第 61 回定例仁科記念講演会

時空の物理学の誕生

― 宇宙論、ブラックホール、そして重力波 ―

早稲田大学理工学部教授
前田　恵一

アインシュタインへの挑戦

― 実験物理の極限を目指して ―

東京大学大学院工学系研究科特任教授
三尾　典克

2015 年 12 月

「一般相対論 100 年」を記念して、第 61 回定例仁科講演会が 2015 年 12 月に仁科記念財団主催、日本アイソトープ協会後援で下記の通り開催された。この仁科記念財団冊子 NKZ-57 はその講演録である。

2017 年 3 月　仁科記念財団

第 61 回定例仁科記念講演会

日時：　2015 年 12 月 7 日（月）15：30 ～ 17：30

場所：　如水会館（千代田区一ツ橋）

講師：　前田 恵一　早稲田大学理工学部教授

「時空の物理学の誕生 ―宇宙論、ブラックホール、そして重力波―」

三尾 典克　東京大学大学院工学系研究科特任教授

「アインシュタインへの挑戦 ―実験物理の極限を目指して―」

主催：　仁科記念財団

後援：　日本アイソトープ協会

NKZ-57
第 61 回定例仁科記念講演会
ⓒ 2016 Nishina Memorial Foundation

2015年度　仁科記念講演会

一般相対論１００周年

主催　　仁科記念財団
後援　　日本アイソトープ協会

KAGRA-arm

挨拶　小林　誠　仁科記念財団理事長

講演

前田恵一　　早稲田大学理工学部　教授
時空の物理学の誕生　――宇宙論、ブラックホール、そして重力波――

三尾典克　　東京大学大学院工学系研究科　特任教授
アインシュタインへの挑戦　――実験物理の極限を目指して――

日時　２０１５年１２月７日(月)　15:30－17:30
場所　如水会館
　　千代田区一ツ橋２－１－１

仁科記念財団理事長
小林　誠

東京大学大学院理学系研究科教授
須藤　靖

早稲田大学教授
前田　恵一

東京大学大学院特任教授
三尾　典克

（司会） それでは、時間ですので始めさせていただきたいと思います。皆さまお忙しいところをどうも有難うございます。ただいまから、2015 年度仁科記念財団の第 61 回定例仁科記念講演会を始めさせていただきたいと思います。

私は、東京大学大学院の須藤です。本日は司会を務めさせていただきます。どうぞよろしくお願いいたします。

皆さまご存じのように、今年はアインシュタインが一般相対論を発表してから 100 年になります。世界中でも国内でもそれをお祝いする講演会や研究会が行われておりまして、仁科記念財団でも、本日の「一般相対論 100 年」の講演を企画いたしました。早稲田大学の前田先生、東京大学の三尾先生にお話しをお願いすることにしています。それでは、前田先生、三尾先生のご講演に先立ちまして、仁科記念財団の小林理事長からご挨拶をお願いしたいと思います。よろしくお願いします。

開会の挨拶

小林 誠

仁科記念財団理事長

本日は恒例の仁科記念講演会にお集まりいただきまして大変有難うございます。主催者を代表しまして、一言ご挨拶を申し上げます。また、仁科記念財団は、日本アイソトープ協会に大変お世話になっておりまして、この講演会も協会の後援をいただいております。この場をお借りして御礼申し上げます。

本講演会は、仁科記念財団の主要な事業のひとつとしまして毎年開催しているものであります。例年は大学に会場をお借りして開催していますけれども、今回は少々趣向を変えまして、ここ如水会館で開催としてみました。学生さんだけでなく、一般の方の参加にも便利かなということを少し考えたわけであります。さて、さきほど既に司会者からご紹介がありましたように、今年は一般相対論が生まれて 100 年にあたります。本講演会もこれを記念して、早稲田大学の前田恵一さんから「時空の物理学の誕生　宇宙論・ブラックホールそして重力波」と題して、また、東京大学の三尾典克さんから「アインシュタインへの挑戦　実験物理の極限を目指して」と題してお話しをいただきます。講師の先生方の詳しいご紹介は後ほど司会者からお願いしたいと思います。

ところで今年はもうひとつの節目の年ということでありまして、戦後 70 年ということ

であります。その関係で、いくつかのメディアによって、戦争中の仁科先生あるいは理研の仁科研究室の活動が取り上げられました。仁科研で原子爆弾の研究が行われたことに焦点があてられたわけでありますが、実際、軍からの委託を受けて、ウランの濃縮の研究を行っていたということがございます。また、広島・長崎に原爆が落とされた時には、仁科先生は現地に入られて調査を行い、その報告が終戦の決定に影響を与えたということも伝えられているわけであります。ここで、その詳しいお話しをするつもりはありませんが、これらの出来事を含め、当時の状況を示す貴重な資料が仁科記念財団には残されております。その整理を現在も進めており、既にその一部、といっても大部のものでありますけれども、「仁科芳雄往復書簡集」としてみすず書房から出版されております。歴史的な資料として非常に価値のあるものではないかと考えております。書簡集３巻と補巻の４冊がございまして、大変大部で個人でお買い上げいただくには少々高価かと思いますので、まあ、図書館などでご覧いただければと思います。話が少々逸れましたが、それではさっそく講演会に移りたいと思います。どうも有難うございます。

（司会）それでは、最初の講演を前田先生にお願いしたいと思います。

前田先生は、現在早稲田大学理工学部の教授をされております。前田先生のご出身は京都大学の林忠四郎先生の研究室で、いわば理論物理学、さらに日本の理論的な一般相対論の研究、そういう分野における先駆けたる研究室を卒業されております。その後、日本学術振興会の特別研究員、イタリアのトリエステの博士研究員、ムードン天文台の研究員を経て、東京大学理学部物理学科の助手をされ、現在は、早稲田大学の教授をされています。また、これまで２度ほどケンブリッジ大学の客員教授も務められております。専門は重力物理学および宇宙論であります。それでは、前田先生、どうぞよろしくお願いいたします。

時空の物理学の誕生

― 宇宙論、ブラックホール、そして重力波 ―

前田 恵一

早稲田大学理工学部 教授

ご紹介どうも有難うございました。今年が一般相対論 100 年ということで、日本でも世界的にもそれに因んだ講演会とか国際会議、国内での講演会とか、いろいろ行われております。仁科記念講演会でもこれを企画されて、今回講師として呼んでいただきましてどうも有難うございます。この講演は、前に一度早稲田で話したことがありまして、その時は学生もいて一般向けということで割とやさしく作ってしまったので、ちょっとここでは恥ずかしいかもしれないなと思いながら話させていただきます。

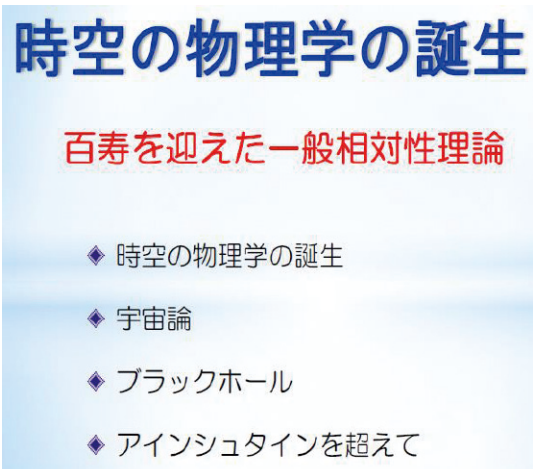


図 1

（図 1）タイトルに、宇宙論・ブラックホール・そして重力波と付けたのですけれども、次に講演される三尾さんが、重力波等の話を集中的にされるということで、私の話は、一般相対論

図 2

の簡単な紹介を最初にお話しした後、宇宙論、そしてブラックホールの話をして、それで、一般相対論を超えた議論ができるかどうか、というお話で締めくくりたいと思います。それでは始めさせていただきます。

時空の物理学の誕生

（図 2）まず、「時空の物理学がどういうふうにして生まれてきたか」ですが、これは基本的には重力の話なので、ニュートン Is. Newton（1642-1727）の重力理論からアインシュタイン A. Einstein（1879-1955）の重力理論へどういうふうな経緯があったかということになります。

