

重力波検出に向けての取り組みと将来の展望

東京大学大学院理学系研究科物理学専攻

宇宙線研究所 重力波推進室

修士課程 1年

手嶋航大

2012年8月15日

目次

第 1 章	本公演の概要	2
第 2 章	重力波検出に向けての取り組みと将来の展望	3
2.1	重力波とは	3
2.2	重力波の性質	3
2.3	重力波の間接的発見	4
2.4	重力波検出への取り組み	5
2.5	KAGRA プロジェクト	5
2.6	雑音源とたゆまぬ努力	6
2.7	将来の展望	8
	参考資料	9

第1章

本公演の概要

私は、学部時代、他大学で宇宙論を専攻しており、今春より、宇宙線研究所 重力波推進室に所属し、重力波天文学の研究を進めている。しかし、まだこの分野に入りこんでから、月日が浅く、重力波の概念について基礎から学ぶことも行っている。そこで、本公演では、初学者にもわかりやすく、重力波とは何か、それが検出されることによってどのような利点があり、今後にどのように活かされていくのかについて、そのアブストラクトを解説する。

第 2 章

重力波検出に向けての取り組みと将来の展望

2.1 重力波とは

重力波は、1915年に、A.Einstein 博士によって発見された一般相対性理論の中で予言された、質量の大きい物体が運動することによって生じる時空の歪みが波動となって空間を伝播するものである。一般相対性理論では、重力が物体の質量による時空の歪みによるものであると説き、現在では多くの一般相対論的な現象を、実験の観点から詳しく研究されており、その精度は確かなものとして、現代物理学の根底を支える理論である。一般相対論における基礎方程式は、以下に示すアインシュタイン方程式

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu} \quad (2.1)$$

である。これは一般に、非線形な方程式であるため、解を求めるのは容易ではない。そこで、計量 $g_{\mu\nu}$ を、ミンコフスキー背景時空とその摂動項、すなわち

$$g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} + h_{\mu\nu} \quad (2.2)$$

という形に展開し、摂動計算を行ってやることにより、 $\psi_{\mu\nu} \equiv h_{\mu\nu} - \frac{1}{2}\eta_{\mu\nu}h$ という置き換えにより、波動解

$$\square\psi_{\mu\nu} = -\frac{16\pi G}{c^4}T_{\mu\nu} \quad (2.3)$$

を得る。解釈としては、真空中を仮定すると、 $T_{\mu\nu} = 0$ であり、さらにダランベルシアンに光速 c が含まれることから、真空中を光速 c で伝播する波動が存在することがわかる。これが理論上の重力波の予言である。また、これについて TT ゲージ (transverse-traceless gauge) を採用すると、進行波に対して横波の 2 つのモード (これを「+モード」と「×モード」と呼ぶ。) があることが分かる。これは、重力波が到来して、時空の一方が伸びると、他方が縮むような変動を引き起こす。このことから、重力波は四重極放射であることがわかる。この概念は後に述べる検出原理において、大変重要な意味を持つ。

2.2 重力波の性質

重力波は、質量がある物体であれば、それが運動することによって、その波動を放出することができる。言ってみれば、その場で腕をブンブン振り回しても、重力波は発生する。しかし、それを重力波放出の理論に

よって計算すると、極めて小さく、ほとんど存在しないに等しい。そのような状態では地上で検出することは不可能であるため、我々の目指すターゲットを、宇宙に存在する非常に重い天体に向けるのである。具体的には、

- 中性子星連星の合体
- 超新星爆発
- パルサーからの連続波 ...など

である。もし、そこからの重力波の信号をとられることに成功すれば、中性子星連星の合体からは、中性子星における状態方程式への理解がすすみ、中性子星の状態や大きさなどについて有力な手がかりが得られる。このことにより、素粒子物理学や、星形成理論において、進展をもたらす可能性がある。また、超新星爆発からも、そのメカニズムについて、有力な手掛かりや、実験的な制限を与えることができることが期待される。

2.3 重力波の間接的発見

重力波は、ここまでの話では理論上の産物であるかのように思えるが、観測的に実在することがわかっている。

1974年、R.A.HulseとH.Taylorは、PSR1913 + 16という中性子星連星を発見した。観測すると、その公転周期が次第に短くなっていることがわかった。これを長年計測し、一般相対論の重力波の理論によって、モデルを立てると、以下の示すグラフのように、ほぼ完全に一致したのである。これは、中性子星が重力波を放出することによってエネルギーを失い、互いの重心に接近していると解釈できる。これにより、重力波の存在は、間接的ではあるが、ゆるぎないものとして受け入れられ、この結果を受けて2人はノーベル物理学賞を受賞している。以上のように、間接的にはその存在が明らかになっているが、直接的に観測された例は今まで

