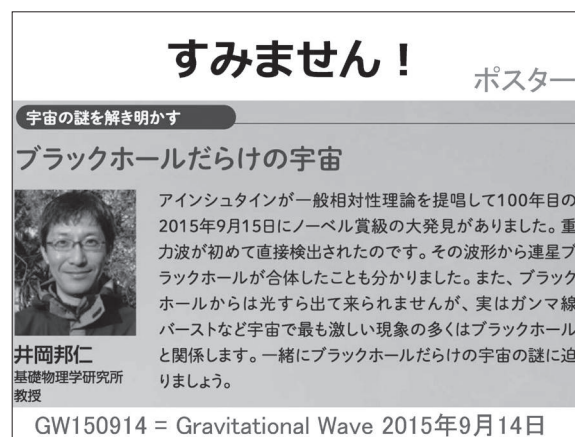
この研究所、時々省略して「基研」と呼ばれています。別に危険なことを研究しているわけではなくて、宇宙の研究をしています。

よく、宇宙の研究は何の役に立つんだと、特に僕の場合は家族からよく聞かれるんですが、何の役にも立ちません。立たないんですが、皆さん、恐らく小さいころに、一度は宇宙はどうやって始まったんだろうとか、ブラックホールって何だろうと思ったことがあると思います。その研究を続けているというのが我々です。その研究をすることは非常におもしろいです。めちゃくちゃおもしろい。それを今日、伝えられたらいいなと思っています。

ところが、最初、いきなり謝ることから始めないといけません。これ、ポスターなんですけど、アインシュタインが一般相対論を提唱して100年目の2015年9月15日ノーベル賞級の大発見がありました。重力波が初めて直接検出されたのですって書いてあるんですが、これちょっと間違えてしまって、

実は重力波が発見されたのは9月14日です。

15日じゃないです。すみません、僕のミ



スです。

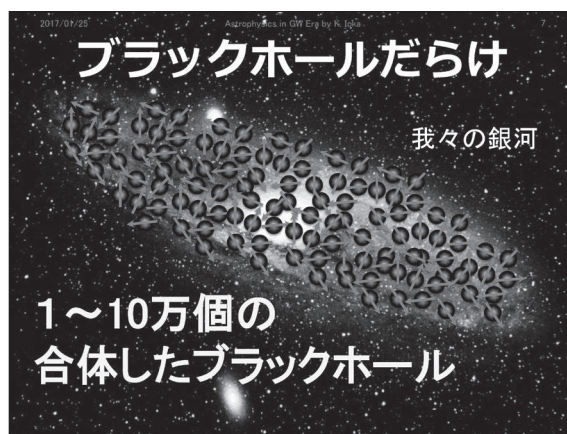
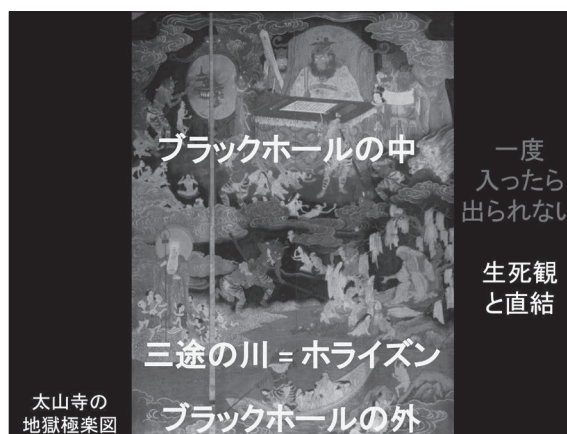
気を取り直して、これ、「インターステラー」という映画があります。多分、知っている人はあんまりいないかもしれませんが、そこで出てくるブラックホールの姿です。

ブラックホールというと、全てのものを吸い込んで、真っ黒で何も見えないと思うかもしれませんが、全くそうです。

そうなのですが、ブラックホールの周りに、もし物があると、こんな感じに見えるというわけです。この場合は、ブラックホールの周りに円盤、土星の輪っかみたいなやつが周りがあると、そうすると、向こう側にある輪っかから出た光がブラックホールの重力に、すごい強い重力によって曲げられて、ブラックホールを迂回するようにして、こうやってくる。こっちの下からやってくる光もあるということで、何かこんな感じに見えるというわけですね。これからわかるように、ブラックホールというのはすごい強い重力を持っています。

ちなみに、この映画、監修者にキップ・ソーンという人が入ってます。この方は、恐らく近々ノーベル賞をとると思われます。今回、重力波が発見されたんですが、その検出の原理を最初に考案した一人です。我々の業界では非常に有名な方です。なので、この映画に出てくる数値は異常に細かく計算されていて、出てくる数値が正確なんでちょっと驚きます。

さて、ブラックホール、何でこんなに皆さん興味を持つのかというと、一つの理由は、一度入ったら出られないと、これ、怖いですよ。まさに、天国、地獄みたいなもので、ブラックホールの外が我々の世界だとして、