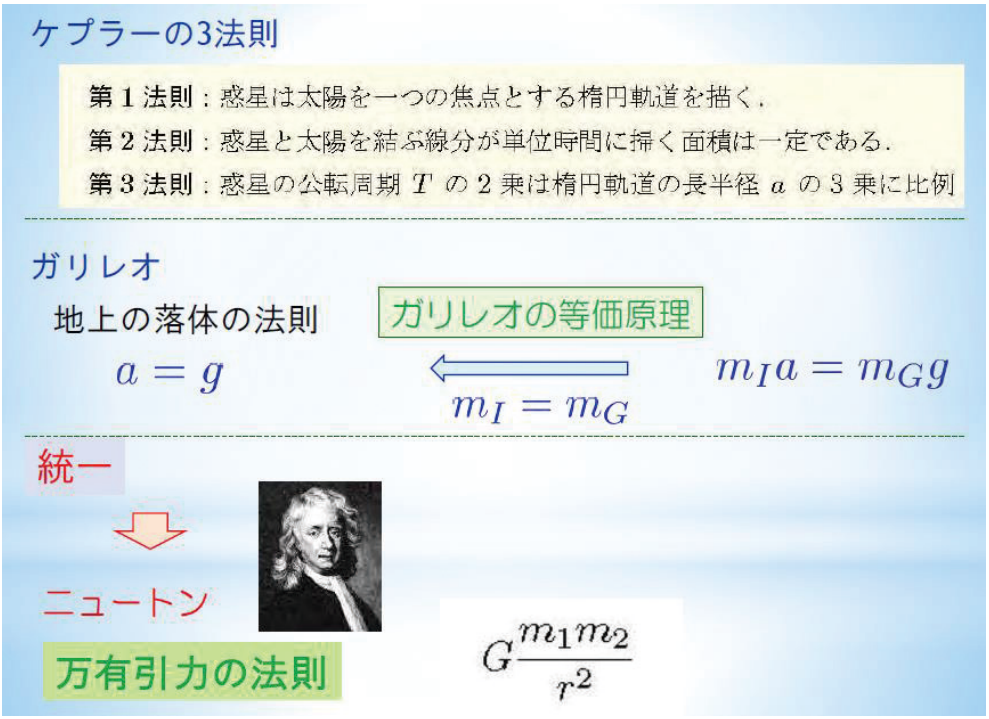


図 3

（図 3）まず、皆さんもよくご存じのケプラー J. Kepler（1571-1630）の惑星の運動の 3 つの法則というのがあります。楕円軌道とか面積速度一定とか、そういう 3 つの法則があるわけですけれど、そういう「天体の運動の法則」とガリレオ・ガリレイ G. Galilei（1564-1642）の「地上の落体の法則」すなわちガリレイの等価原理を―まあそういう天体の運動と地上の運動というのはまったく見かけ上異なるわけですが―運動方程式からすべての物体が同じ重力加速度を感じて同じように運動するという「万有引力の法則」という形で統一したのが、ニュートンというわけです。

（図 4）一方、アインシュタインは 1905 年に「相対性原理」と「光速度不変の原理」から特殊相対性理論を完成したわけですが、それは絶対時間というのを否定するというわけです。そのひとつの大きな性質として、物体の運動も含めて、情報を伝える速度に上限があってそれが光速であるとしたわけです。すなわち光速を超えて物は動けないし、情報を伝えるのもその速度を超えられないというわけです。

（図 5）ニュートンの理論で、この m と M、2 つの質点の間に働く重力というのは、距離の逆二乗に比例するわけですが、その力というのは瞬時に伝わります。それは、特殊相対

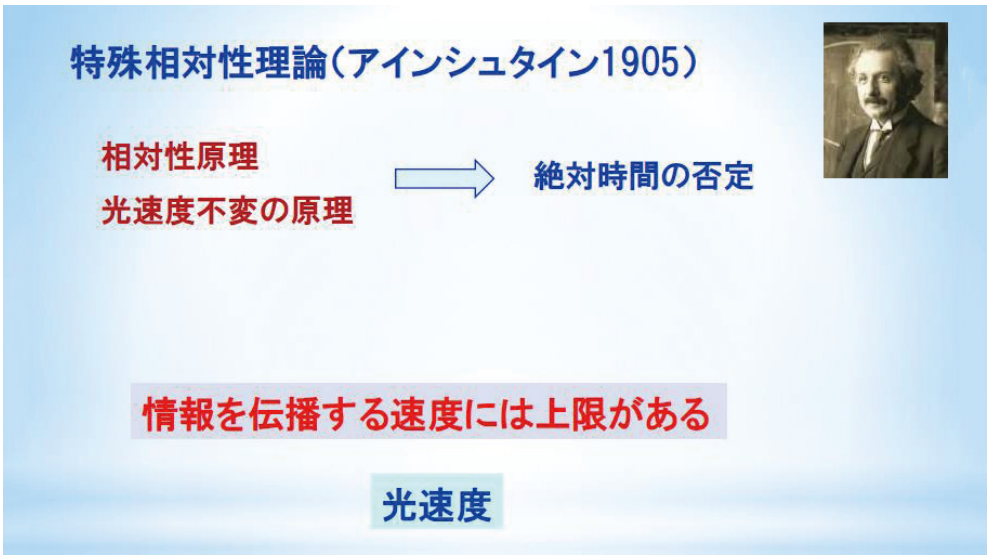


図 4

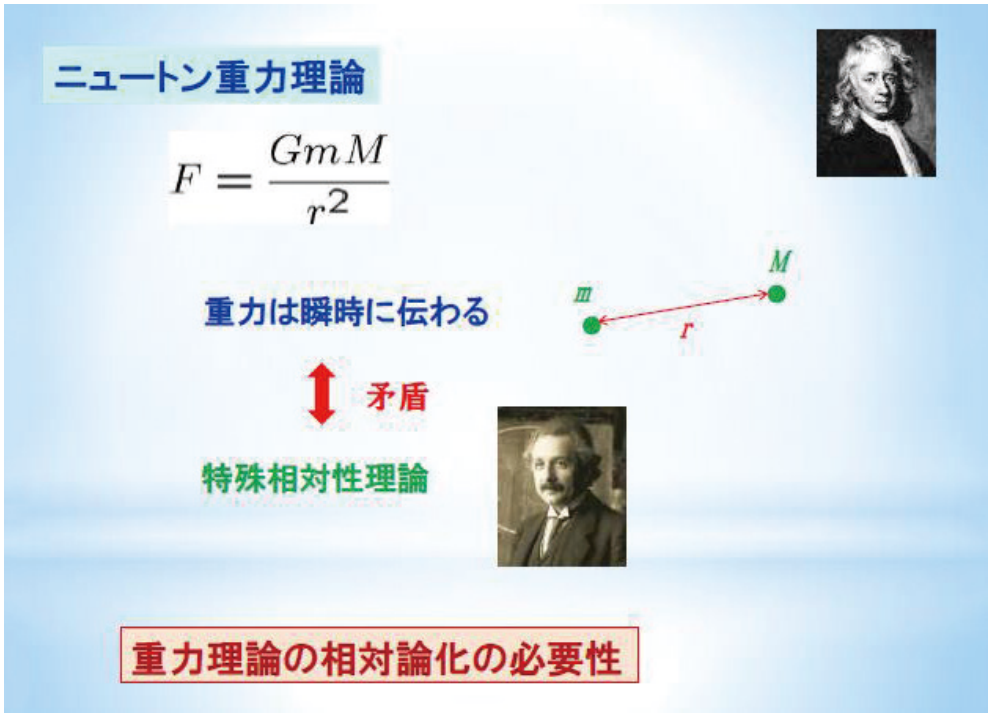


図 5

性理論の光速度を超えて情報が伝わらないということに矛盾します。ニュートンの理論は実験的には矛盾はしていないのですが、理論的に矛盾しているのは非常に困るわけですから、それを相対論化する必要性がある、というわけで、1905 年以降、世界の物理学者がいろいろな形で、ニュートンの理論を相対論的なものにしようという試みを行いました。

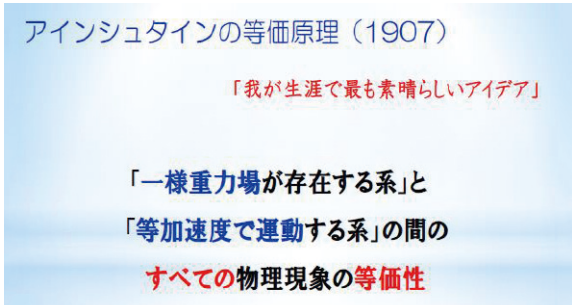


図 6

（図 6）アインシュタインは、単純にニュートンの理論を拡張するということを最初考えていたのですが、ある時に等価原理を思いつきます。もちろんこれはガリレオ・ガリレイの等価原理があったからですが、それを彼はさらに考え方を拡張して、

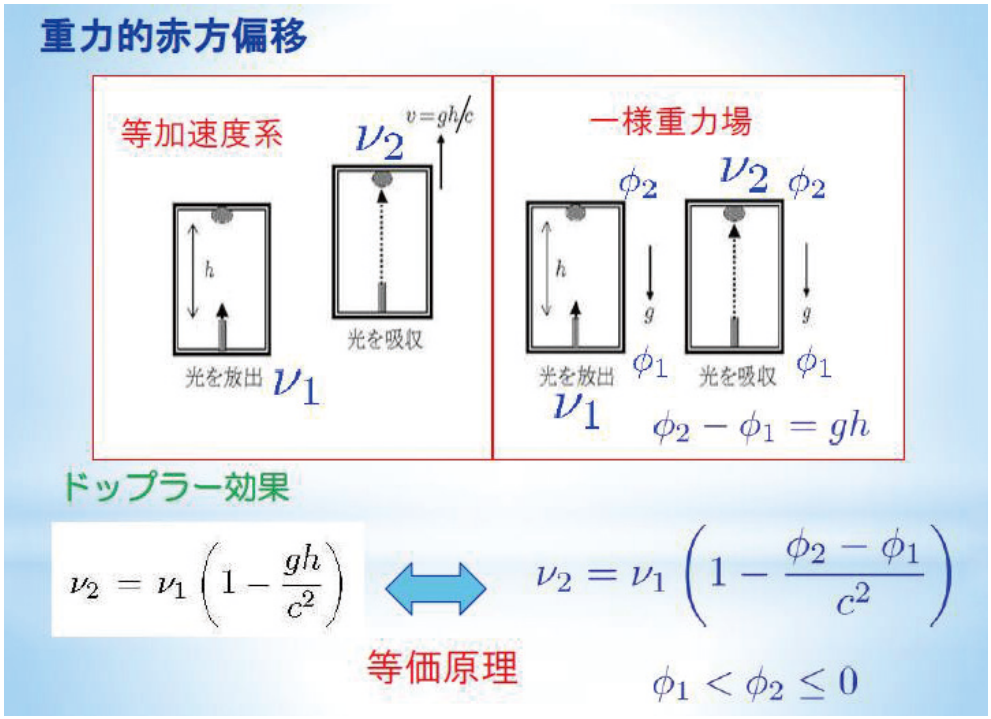


図 7

一様重力場がかかっている系と等加速度で運動する系の間の等価性をすべての物理現象に適用できるとします。そうすると加速度運動をする系での物理というのは、慣性系での物理を知っていれば観測者を変化させるだけなので、何が起こるかということはだいたい分かるわけです。一方、重力場があるときにどうなるかというのは重力の性質に関係していますから、どういうふうになるかというのはすぐには分からない。でもその間に等価性を入れることで重力場中で何が起こるかということが予想できるだろうというわけです。