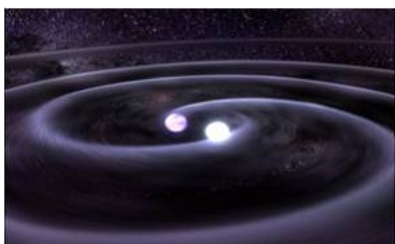


図 2.1 中性子星連星の概要図

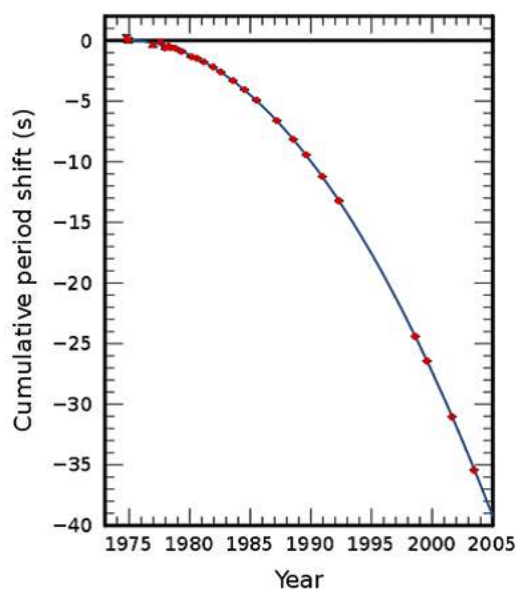


図 2.2 Hulse と Taylor の行った観測と、重力波理論による予言との比較

ない。そこで我々の夢であり、目標はこの重力波を直接とらえることにある。

2.4 重力波検出への取り組み

重力波の横波のモードが2種類あることを2.1節で述べた。すなわち、重力波が到来すると、時空の他方が伸びる代わりに他方が縮む変化を起こす。これをうまく利用し、かつて、マイケルソンとモーリーが、エーテルの存在を確かめるために開発したマイケルソン干渉計を応用させて、重力波の直接的な検出を目指す。

つまり、レーザー光を発射して、ビームスプリッターによって2つの腕に光が分けられることになるが、重力波が到来したとき、片方の腕が時空とともに伸び、他方の腕はそれに対して縮むので、光が走る距離が変わる。そして腕の両端にある鏡が跳ね返し、再びビームスプリッターに戻ってきたときには、光の位相差が生じるため、結果干渉を起こし、光検出器を通じてその信号を見るという仕組みである。

今回の発表では、団体ブースとして、マイケルソン干渉計のモデルを展示させていただいた。多くの方に実際に触れたり、ポスターをご覧に頂き、重力波についての関心を持っていただけたら幸いである。

実際、我々が利用する干渉計は、これほど単純ではない。実際の光の位相差を最大限にするためには、腕の長さは少なくとも750kmは必要になると試算される。地球は球体なので、これでは正確に測定することができず、地上に干渉計を設置することはできない。そこで、以下に示すようなFabry-Perot干渉計を採用する。これは、入射した光を、高い反射率を持つフロントミラーによって打ち返し、バックミラーとの間で何重にも多重干渉させるものである。これによって、腕の中に光の大きなパワーをため込むことができ、実効的に腕の長さを伸ばすことができる。

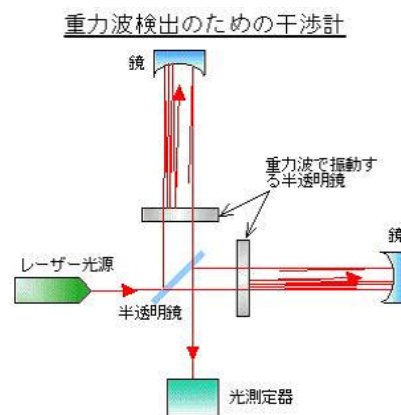


図 2.3 Fabry-Perot 干渉計

2.5 KAGRA プロジェクト

我々が進めているプロジェクトに、大型低温重力波望遠鏡 (LCGT) がある。愛称は「KAGRA」である。長年にわたり計画が進められ、実際に導入される装置なども完成しつつあるが、ついに今年の1月に建設が始まった。設置場所は神岡鉱山の地下1000mであり、この場所では、重力波信号に大きな影響を及ぼす地面振動雑音から干渉計を守るための工夫である。実際、地面で感じる振動に比べて、神岡鉱山の地下は100倍から、