三途の川を渡ると、もう戻ってこれないというわけです。こういう生死感と直結すると、やっぱりみんな興味を持ちます。

そういうブラックホールが、きょうはめっちゃくちゃ大量にあるぞと、特に、合体したブラックホールが大量にあるということがわかってきました。

これ、我々の銀河の図なんですけど、当然我々、銀河の内側にいるので、こんなふうに見えるわけじゃなくて、これ実はアンドロメダ銀河なんですけど、似たような形をしています。我々は中心からちょっと離れたここら辺に、8 キロパーセクという、そういう距離に住んでいます。

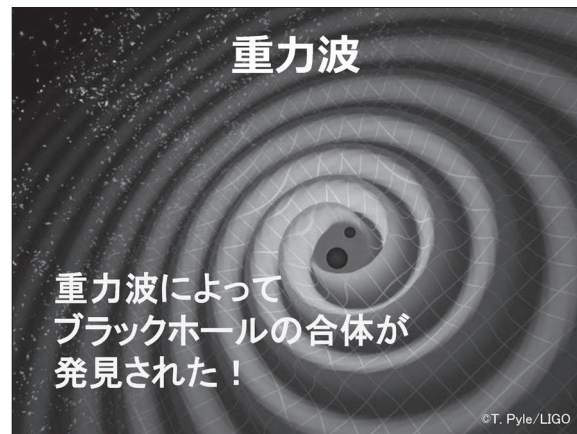
この銀河の中に1万から10万個の、しかも合体したブラックホール。合体したブラックホールなんですごく回転します。回転したブラックホールが大量にあると、こういうことがわかってきた。

しかも、それが重力波というものによって、そういうことがわかってきたというわけです。

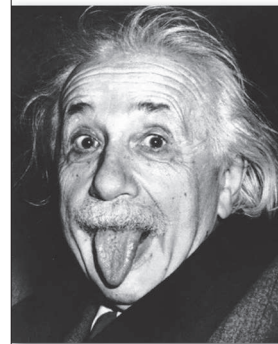
非常にでき過ぎた話なんですけど、アインシュタイン、皆さんご存じだと思いますが、アインシュタインが一般相対性理論をつくったのが1915年、それから100年後、2015年が100年目に当たります。アインシュタインが重力波というのを予言したのが1916年、その100年後に重力波というのが検出された。ちょっと、あまりにも出来すぎているんですが、そういうこともあって、非常に話題になりました。

あらゆる新聞の一面が、重力波を発見、このようにすごい話題になりました。

これを解説していくわけなんですけど、まず



一般相対性理論 100年!!!



重力(時空)の理論

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}$$



重力とは何か？



重力波に入る前に、重力とは何かということをちょっと考えていきましょう。

これ、地球です。リンゴをぱっと手を離すと落ちていきますね。

じゃあ、こうやって、リンゴを何か箱に入れましょう。リンゴと一緒にこの箱が落ちると、この箱の中から見ると、リンゴは浮いているように見えますね。つまり、この箱の中にいると、リンゴには一見重力がかかってないように見える。

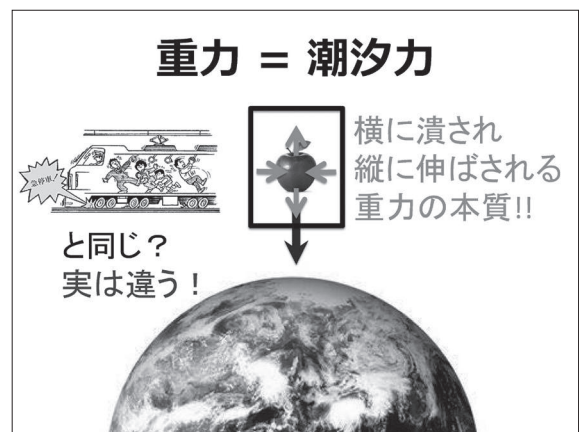
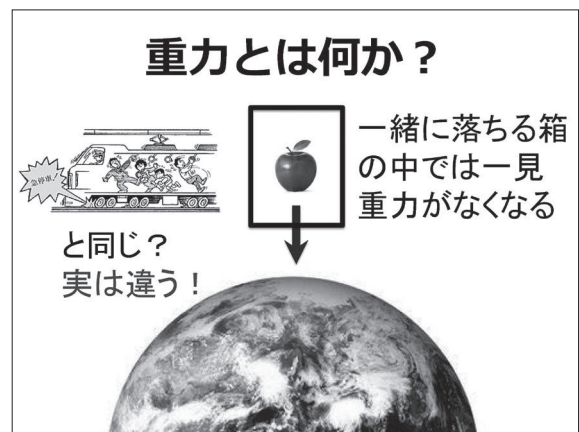
これは、こういう状況と何か似ているわけですね。例えば、箱の中、電車の中にいると、急に止まったり、急に発進したり、そうやって急に加速度をつけて動き出すと、何か力を感じるように見える。これとちょっと似てますよね。

しかし、実はちょっと違います。この場合と、この場合で、実は1点、ちょっと違うところがあります。それは、こっちの重力の場合は、実はこのリンゴ、地球の中心に向かって引かれるので、リンゴからちょっとずつ離れた、こっちの右側は、より内側にぎゅっとされる。リンゴの左側の端は、ちょっとだけ右にぎゅっとされる。