（図 7）そういう考えのもとで、彼が最初に考えたのが、重力的な赤方偏移というものが簡単に導けるというわけです。それは何かというと、この図の左の方です。これは等加速度系で、たとえばこういうボックスがあってそれが上に向って等加速度運動をしているとします。最初止まっていて、止まっているときに下から振動数が ν_1 の光を出すとします。それでしばらくたって上に到着するわけですが、その上の方で観測をすると、その時に加速度系なので、最初止まっていても光を受け取る時にはある速度、第一次近似では加速度

g に対して高さ h を光速 c で割ったもの、これだけの速度を上でこのボックスはもっているわけです。そうすると振動数 ν_1 で光を出しても、観測者が動いているので、ドップラー効果が起ります。それで、ちょうどこの観測者が光源に対して逃げるように動くので、赤い方に振動数がずれる。だから元々の振動数から $1 - v/c$ の一次で近似すると、v/c の形の赤方偏移がすなわち振動数が小さくなるというのが見えるというわけです。これには、別に新しい物理は何も含んでいないわけです。ところが、これと重力がある系とまったく等価だとすると、同じように重力加速度 g がかかっている系を考えてやって下から光を出します。この系は動いていないのですけれど、重力は上から下を向いているわけです。そうすると、上に上がるときにここで受け取るときの振動数がこれと同じように変わるとなります。gh というのはポテンシャルの差ですから、ポテンシャルで書き換えると、こういう元々下にあったときの光の振動数と、上で受け取ったときの光の振動数の間に、こういう関係があって、やっぱり重力場中を伝播してくるときに光は赤いほうにずれるというのが分かる。このように等価原理を使うと、重力場の強いところから出てきた光は赤い方にずれるというのが分かる、ということになります。

（図８）同じことを考えると、重力場中の時間の遅れも簡単に分かることになります。それは何かというと、たとえば下の方での光の振動数が ν_1、上の方での光の振動数が ν_2 とします。振動数というのは、1 秒当たりの波の数です。いくつ波が来たかということです。下で ν_1 個あったのが上で ν_2 個に減ってしまうと、それはなにか変です。同じような波が来て、上の方で数が減るということは変だというわけです。それは何かというと、上で 1 秒だと考えている時間が、下の方で実は 1 秒も経っていないということになります。そうすると波の数としては、下から出てきた波の数と上で受け取る波の数が一致する、ということで、実は重力場中では時間が遅れるのだということが同じ考察から出てきます。同じように光の速さも下の方が時間の進み方が遅いので、上の観測者の時間で測ると速度は遅くなるというわけです。こういうことがまず等価原理から分かるわけです。

（図９）さらに、もうひとつアインシュタインが考察したのは、光の屈折です。光の屈折自身は、J. G. von Soldner（1776-1833) が、19 世紀初めに出しています。それは何かというと、光を粒子だと考えると、重さをもった物体というのは、重力によって同じように曲げられ、それは質量に依らないということが分かっているので、光が非常に軽い粒子だと

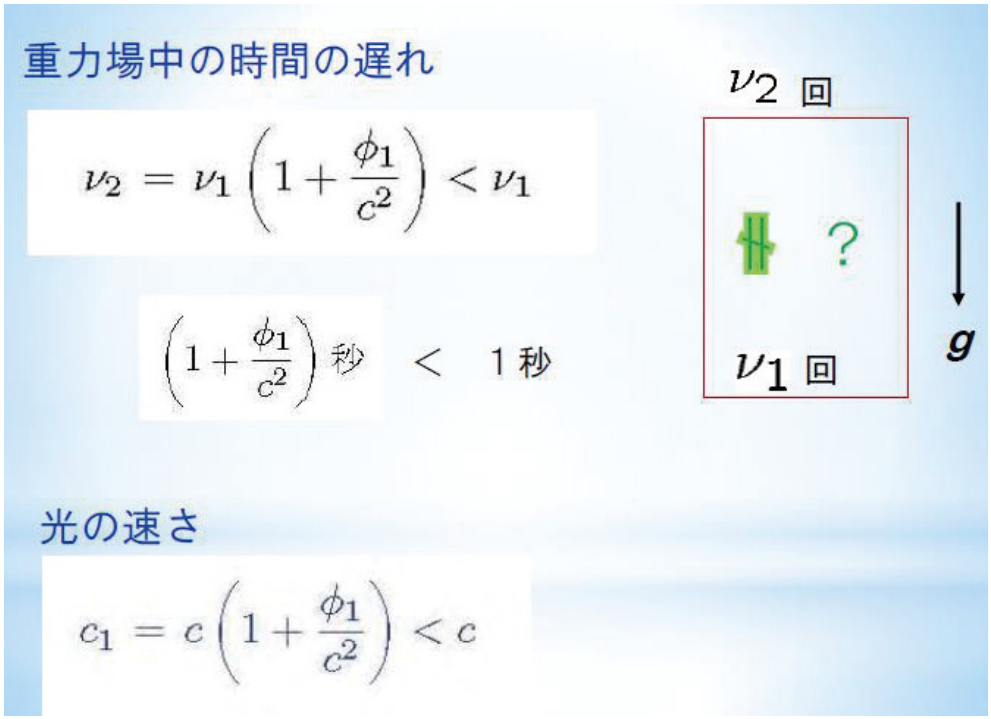


図 8

仮定すると、太陽の近くを通過するときに光がどう曲げられるかというのが計算できるので、それを実際に計算すると、何かこういう角度ですね―1秒よりも小さい角度になるというわけです。アインシュタインのときは、光は電磁波ですから、そういう意味ではこの考え方は使えないので、アインシュタインはホイヘンス C. Huygens（1629-1695）の原理を使いました。今、ここに波面があるとして、右の方に波が進んでいるとしましょう―電磁波が進んでいるとします。そうしたときに、重力が上から下にかかっているとすると、さきほど言ったように、光の速さは重力の強いところの方が遅くなる。そうすると、ホイヘンスの原理で、ある点から出た光というのは、1秒間に光速の球を描くわけです。下の方は小さい球になります。それで全体の波面の包絡線を考えてみると、少し傾くというのが分かると思います。それは、最初右に進んでいたのが少し下向きに光の進行方向が変わると。これが、つまり重力場によって光が曲げられる、というふうに考えられます。これによって計算してみると、実はこの2つは同じ結果を出すということが分かります。それで、この段階でアインシュタインは、実際、実験とか観測をしてこの理論を確かめて欲し

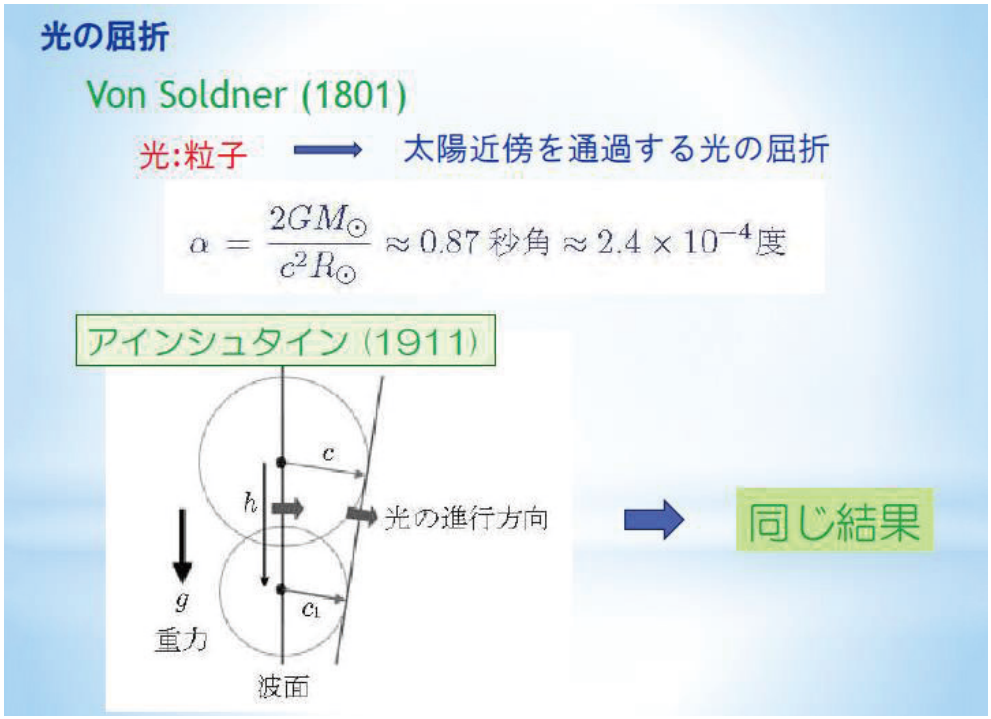


図 9

いと 1911 年くらいの段階で言っていたのですけれど―光の屈折の実験というのは、日食の時に後ろにある星の位置がずれるというのを測ればいいのですが―幸か不幸か、この時はその実験が失敗に終わりました。ひとつは、世界大戦でできなかったというのと、もうひとつはデータが充分ではなかったので結果が得られなかったのです。