周波数によっては1000倍も防振される。似たようなプロジェクトは、海外でも行われているが、KAGRAの大きな特徴は地下に干渉計を設置している点である。KAGRAは、前節で述べたようなFabry-Perot型の干渉計であり、基線長は3kmにとっている。それ以外に、微々たる重力波の信号をとらえることができるように、さまざまな雑音源を最小限に抑える最先端の技術があらゆるところに導入されている。

そもそも重力波の信号のスケールはどれくらいになるか。100Mpc離れた中性子星連星の合体の場合を考

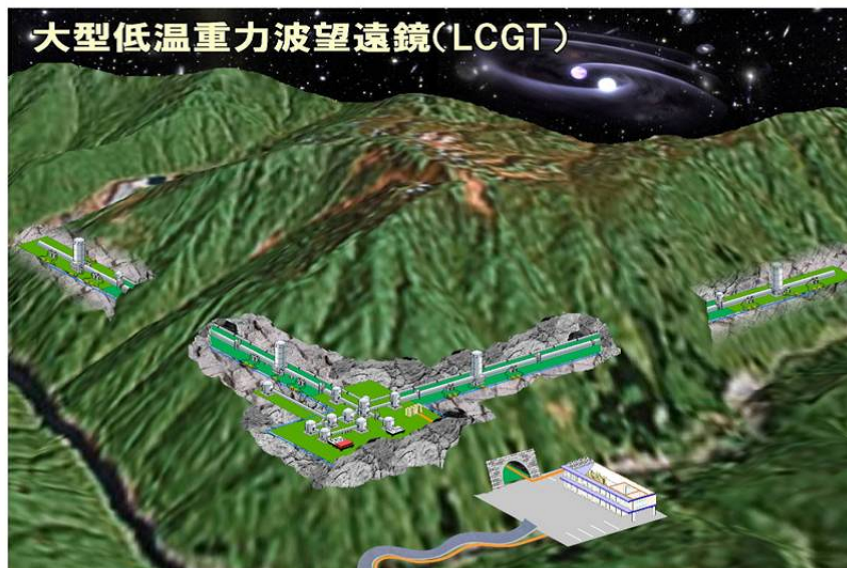


図 2.4 KAGRA の概要図

えると、 $h \sim 2.8 \times 10^{-22}$ であり、これは、太陽と地球の間の距離を水素原子1個分だけ変動させるような比率である。これはきわめて小さく、基線長3kmのKAGRAの腕に換算すると、 10^{-20} mの変動となる。これほど小さな変動をとらえるためには、その信号を隠してしまうさまざまな雑音からいかに守るか、大変な努力が必要になる。

2.6 雑音源とたゆまぬ努力

実際にどのような雑音源があるのか。ここでは大きく3つについて概略を述べる。

2.6.1 地面振動雑音

地面は、自信がなくても常時低周波数の振動がある。これが重力波の信号に、低周波の領域で大きな影響を与える。1つの工夫は神岡鉱山の地下に設置して地上よりも振動を抑えることが挙げられるが、それでも重力波信号の 10^9 倍の大きな変動を起こし、とてもではないが信号を見ることができない。しかし、干渉計の鏡を、多段の振り子によって吊るすことによって、防振させることができる。そして、共振周波数付近では、ダンピングを導入することによって、防振を実現している。

2.6.2 熱雑音

原子レベルでは、干渉計を構成している部品が、熱振動しており、これも信号に大きな影響を及ぼす。基本的には、冷却をしてやることになるが、KAGRA では、冷凍機を用いてこれを行っている。ほかに、装置外部からの熱の流入を抑えたりするなど、冷却技術の向上がカギとなるのは言うまでもない。あるいは、Q 値の向上を進める研究も行われている。

2.6.3 散乱雑音

干渉に用いる光は、高いコヒーレンス性を持たせたレーザーであるが、量的に見れば、レーザー光は光子の集合体とみなすことができる。その光子が、1秒間にどの程度飛来するからは、ポアソン分布によって決まり、ばらつきがあることが分かる。この量子的な効果が、信号に影響を及ぼす。これは、レーザーの出力のパワーを向上させることによってある程度抑えることができることが分かっており、パワーリサイクリング法などにより、フロントミラーから透過によって外部に漏れるレーザー光を打ち返して実質的なパワーを向上させようとする方法である。

ほかにも、レーザー光に輻射圧によって鏡が振動する「輻射圧雑音」、レーザー光の強度や周波数がそろっておらず、ゆらぎを持つことによる雑音、腕の中の空気の密度のわずかなゆらぎからレーザー光の屈折率が変化してしまう、残留ガスの影響、制御に由来する雑音など、極微な重力波信号の検出を阻む雑音がさまざまあり、一つ一つをつぶしていかなければならない。我々の研究は、こういった雑音を以下に抑えるかに特化しているといってもよい。そしてそのような英知を結集した KAGRA では、必ずや重力波信号をとらえられるに違いない。