一方、地球に近いほうが重力を強く感じるなので、下側と上側は、どっちかという、下側のほうがより強く引かれます。そうすると、リンゴはぎゅっと引き伸ばされるわけですね。

こういう、横には潰されて、縦には伸ばされる、これが実は重力の本質です。これ、潮汐力といわれます。重力波というのは、こういう潮汐力が伝わる波です。

リンゴが置いてあります。リンゴが置いてあって、ここを重力波がばあっと通っていく



と、リングが縦に伸びて、横に伸びて、こういうゆがみが伝わっていく。こういう潮汐力が伝わっていく波のことを重力波と呼びます。

この重力波というのは光速で伝わります。何でもすり抜けます。これ、ニュートリノよりも透過力が強くて、例えば、地球でも何でもすり抜けます。真空中でも伝わります。

アインシュタインが一般相対論から導出して、1916年に導出している。それで、そこから光速で伝わるとか、これらの性質がわかります。

ただ、この図、あまりにも誇張して描いてあって、こんなにもリングはゆがみません。

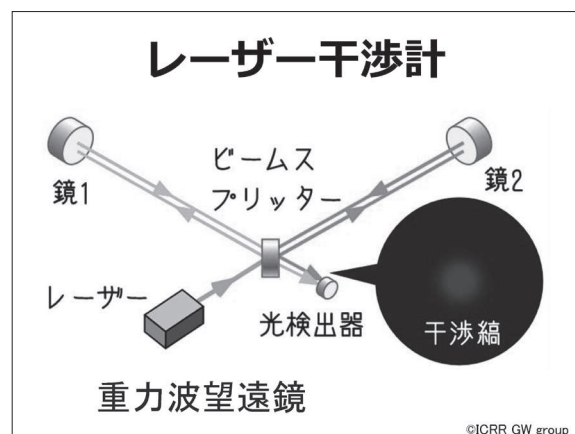
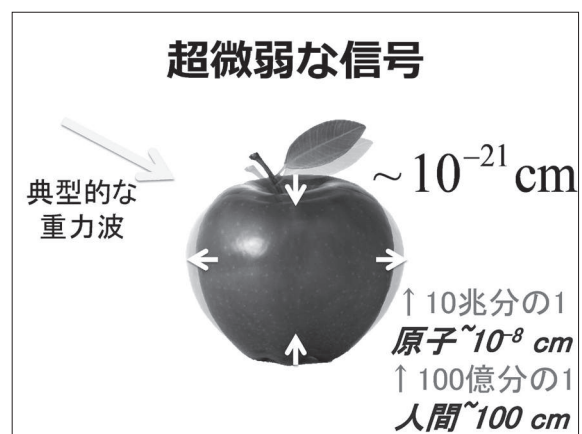
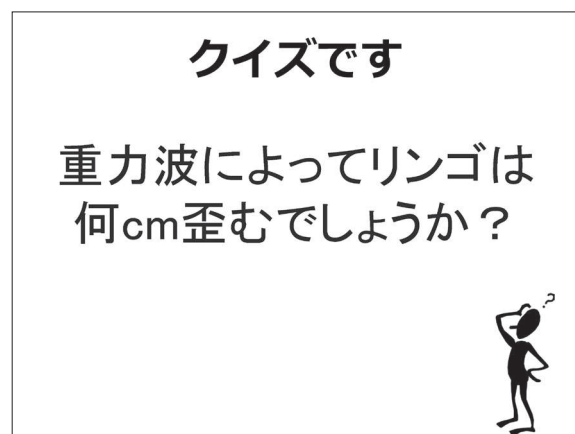
じゃあ、重力波によってリングは何センチゆがむでしょうか？

答えは、10のマイナス21乗センチ。先ほど、ウイルスの話のときに10の31乗個とか出てきましたが、こういう0が21個ぐらいつくような、そういう小さな数です。

これは、原子の10兆分の1、原子のサイズが大体10のマイナス8乗センチなんで、このサイズは人間100センチとしたときの100億分の1です。だから、人間の100億分の1のさらに10兆分の1が、その重力波が来たことによってゆがむスケールなんです。めちゃくちゃ小さいです。

こんなもん、どうやって検出するんやと思いますよね？その原理がこれです。こういうレーザーを用いて検出します。レーザーを打ち込んで、ここで2つに分けます。鏡で、はね返して戻ってきたレーザーを干渉させます。

腕の長さが変わると干渉が強まったり、弱まったりします。この効果を検出します。こ



れが重力波望遠鏡の原理です。

検出しなければならないサイズは、10のマイナス21乗センチ。そのために、感度をよくするよう、このレーザーの1本の腕のサイズ、これを、すごい長くとります。片腕4キロメートル。

これはLIGO といってアメリカにある検出器で、非常に長くとる。

これ、KAGRA、日本の神岡鉱山にある重力波望遠鏡なんですが、片腕が3キロ、これ、私で、ここへ行ってきました。鉱山の中で、中は真っ暗です。真っ暗で、しかも、こういう山の下にあって夏でも涼しいです。