（図 10）それは、ある意味では彼にとっては幸運で、実はこの答えは正しくなかったのです。では、何が必要だったかというと、今の等価原理だけでは充分ではなくて、「時空のゆがみ」というのを考えに入れなくてはならないということだったのです。

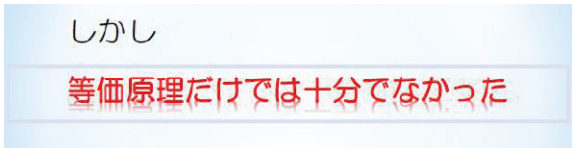


図 10

（図 11）同じように等価原理を考えるのですけれど、今度は、

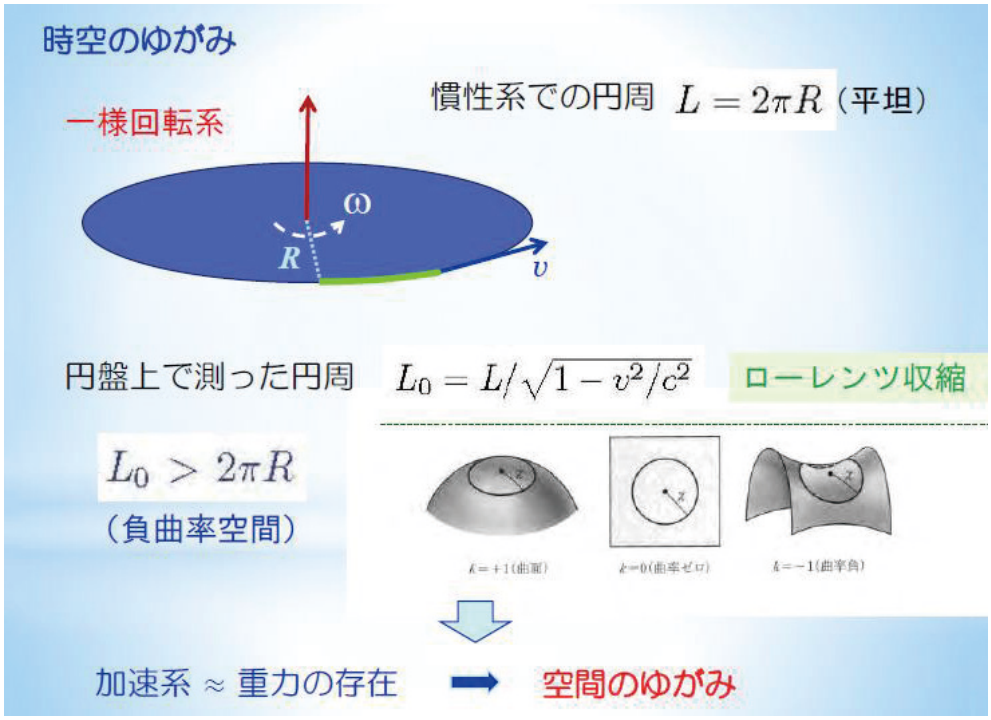


図 11

一様加速度系ではなくて、一様回転系を考える。慣性系にこういう円盤があってそれが回転しているとする。そうすると、慣性系での円周と円盤の半径の間の関係は普通のユークリッド幾何学の $L=2\pi R$ になっています。ところが、この円盤に乗った人、この人は慣性系にはいないのですが、円盤で測った円周というのは、実は、たとえばこの部分（緑の円弧）ですね、微小な部分を考えたときに、外から見るとある速度で動いているわけですから、円盤に乗っかっている人から見る長さは、慣性系でみる長さよりは長くなっている。どの程度長くなっているかは、ローレンツ収縮の関係式を使って、こういうローレンツ・ファクターがかかった形で書ける。つまり、L_0 というのが、円盤の上にいる人が測った円周になるというわけです。L というのが慣性系での円周だったので、$2\pi R$ になっている。ところが、円盤に乗っかっている人にとって、半径方向というのは回転方向と垂直なので、そちらの方向には収縮は起こらない。というので、そのまま R という長さが半径として使える。そうすると、円盤上の人の測った円周と半径の間にこういう関係がでてきます。L_0 というのは、$2\pi R$ よりも大きくなる。これは普通のユークリッド幾何学では考えられ

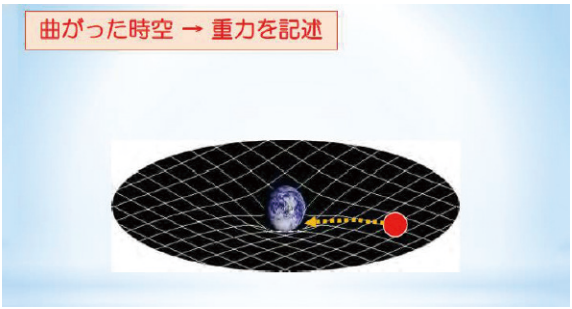


図 12

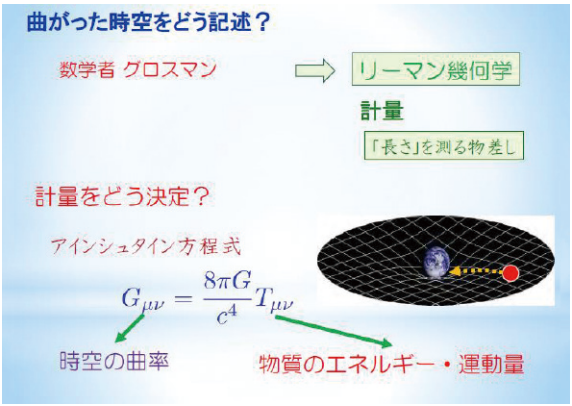


図 13

ない話で、実は、曲率が負の空間でないとこういう関係式を満たさない。球だったらこういう形になって、半径と円周の関係は不等号が逆になります。平面だとちょうどイコールです。それから、曲率が負の場合は、こういう負極率の空間がでてきてしまう。それで、つまり慣性系にいない、回転系にいる人、つまり加速系にいる人は、なにか空間が曲がったように観測するはずだというわけです。等価原理を拡張すると加速系というのが重力の存在の置き換えになると考えると、重力が存在する場合には、空間のゆがみを考える必要があるだろうというふうに考えられるわけです。

（図 12）それで、アインシュタインはそれを自分の重力理論の中に取り込もうと考えたわけです。曲がった時空のところで重力を解釈するというわけです。

（図 13）曲がった時空をどう記述するかというのがひとつの大きな問題で、彼は最初はよく分からなかった。それで友人のマルセル・グロスマン M. Grossman（1878-1936）という数学者に相談すると、当時、リーマン G.F. B. Riemann（1826-1866）幾何学という曲がった空間を記述する幾何学というのがあるというのを知りました。それは、それを記述するには、ひとつ基本的な量として、計量という長さを測る物差しみたいなのが要るわけですが、それを決めないといけない。リーマン幾何学では、この計量は手で与えて、どういうふうに曲がった空間かというのを考えて、そこで幾何学を考えるわけですが、アイン

シュタインはこの計量というのを―つまり空間の曲がりに関係しているわけですが―重力場と考えようとしたわけです。そうすると、計量を決めないといけないことになります。重力場を決めるというのは計量を決めるということです。計量をどう決定するかというのがひとつ大きな問題で、単純にリーマン幾何学を勉強しただけでは出すことができません。それでそういうアイデアを思いついてから２～３年掛かって、最終的にアインシュタインの方程式というのにたどり着いたわけです。それは、左辺が計量であらわされる時空の曲率―計量の二階微分で、時空がどのように曲がっているかを表す量。それから、右辺が物質のエネルギーとか運動量に対応する量。「物があると時空がゆがむ」という関係をどういうふうに関係づけるかというのを、この方程式で得ることができた。G は、ニュートン定数で、c は光速です。

（図 14）こうして最終的な答えにたどり着いたわけです。この一般相対論では、計量というのが基本変数になっているわけですが、それは２つの役割をしている。ひとつは、重力場という重力という力を表す量であって、もうひとつは時空の曲がりに関係した時空の物差しを記述している。そういう２つの役割をもたせることによって、重力場という物理的な対象がどのように時間的に変化し空間的に変化するかというのを記述しているわけです。すなわち、この一般相対性理論というのは、ニュートンの重力理論を相対論化することによって時空を物理学的な対象に押し上げて、それがどういうふうに変わるかということを記述している。そういう意味で、一般相対論が時空の物理学を生み出したというふうに言うことができます。それがちょうどほぼ 100 年前の 11 月 25 日だったということです。