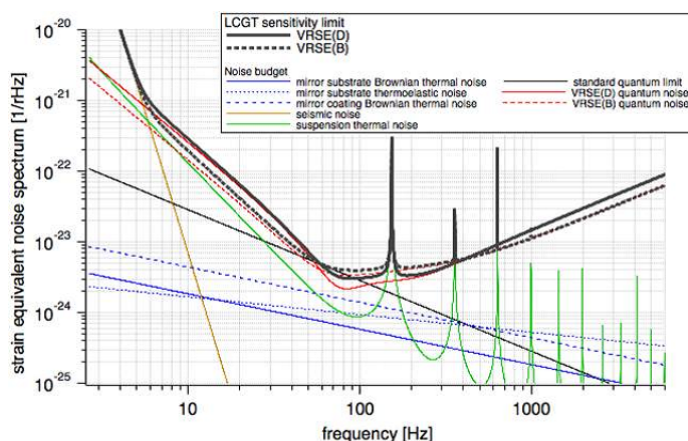


図 2.5 KAGRA の目標感度曲線。横軸は重力波の周波数、縦軸は、腕のひずみであり、下へ行くほど感度が良いことを意味している。それぞれのグラフが各雑音で決まる感度であり、そのグラフより上の領域であれば、信号をとらえることができる。我々は 100Hz 帯の重力波の観測を狙っており、 10^{-23} オーダーまでの比率の重力波が KAGRA でとらえられる可能性を示している。

2.7 将来の展望

KAGRA 計画よりも前に、すでに東京の多摩に、プロトタイプ干渉計の「TAMA300」がある。同様の干渉計であるが、基線長が 300m 程度で、その感度はアンドロメダ銀河程度の範囲に中性子星連星の合体が生じた場合は十分に重力波を検出できる感度を持つ。しかしながら、このような範囲で実際に生じるのは 15 万年に 1 度でしかなく、地球上でじっとその時を待つのは、途方もない時間がかかる。そこで、我々はさらに感度を上げ、より広範囲を見渡せる重力波望遠鏡を作る必要がある。実際 KAGRA は 7 億光年先のヘラクレス銀河団の範囲まで感度を持ち、重力波の大きなイベントをとらえる頻度が 1 年に数回と、格段に上がる。

重力波は高い透過性を持つため、従来電磁波では観測できなかった天体や現象を重力波でとらえることができるかもしれないという期待がある。ブラックホールの内部の様子は、光さえもがその中へ吸い込まれるため、事象の地平面の外側でのガスの相互作用によって生じる電磁波によって間接的に観測するしかなかった。しかし、重力波はそこから透過することができるため、内部の様子を詳細に調べることができる。さらに、初期宇宙に関して、同様の期待がなされている。初期宇宙では、宇宙の晴れあがりという現象が生じる以前では電磁波が電子らの相互作用によって放射が閉じ込められていた。初期宇宙、とくにビッグバンによる重力波をとらえることができれば、インフレーション宇宙論の検証に大きな貢献をするかもしれない。そのような重力波は、CMB と同様、背景重力波として宇宙空間を満たしていると考えられるため、低周波の重力波観測の技術を確認することが重要となる。重力波を直接検出する目標から、電磁波による他の宇宙観測とも協力して、さらに宇宙についての理解を得るような「重力波天文学」の創設に向けて、研究が進められているところである。

日本だけではなく、世界中で同様なプロジェクトが立ち上がっており、アメリカの LIGO や、フランス・イタリアの共同研究である VIRGO など、最高感度を目指して、日々改良の研究が続けられている。重力波は検出することができても、その方向は 1 台の検出器では見積もることができない。いわゆる三点測量の方法で、重力波の到来する時間の差から、重力波源を特定することができる。国際プロジェクトが協力し合うことで、さらに重力波研究は進展するだろう。

現在は、KAGRA 計画中心であるが、将来の重力波干渉計として、宇宙空間に建設して直接観測する「DECIGO」計画も進行中である。これは、地球上で避けることのできない地面振動を抑えることができる利点があり、直接腕の長さを数千 km 級にとることができる。レーザー波源と検出器を 1 台の衛星に搭載し、1 つずつの鏡を搭載した 2 つの衛星を直角になるようにして飛行させる。まだまだ多くの課題が残されており、実現は 20 年程度先になるとされる。