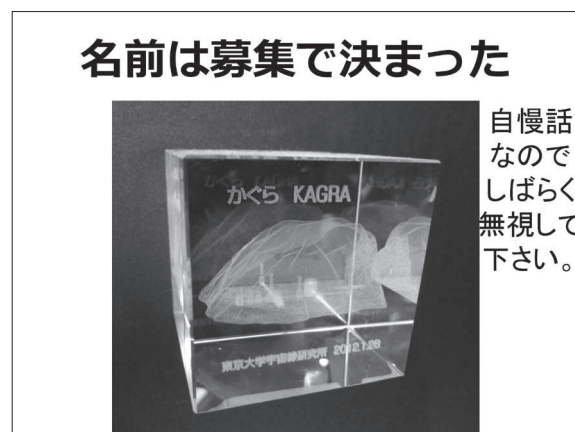
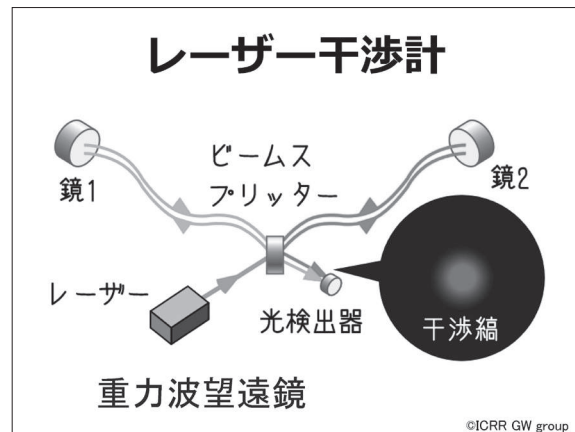
ちょっと間違えると、変なところに入り込んで二度と出てこれないって、ブラックホールみたいなところなんですが、こういう場所に重力波望遠鏡をつくるのは、ここの地盤が非常に硬くて、あまり振動しないと、日本は結構地震が多くて、先ほどのようなすごい小さい微小な信号を捉えるためには、こういう岩盤の硬いところが適しているわけです。

さて、ちょっと小休止で、自慢話なんで恥ずかしいんですが、KAGRA の名前は募集で決まりました。自慢話です。僕自身が決めたわけではないです。僕自身じゃなくて、うちの妻が実は命名者の一人です。

おお！ とかならないのかな。

実は、うちの妻は全く、こういう物理とか、宇宙のことに興味を持っていません。持ってなくて、ちょっとでも興味を持ってもらうために、重力波望遠鏡の名前を募集しているということで、ちょっとそそのかしました。

神岡でつくっている重力波、重力波というのはグラビテーション・ウェーブだよとか、そういう情報を与えたら、じゃあ KAGRA



で行こうという話になって、そのときは全く、その名前が採用されるとは思いませんでした。めでたく採用されたと。それ以降、この KAGRA に関しては興味を持って聞いてくれるようになりました。一応、作戦は成功したと。

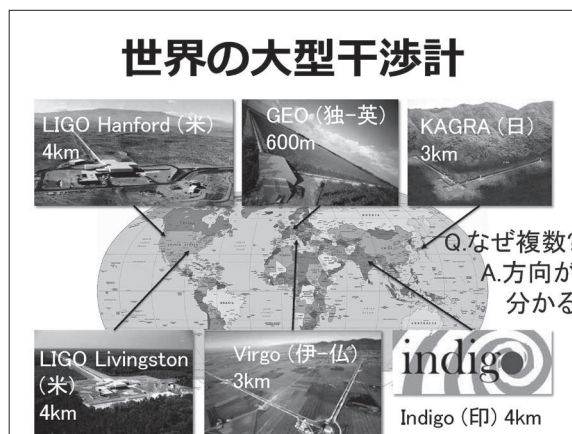
先ほど出てきた LIGO とか KAGRA、こういう検出器が世界に何台かつくられています。

重力波を捉えるだけなら 1 台でいいじゃないかというんですが、そんなことはありません。重力波がやってきた時間が、ちょっとずつ違うわけです。その違いから、重力波がどっちの方向からやってきたかというのがわかります。なので、世界で競争もしていますが、協力もして、重力波を捉えようとしている。

2015 年の末から 2016 年の年始、このころに、すごいうわさが広がります。何か知らんけど、LIGO が重力波を受けたいぞといううわさが、いろんなところ、「サイエンス」とか「ネイチャー」とかにも、ルーモアがどうこうとか、ブラックホールがぶつかったみたい、これ全部うわさです。ルーモア、ルーモアとか言ってですね。実は、このおじさんが、ぺらっとしゃべってしまったらしいんですが、ただし、ルーモアの段階でいろんな説が出回って、どれが本当かよくわからんという状態になっている。

ちょっと余談になりますが、何か、うそを隠しとくというのは、ほとんど無理ですね。こういう重力波の研究をしているのは 1000 人とかでやっているんで、そのうち 1 人ぐらいはちょっと口の軽い人が絶対います。いるんで、絶対秘密を守っておくのは難しいんですが、逆に、いろんな情報を流されると、どれが本当かわからなくなる。だから、真実を隠すには、うそを大量に流せばいいということが今回わかりました。