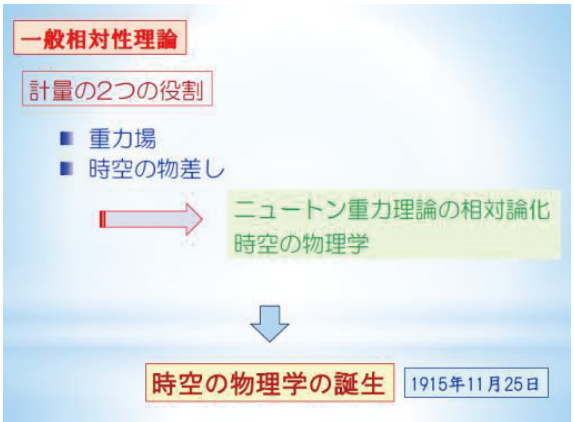
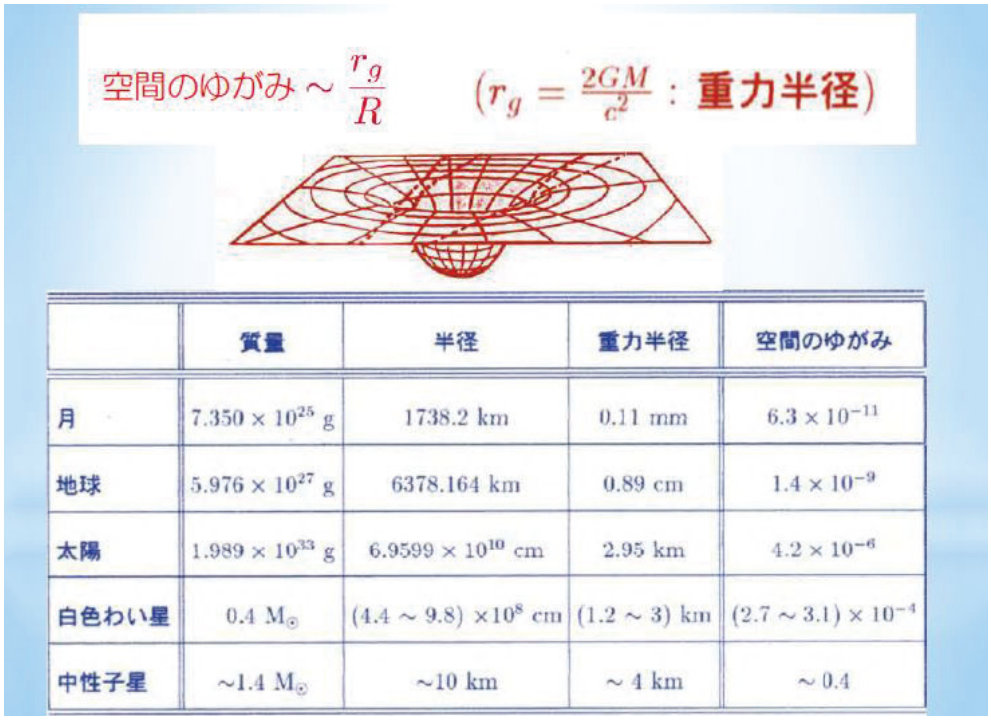


図 14

（図 15）これはどの程度空間が曲がっているかの例です。ある物体があってその質量を M とすると、それに対応した重力半径というのがこのように定義されます。これはブラックホールの半径に関係します。それを、



	質量	半径	重力半径	空間のゆがみ
月	7.350×10^{25} g	1738.2 km	0.11 mm	6.3×10^{-11}
地球	5.976×10^{27} g	6378.164 km	0.89 cm	1.4×10^{-9}
太陽	1.989×10^{33} g	6.9599×10^{10} cm	2.95 km	4.2×10^{-6}
白色わい星	0.4 $M_\odot$	$(4.4 \sim 9.8) \times 10^8$ cm	(1.2 ～ 3) km	$(2.7 \sim 3.1) \times 10^{-4}$
中性子星	～1.4 $M_\odot$	～10 km	～ 4 km	～ 0.4

図 15

実際の物体の半径 R で割り算すると、だいたいイメージとしてどの程度その空間がゆがんでいるかという目安が得られるというわけです。たとえば、月だと重力半径が 0.1 ミリなので、実際の半径で割り算すると、1 に対してゆがみの割合が 10 のマイナス 10 乗とか、すごく小さい割合です。太陽にしても、10 のマイナス 6 乗と、ほとんどこの空間のゆがみの効果は見えないくらい小さいというふうに考えることができます。だけど、既に存在が確認されている中性子星という相対論的な星に関しては、0.4 とか一般相対論を使って考えないといけない程度になっているというわけです。

（図 16）こういうふうに時空を物理学の対象として考えることによって、新しい物理学が誕生して現在まできています。ここに 3 つ典型的なものを挙げましたが、1 つは宇宙全体を扱う、時空構造を扱う宇宙論です。これは後で少し話をします。それからブラックホール。これは重力が極限的に強くなった状態。それから、重力波という「時空のさざ波」ということで、これは後で三尾さんの方から話があると思います。

宇宙論

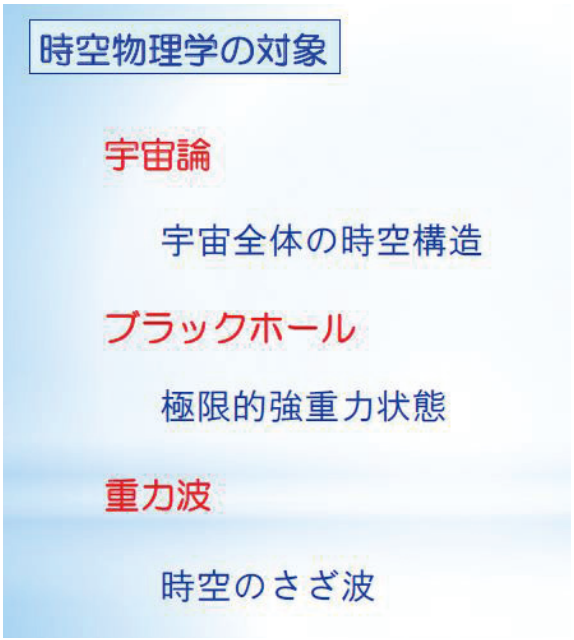


図 16

（図 17）宇宙論の話を始めます。アインシュタインは当然、自分が見つけた理論ですから、それを宇宙に応用したいというふうにもちろん考えたわけです。宇宙がどうなっているかを知りたいということです。アインシュタインの基本的な考え方は、「永遠不滅の変化しない宇宙」、無限の過去から無限の未来までずっと変化しない宇宙というのが自然だというふうに考えた（1917 年）。もうひとつ、宇宙を考えるときにひとつの重要な原理としては、宇宙原理というのがありまして、宇宙が大雑把に言って、大きく見ると、一様かつ等方だということです。これはたとえば、銀河の分布、各点が銀河なのですが、大体観測的にも一様になっているというのが分かるというわけです。そうすると、空間が一様かつ等方だと、単純に分類できて、曲率が正の空間、球面みたいなものです、それと普通の 3 次元のユークリッド空間、それから負曲率の空間と、こういう 3 つの空間に分類されるというわけです。

（図 18）もうひとつ考えなくてはいけないのですが、宇宙論を考えるのに必要な仮定として何かというと、「広い意味での宇宙原理」です。ある意味でコペルニクス N. Copernicus（1473-1543）的な宇宙観なので、考え方としては宇宙はどこも同じということです。ひとつは、いま言った実際の宇宙の構造で、どこも同じようになってどの方向も同じだというものです。これは、観測的に正しそうだと思われます。もうひとつの重要な仮定は、自然法則の普遍性です。これは何かというと我々が見つけてきた自然法則というのは、地球上でほぼ見つけてきているわけで、それが宇宙のはるか彼方で違う法則だったら、我々は宇宙に対して何も言うことができません。ですから、我々が見つけた法則とい

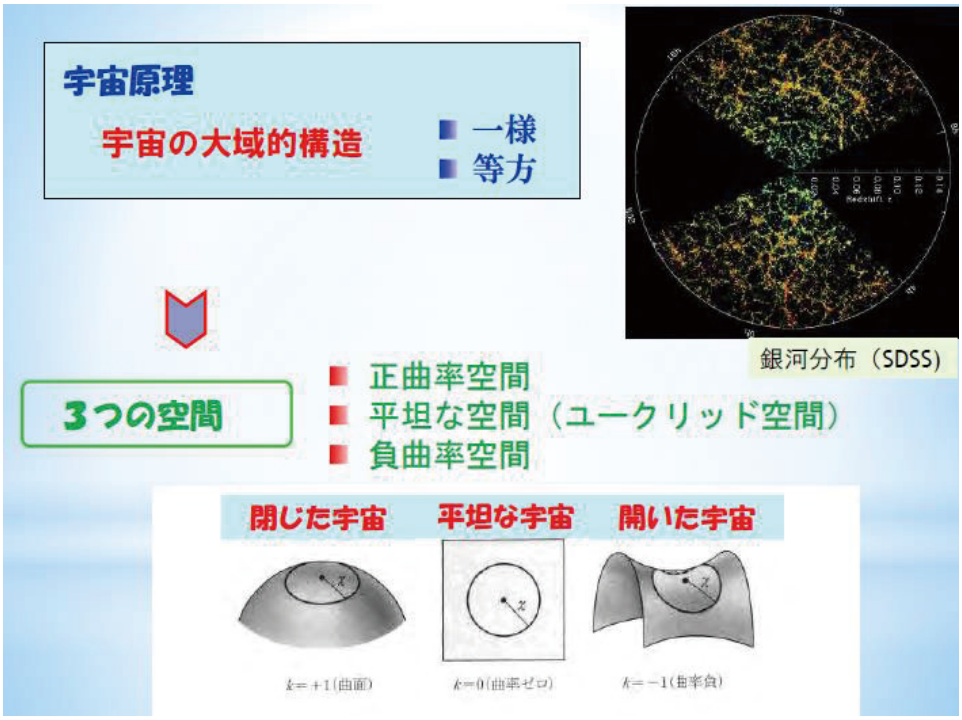


図 17

うのが、宇宙の各場所ですべて正しいと考えるわけです。時空に関しては一般相対論では、物質に関しても―素粒子とか原子核とか物性とか―成り立つとします。これはそう仮定しないと我々は宇宙を議論できません。

（図 19）アインシュタインは自分が一般相対性理論を見つけたので、それで出口を考えようと、さきほど言いましたように永遠不滅の宇宙を考えました。一様かつ等方でかつ有限の宇宙、存在する物は有限だというふうに考えるので、そうすると 3 次元球みたいなこういう宇宙を考える。それで考えると、実は自分の方程式には解がなかった。ということは、そんな宇宙は存在しないという、せっかく見つけた方程式で、実はそんな宇宙はないという話になったので、それで困って、あわてて宇宙項というものを導入してしまうわけです。それは、元々のアインシュタインの曲率の式と物質の部分、それだけではうまくいかないので、何か余分な宇宙定数という項を入れる、この宇宙定数の必要な量としては、だいたい今の感じでいうとどうなるかというと、たとえば地球と太陽の距離の間に、そう

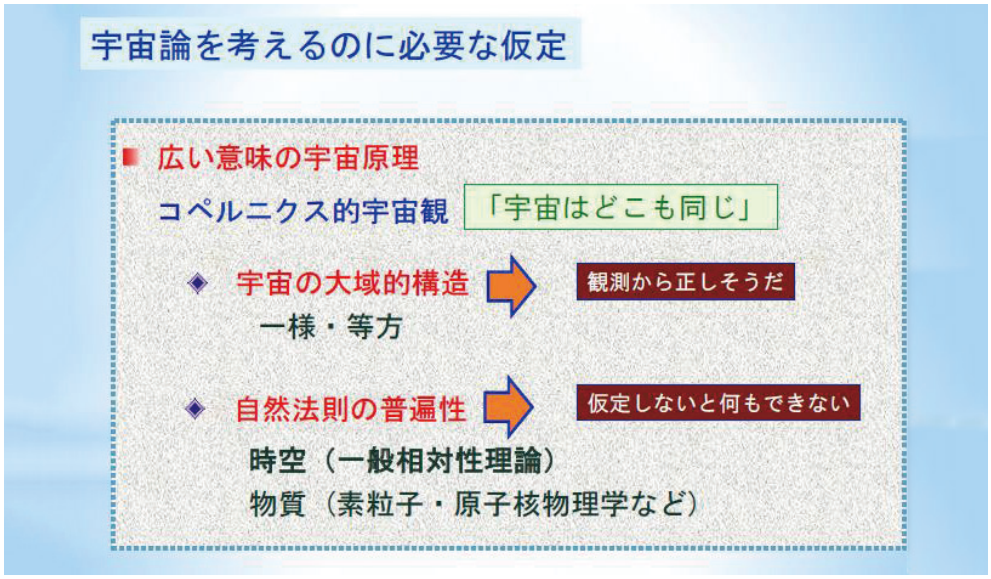

宇宙論を考えるのに必要な仮定
広い意味の宇宙原理
コペルニクス的宇宙観
「宇宙はどこも同じ」
宇宙の大域的構造
一様・等方
観測から正しそうだ
自然法則の普遍性
仮定しないと何もできない
時空（一般相対性理論）
物質（素粒子・原子核物理学など）

図 18

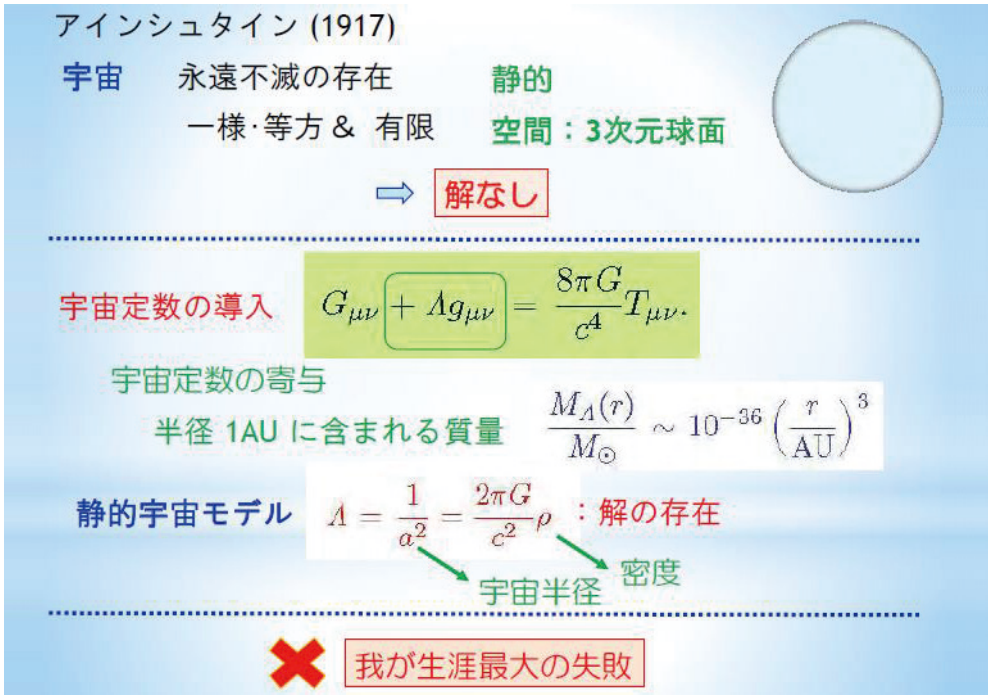

アインシュタイン (1917)
宇宙　永遠不滅の存在　静的
一様·等方 & 有限　空間：3次元球面
解なし
宇宙定数の導入
$G_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$
宇宙定数の寄与
半径 1AU に含まれる質量
$\frac{M_\Lambda(r)}{M_\odot} \sim 10^{-36} \left(\frac{r}{\mathrm{AU}}\right)^3$
静的宇宙モデル
$\Lambda = \frac{1}{a^2} = \frac{2\pi G}{c^2}\rho$ ：解の存在
宇宙半径
密度
我が生涯最大の失敗

図 19

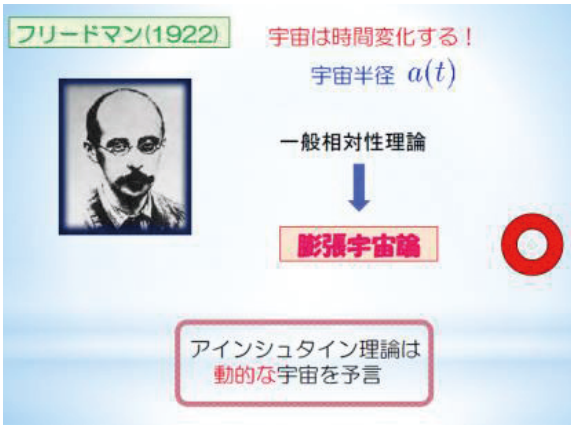


図 20

いう宇宙定数が満たされているとすると、その質量が太陽質量の 10 のマイナス 36 乗くらいで、まあほとんどあってもなくても実験とか観測的には矛盾しない。というので、一応そういう項を入れて考えました。そうすると確かに、時間的に変化しない宇宙というのが見つかったわけですが、実はこれが正しくないということが、後で分かって、「我が生涯最大の失敗だった」というふうに言ったとなっております。

（図 20）一方、それから 5 年後くらいに、フリードマン H. Friedman（1916-2000）が宇宙は時間変化していると考えると、実は宇宙項みたいなものを導入しなくても、解は存在しますと言います。宇宙項も入れて議論しているのですが、そういう宇宙項など考えなくても、一般相対論を仮定すると宇宙の膨張というのが自然に出てくるというわけです。実は、アインシュタイン理論は動的な宇宙を予言していたということになります。

（図 21）それによると―さきほど 3 つの可能性があると言いましたが―宇宙のふるまいというのが、こういうふうにずーっと膨張したり、あるところで収縮に転じたりとなります。基本的にこういうところで出てくるのは、重力は万有引力ですので、膨張は基本的に減速して、ずっと膨張するにしてもだんだん遅くなっていくというのが普通の考えかたです。

（図 22）それに基づいて、物質の進化を議論したのがガモフ G. Gamov（1904-1968）たちのグループで、林忠四郎先生（1920-2010）もいろいろ発表されていますが、ビッグバン宇宙論というのが完成します。それは、宇宙は最初、非常に熱い火の玉からスタートしていろいろ物質変化があって、ある段階で元素が作られると。これは軽い元素だけが作られるわけですが、それとその後にこの時はプラズマ状態の宇宙空間ですが、この時は電子がイオンにくっついて宇宙が中性化される。その結果として、その時に存在した光という

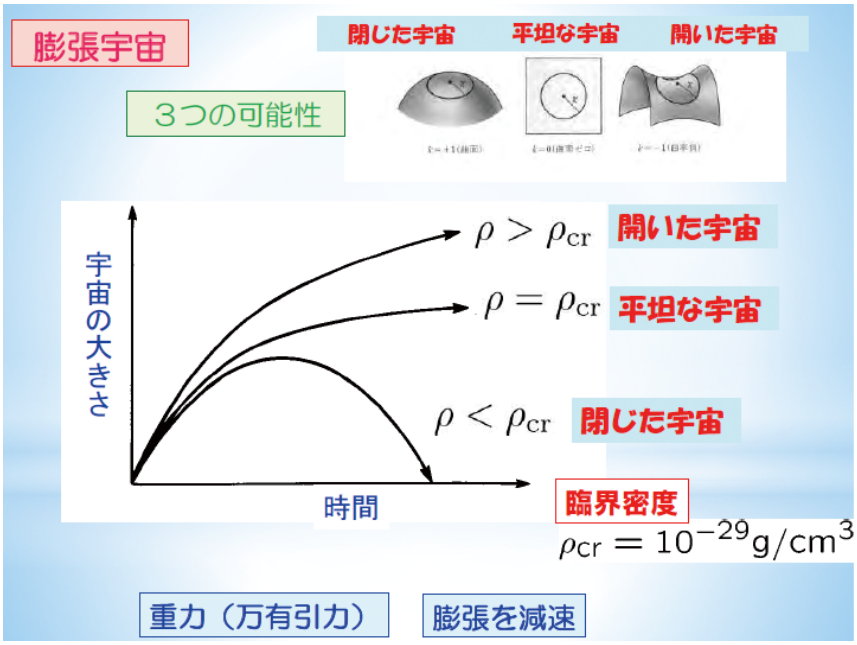

膨張宇宙
閉じた宇宙
平坦な宇宙
開いた宇宙
３つの可能性
宇宙の大きさ
時間
$\rho > \rho_{cr}$
開いた宇宙
$\rho = \rho_{cr}$
平坦な宇宙
$\rho < \rho_{cr}$
閉じた宇宙
臨界密度
$\rho_{cr} = 10^{-29} g/cm^3$
重力（万有引力）
膨張を減速