これ、その記者会見発表のときですが、2 月 12 日に時差のために日本では夜中です。夜中で、恐らくこの発表、何か発表があるぞといううわさがあったんで、多分研究所のみんなは、研究室に夜中でも来ているだろうと思って僕が行ったら、案の定来ていました。来て



いて、なぜかシャンパンで乾杯しているという状態で、研修室で酒を飲むとは何たることだと硬いことは言わないでください。その発表があって、重力波を受けたぞと。

これが、実際コンピューターシミュレーションで、同じ物理パラメーターを使って計算したやつです。もちろん、ブラックホールは光を放たないので見えません。でも、もし近くで見たら、こんな感じになるぞというシミュレーションです。

後ろの星の光が重力で曲げられて、ぐるぐる回っているのがわかります。重力波が出ているんですが、我々の目には見えません。ガーンとぶつかって、一つの回転したブラックホールになる。

これは数値計算、コンピューター上で実際に計算したブラックホールの合体の様子です。

これが、先ほど重力波が来たら物がゆがむと言いました。そのゆがみの度合いです。こっちが時間です。3つ図があって、ゆがみが振動しながら来ているのがわかります。

これが LIGO のハンフォードというところ、こっちがリビングストンのデータ、これを重ねると、どうもぴたり合うぞというわけですね。

重力波というのは、よく音に例えられます。

(音を流す)

聞こえますか。

聞こえましたか、合体しましたね。

さっきのが 1.4 倍の太陽質量の連星の合体です。

(音を流す)

今度は 0.5 倍の太陽質量です。質量がちょっと軽いです。軽いと、音が若干高く聞こえますよね。しかも、結構長い時間です。

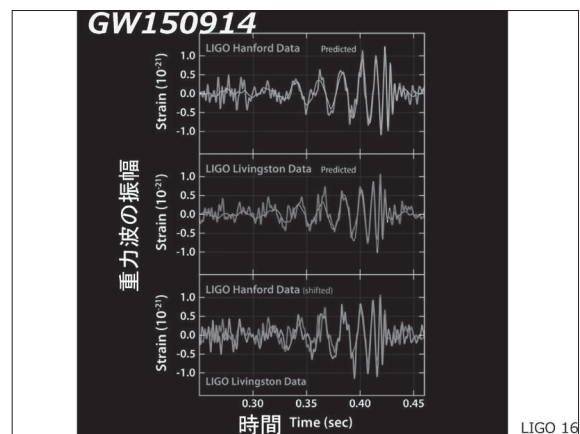
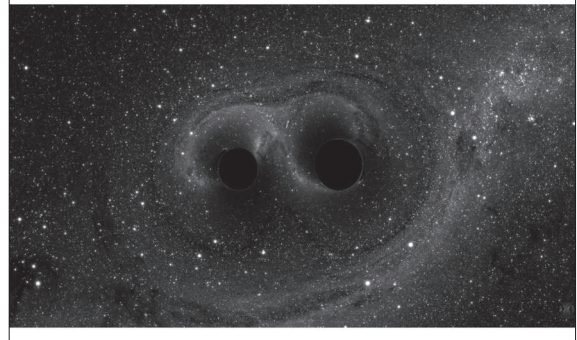
これが 10 倍です。

(音を流す)

低いですね。何か低いですね。

さて、今回受かった、観測されたパラメーターで重力波を音にすると、どうなるか。

重力波の初の直接検出



重力波の「音」

- 太陽質量の1.4倍の連星合体
(典型的な中性子星連星の場合)
- 太陽質量の0.5倍の連星合体
(原始ブラックホール?)
- 太陽質量の10倍の連星合体
(ブラックホールの場合)
- 太陽質量の32倍と29倍の連星合体
(初観測された重力波と同じ)

(音を流す)

聞こえましたね。聞こえたと思った人は、うそですよ。低過ぎます。低過ぎます。

先ほど聞いてもらったように、こういう波形、つまり音ですね、音のようなものから、重さとか、間隔、距離がわかります。

そこからわかったことは、ブラックホールの質量が30倍の太陽質量ぐらい、これ30倍の太陽質量のブラックホールというのは、サイズが、ぶつかる前に90キロメートル、ぶつかって60倍の太陽質量になるので、大体半径が180キロメートル、これぐらいです。