図 21

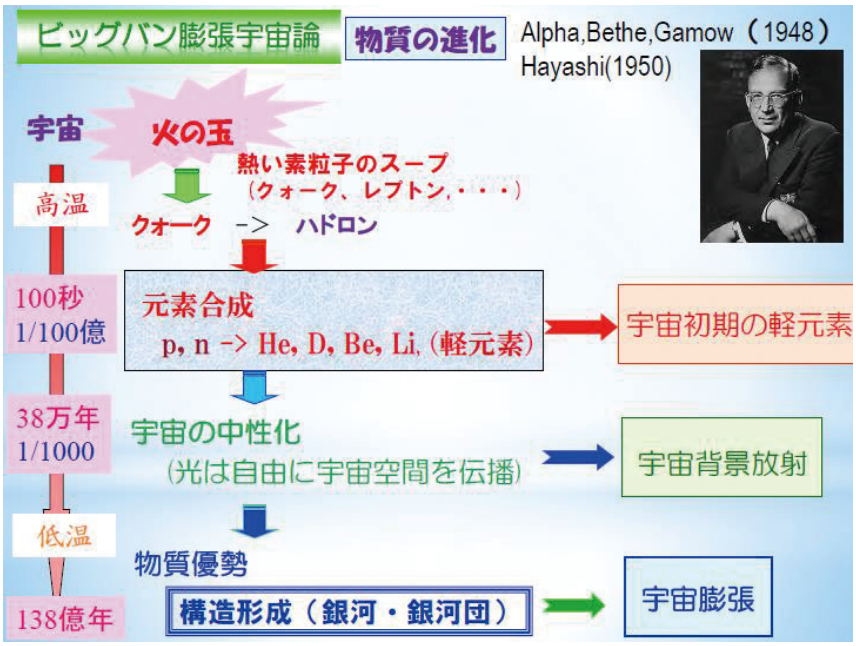

ビッグバン膨張宇宙論
物質の進化
Alpha,Bethe,Gamow（1948）
Hayashi(1950)
宇宙
火の玉
熱い素粒子のスープ
（クォーク、レプトン,・・・）
高温
クォーク -> ハドロン
100秒
1/100億
元素合成
p, n -> He, D, Be, Li, (軽元素)
宇宙初期の軽元素
38万年
1/1000
宇宙の中性化
（光は自由に宇宙空間を伝播）
宇宙背景放射
低温
物質優勢
138億年
構造形成（銀河・銀河団）
宇宙膨張

図 22

背景放射として観測されているということになります。この辺は宇宙はほとんど一様かつ等方で、のっぺらぼうみたいなのですが、非常にわずかのゆらぎが成長して、物質優勢の宇宙ができて、それで、現在の銀河とか銀河団というのができたというのがひとつのシナリオになってきたわけです。

（図 23）これらは、ある程度頭の中で考えたことなので、実際には実験的にもしくは観測的に確かめなくてはいけないわけです。それで、最初に見つかったのが宇宙の膨張です。実際にハッブル E. Hubble（1889-1953）によってそれが見つかった。それで、宇宙の最初の方に軽い元素があったというのもいろいろな観測からだんだん証拠が出てきた。一番決定的だったのが、宇宙の背景放射が 1960 年代にペンジアス A. Penzias（1933-）とウィルソン R. Wilson（1936-）によって発見されて、ビッグバンというのがかなり確かなものになりつつあったわけです。これらの 3 つの観測、宇宙膨張とか、宇宙の背景放射とか軽元素の合成、こういうのが 3 つの証拠として見つかった。

図 23

（図 24）この 3 つの証拠があることによって、ビッグバン宇宙論は数少ない原理とか仮説、今言った自然法則の普遍性と宇宙原理、から出してきたわけですが、それが 3 つの観測的な証拠を得た、ということで、そういう意味でビッグバンは正しいというふうに現在は思われています。そういう意味では現代物理学の金字塔とも言えるかもし

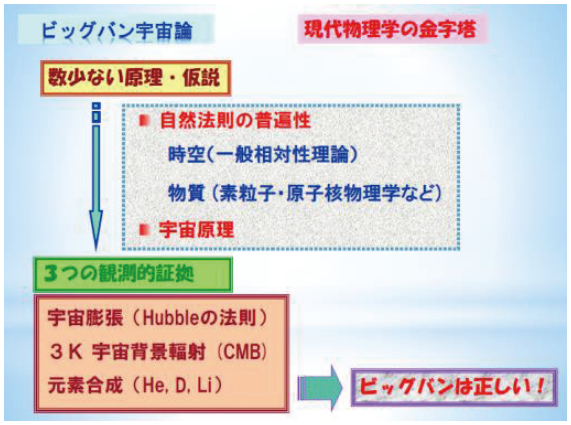


図 24

図 25

れません。これが、ビッグバンまでの話です。

ブラックホール

（図 25）もうひとつ、ブラックホールの話を例としてしたいのですが、ブラックホールそのものではないのですが、シュヴァルツシルト K. Schwarzschild（1873-1916）が、アインシュタイン理論が出た 1 年後に真空中の重力場の解をアインシュタインの方程式から求めました。これは、星があってその外側、普通の星だと重力が弱いですけれども、その時空がどうなっているかというのを見つけたわけですね。その解自身は、そういう意味では非常に重要なのですが、もっとアカデミカルには、この計量が、実は重力半径というさきほども出てきましたが、質量によって決まる何か重力半径というものがあって、その半径のところで特異点になる。それはシュヴァルツシルト特異点と呼んだのですが、通常 r_g は星の内部にあるので、そしてこれは真空解ですから、そんなものは実際には存在しないので、あまり気にすることはなかったわけですが、星をどんどん小さくしていったときに、

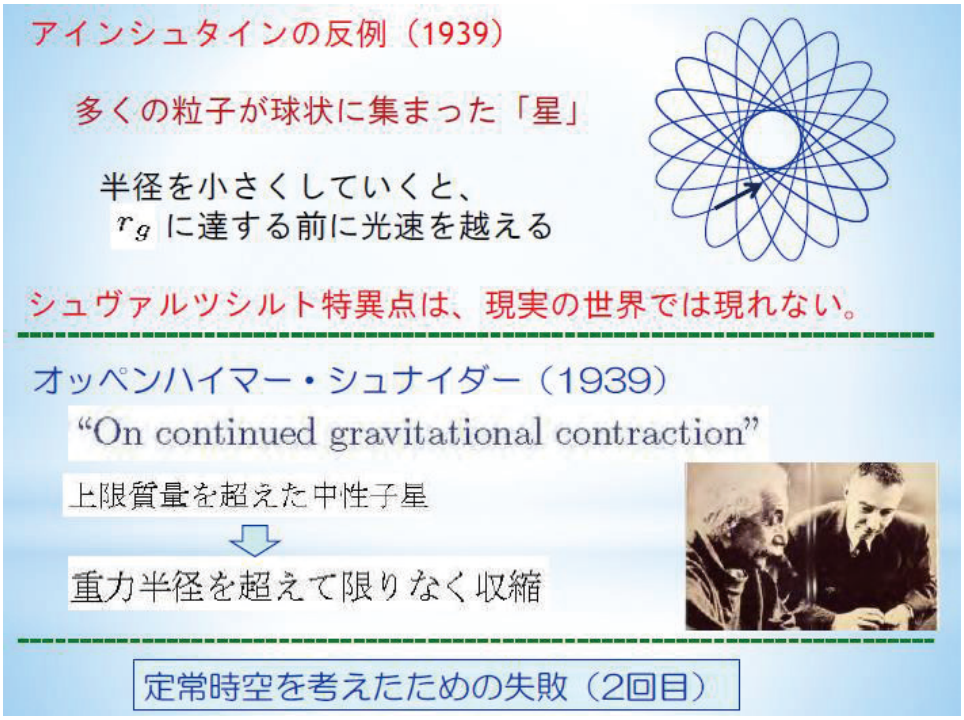


図 26

この半径が外に出てくるかという、そのような半径が実在するのかというのが、1920 年代くらいにいろいろ問題になりました。国際会議なども開かれて、エディントン A.S. Eddington（1882-1944）はこの半径をマジックサークルというふうにその時は呼んでいたと言われます。

（図 26）では本当にこのような半径があるのかどうかというのが、ひとつ問題になるわけですが、アインシュタインはそんなものは存在しないと 1939 年に言っています。それは何かというと、いっぱい粒子が球状に集まった、球状に回転しているのですが、円状に動いていて全体としては球状になっているのですね、球殻状になっている、こういう星を考えました。この半径をどんどん小さくしていく、そうすると、この重力半径に到達する前に回転速度が光速を超えることになる。だからそういうふうなものを考えても、実際に半径を重力半径より小さくすることはできないというふうに主張して、シュヴァルツシルト特異点は、現実の世界では現れないと主張しました。ところがすぐ後に、オッペンハイマー