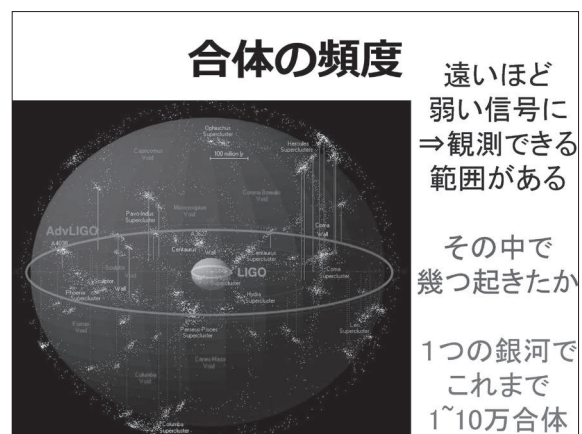
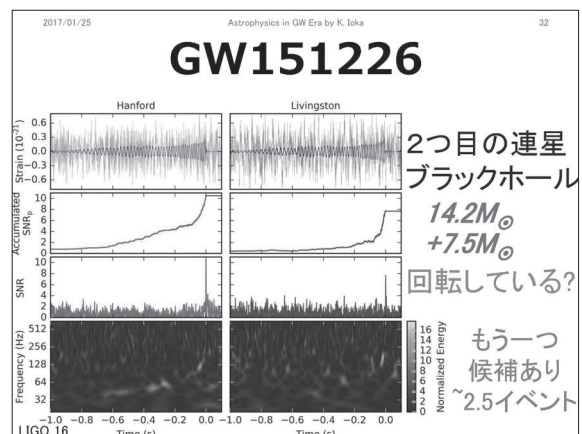
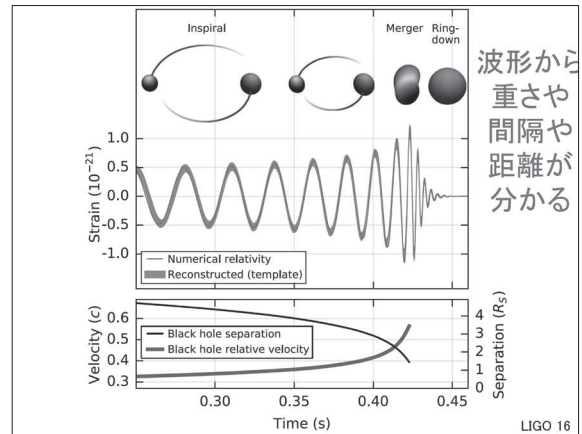
2つ目のブラックホールの合体もわかりました。これがそのデータで、こういう14倍の太陽質量と7倍の太陽質量のブラックホールが合体して、もしかしたら、片方が回転しているかもしれないと。

3つ目は、ちょっとデータが悪くて、候補段階なので、全部で2.5イベントの段階です。

2.5イベントから大体宇宙で、どれぐらい合体が起こっているかという頻度が見積もられました。当然、遠くに置くほど信号が弱くなります。そうすると、観測できる範囲があるわけですね。

今回何か、ある観測時間の間に何回起こったかという、その回数がわかったので、この範囲内で何個起こっているかというのがわかります。しかも、この範囲内に何個銀河があるかというのがわかっているのです。一つの銀河で年間何回起こるかというのがわかるわけです。

そこから、宇宙年齢かかったら何回合体するかというのがわかります。それがさっき言った1万から10万個合体しているというや



つです。

これで、重力波が観測されました。連星のブラックホールがあるということが初めてわかりました。だけど、さらに新たな謎が出てきました。こんなに合体しているのに、何で今まで知らなかったのかと、こんなに多くて大丈夫なのかとか、何かブラックホールが若干重いぞとか、いろいろ。

特に、その重力波が観測される前、ブラックホールの形成といえば、ガンマ線バーストというのが関係しているということが研究ではわかってきています。これは、これ $E = mc^2$ 、これもアインシュタインが出した式ですが、エネルギーが重さと等価であるという式です。

例えば、原子爆弾のエネルギー、これが例えば、1 キログラムの物質の重さと同じぐらいだろうと。そうするとガンマ線バースト、GRB とか頭文字をとって訳されますが、このエネルギーは、何と太陽と同じぐらい。つまり、太陽が一生をかけて出すエネルギーを数秒で出すような大爆発です。GRB は宇宙一明るい大爆発とよく言われます。

このガンマ線バースト、実はブラックホールの形成とかかわっているんじゃないかと思われています。特に、いろんな観測的事実から、ガンマ線バーストが、どうも巨大な星の重力崩壊のときに生じるということがわかってきています。そのときに光速の 99.99% の以上の非常に速いジェットが星をボカンと突き破ってガンマ線バーストが起こると。

恐らく中心ではブラックホールが形成されて、そこから何らかの方法でジェットが出ているということがわかってきています。

もしかしたら、重力波をつくるブラックホ

新たな謎

- 今まで知らなかったの？
- こんなに多くて大丈夫？
- ブラックホールが大きすぎない？
- 連星間が近すぎない？
- そもそも本当にブラックホールなの？
- これからどうなるの？
- . . .



11 Jan. 2017

Multi-Messenger by K. IOKA @KMI collo.

35

ガンマ線バースト

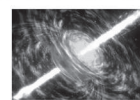
$E=mc^2$ (アインシュタイン)



原子爆弾

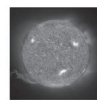


~1kg



GRB

~ 10^{52} erg



太陽

~ 10^{33} g

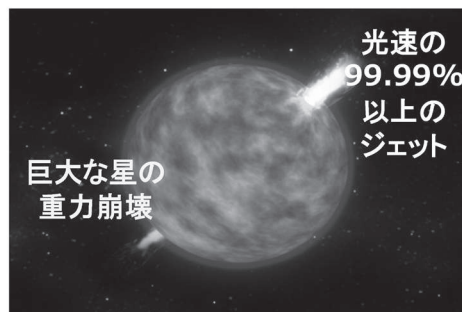
太陽が一生かけて出すエネルギーを数秒で放出
GRBは宇宙一明るい大爆発

11 Jan. 2017

Multi-Messenger by K. IOKA @KMI collo.

36

GRB ≈ ブラックホール形成

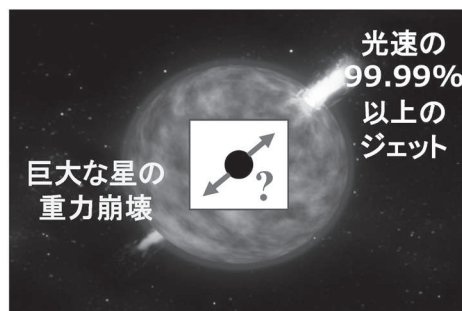


11 Jan. 2017

Multi-Messenger by K. IOKA @KMI collo.

37

GRB ≈ ブラックホール形成



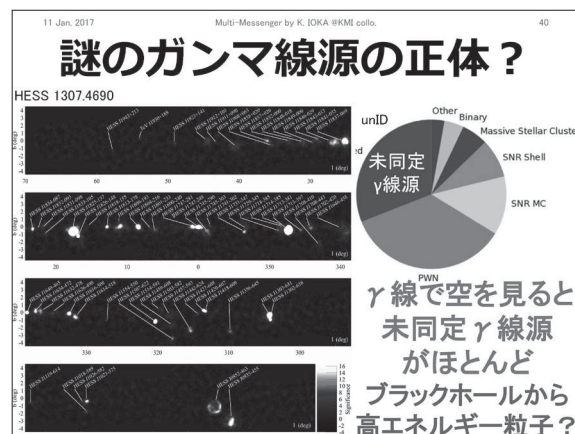
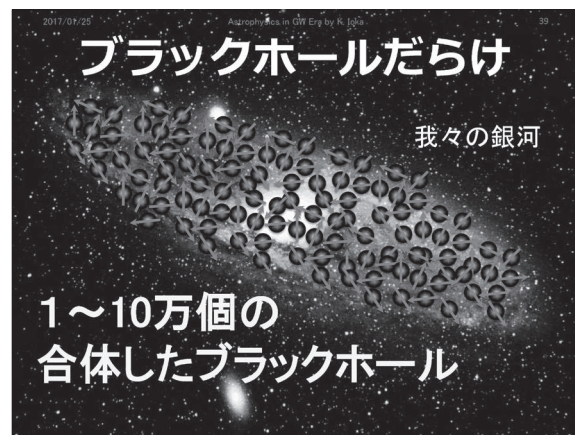
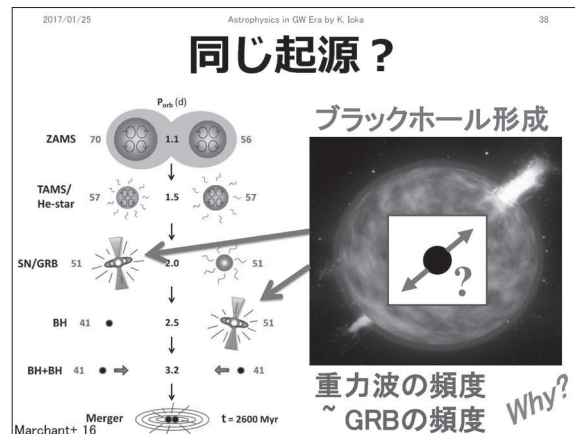
ールの合体、その前段階、この段階でガンマ線バーストが起こっているかもしれない。ガンマ線バーストが起こった後で重力波が出ている、そうかもしれないという可能性があります。

実際、不思議なことに、重力波の頻度とガンマ線バーストの頻度がなぜか同じです。これ、まだわかっていません。一つの仮説。

さらに、こんだけ多く起こっていると、先ほどから言っているように、我々の銀河に1万個から10万個もの合体したブラックホール、これらは全部くるくる回転しています。すごいエネルギーを持っています。大体、我々の銀河で起こったスーパーノヴァ、超新星のエネルギーを全部足したぐらいの巨大なエネルギーを持っているんですが、こいつらもガンマ線を出しているかもしれない。

実際、我々の銀河、夜空でいうと天の川です、天の川の方をガンマ線で見てやると、何か光っているものがいっぱいあります。その中で、それがどういう天体かというのが分類分けされているんですが、実は一番多いのが、ガンマ線だけ出していて、ほかの波長でよくわからない正体不明のガンマ線源があります。もし、ブラックホールなら、ほかの波長であまり光りませんから、こういうのが高エネルギー粒子の起源かもしれない。

またまた、もっと極端な説も挙げられていて、これ我々の世界、現在です。こっち時間、宇宙の遠くを見ると、遠くを見るということは過去を見ることになります。過去を見ると、ここら辺で初めての銀河ができて、ここら辺で初めての星ができた。ここら辺で、いわゆる宇宙背景放射といわれる放射が生まれているところなんです、電磁波で見える一番遠



いところ、それよりも、さらに昔にブラックホールがつけられたかもしれないという仮説もあって、いろんな説が出てきています。こちら辺、今すごい熱い議論が行われています。

こういうのを重力波だけじゃなくて、電磁波、ニュートリノ、宇宙線という、こういうマルチメッセンジャーで調べていこうというのが、21世紀に我々がやろうとしていることです。

20世紀は電磁波だけでした。電磁波、特に光ですね。目で見える可視光、可視光で我々やってきましたが、20世紀は、その可視光から、電波とか、赤外線、さらにガンマ線といろいろ広げてきました。これ21世紀になって、こういう別の粒子も使って宇宙を調べていこうということになっています。

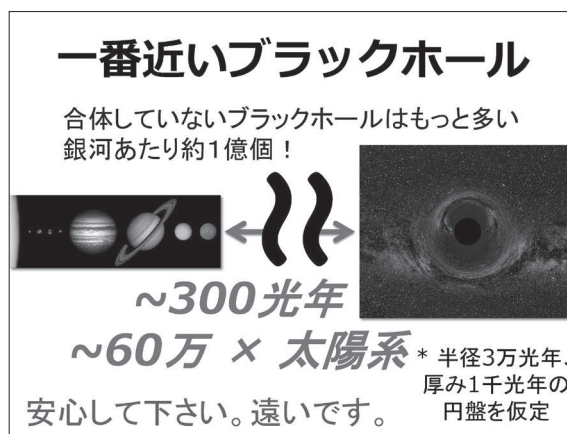
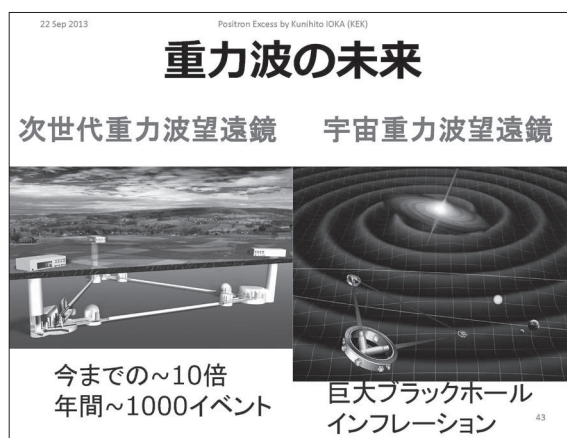
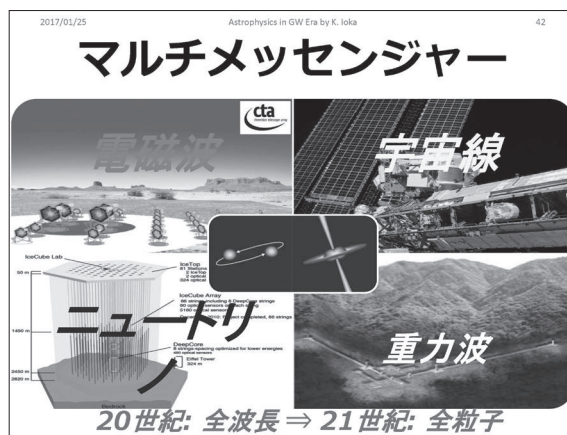
さらに重力波は、非常に未来が明るくて、次世代望遠鏡、既に計画されています。今までの10倍ぐらいのサイズ、これ片腕が30キロとかでめちゃくちゃ巨大なんですけど、これでやると年間1000イベント、もう毎日重力波が受かるという時代が来ます。

さらに、宇宙にさっきのレーザー干渉計を打ち上げてしまおうという、そういう計画もあって、これでやると、すごい巨大なブラックホールまで見えてしまう。もしかしたら、さっき言っていた宇宙の始まりまで見えてしまうかもしれないということで、すごいおもしろい。

ちなみに、こういう話をうちの家族にすると、よくわからないけど、そんなにブラックホールがあったら、近くにあって怖いとか言うんですね。

そのために、これを用意してきましたが、合体してないブラックホールは実はもっと多いです。銀河あたりに約1億個あります。

ただ、銀河というのは非常に大きいです。これを太陽系とすると、大体ここから一番近いブラックホールで300光年ぐらい離れていて、これは太陽系の大体60万倍なんで、我々が生きている間には遭遇しない。遠いです。



というわけで、重力波が初めて直接観測されました。連星ブラックホールが初めて観測された。ブラックホールが非常に多いということがわかってきた。

新たな謎が出てきています。これ、ガンマ線バーストと関係しているのかとか、未同定ガンマ線源との関係性はとか。原始ブラックホールだったら、これはものすごいことになります。これをマルチメッセンジャーで解いていこうと。

きょうは、重力波とブラックホールだけの話をしましたが、宇宙は本当に謎だらけです。ぜひ皆さんも参加して、この謎を解いていく、非常におもしろいですから、ぜひ一緒に解いていきたいと思っています。

どうもありがとうございました。

まとめ

- 重力波の初の直接観測
- 連星ブラックホールの初観測
- ブラックホールだらけ
- 新たな謎
 - － γ 線バースト？
 - － γ 線未同定源？
 - － 原始ブラックホール？
- マルチメッセンジャー

宇宙は
謎だらけ
君にも
解ける！

どうもありがとう
ございます