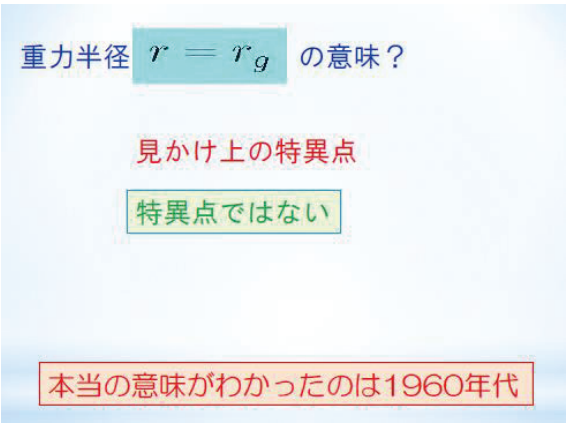


図 27

J.R. Oppenheimer（1904-1967）とシュナイダー Schneider が、こういうタイトルの論文で、また、その少し前にオッペンハイマーとヴォルコフ Volkoff が、中性子星には質量に上限があるということを示していて、上限質量を超えた中性子星はどうなるかというのを考えたのがこの論文で、ダイナミクスを考えるすなわち、時間変化を入れると、重力半径を超えてどんどん収縮して r_g という重力半径を簡単に超えてしまう、別になんの問題もなく重力収縮が起こるということを示したわけです。そんなものが実際に存在するわけだから、アインシュタインの言ったことは間違いだったわけです。だから、そういう意味でブラックホールの考えにたどり着けなかったわけですが、それは、アインシュタイン自身が定常時空を考えたために、失敗したわけです。宇宙論でも、やはり、定常宇宙、静的宇宙を考えたのである意味失敗したのですが、ブラックホールというかこういう星の場合にも、同じような意味で失敗をしているというわけです。

（図 27）それでも重力半径の意味はまだよく分かっていなかったわけです。とにかく潰れて、そういう半径が現れることは分かったのですが、それは特異点でもない。実際その本当の意味が分かったのは 1960 年代です。

（図 28）どういう点かということを示しますが、ここでは、またミンコフスキー H. Minkowski（1864-1906）の平坦な時空で、光がどう進むかというのを見てみると、この点から出た光というのは、こういうふうに外向きの光と内向きの光とこういうふうに進みます。この中のところで、光より遅い物質はこの中を動けるわけです。実際に動ける範囲というのは、この円錐の内側を動くということがわかっているわけです。この円錐を描いてやると、どういうふうな時空になっているかというのが分かるわけです。

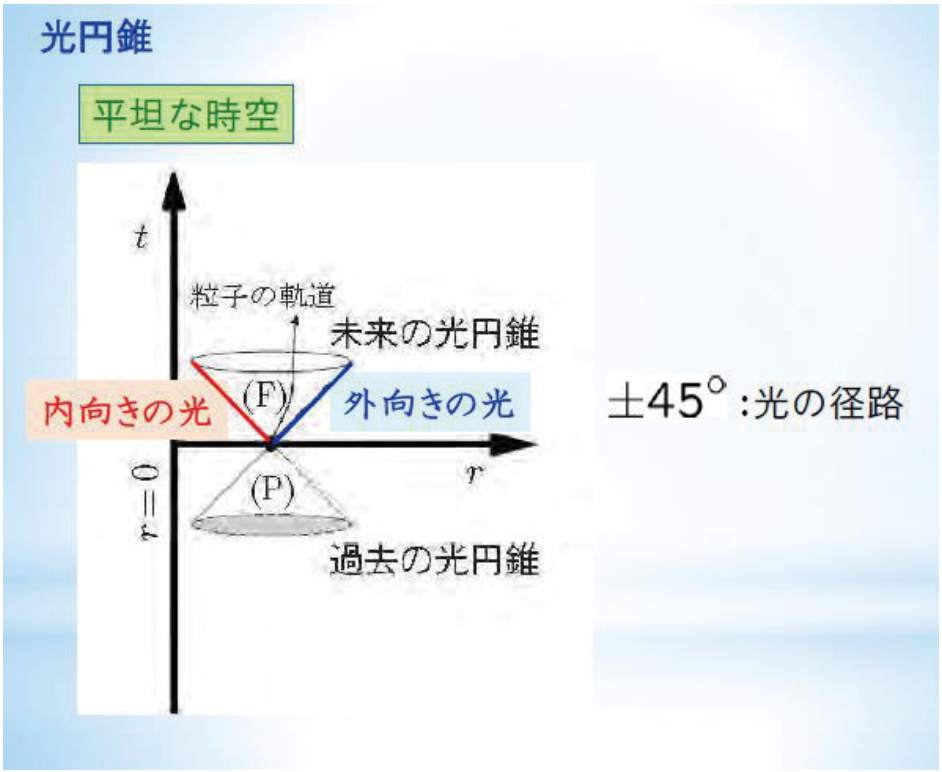


図 28

（図 29）シュヴァルツシルトが見つけた解をそのまま、このように描いてやると、横軸に r で、空間座標で、こちらが時間だとすると、ブラックホールから充分離れたところでは普通のミンコフスキーでの光円錐と同じように、この上の方にだんだん近づくと重力の影響で細くなっていくわけですが、重力半径のところで、これは潰れてしまう。内側に入ると、横にひっくり返ってしまう。これは座標系が悪いのだというわけで、エディントンとかフィンケルシュタインは、違う座標系を使って、同じ時空を座標を変えることで表現した。そうすると、この座標系によると、内向きは全部 45 度になっている。外向きは最初遠方では 45 度ですが、だんだんブラックホールに近づくに従ってだんだん立ってきて、重力半径のところで垂直になる。それは内側では逆向きになるということで、ちょうどこの点に居たら、物質はこの中しか動けないわけですが、この内側に入ってしまうと外に出られないという一方通行の世界、境界がちょうど重力半径になっている。内側のものは出てこられないという意味で、ブラックホールという名前が付けられました。

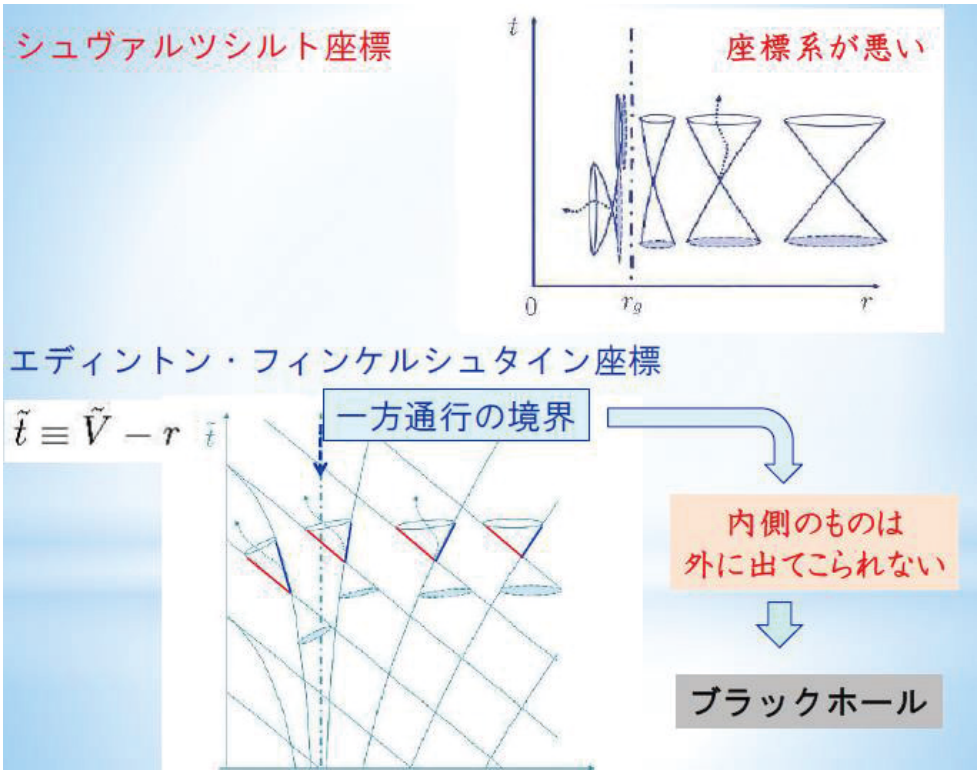


図 29

（図 30）これは一般の人向けに作ったイメージ図なのですが、下りのエスカレーターを登るということで考えると、星があって潰れていってブラックホールになって、重力半径の空間ができるわけですが、充分遠方だとエスカレーターがゆっくり降りている、つまり重力が弱いので、充分簡単に登れます。ところがブラックホールに近づいていくと、重力が強くなっていくので、下りのエスカレーターはどんどん速くなっていく。なかなか昇るのが大変になります。でもなんとか頑張れば上まで到達できる。ところが、ちょうど地平線のところでは、登るスピードと下るエスカレーターのスピードが同じなので、ずっと同じところにいることになる。もっと内側に入ると、自分では外に行っているつもりなのですが、中に落ちてしまうという意味で、入ったが最後出られない、というわけです。ブラックホールの名付け親は、ウィラー J. Wheeler（1911-2008）で 1967 年のある会議でそういうふうに命名したそうです。それは非常に分かりやすい表現だったので、いっぺんに世の中で使われるようになりました。

図 30

（図 31）実際にそういう頭の中で考えたブラックホールが実際に存在するかというのは、現在では 2 種類のブラックホールが見つかっていて、1 つは連星、2 つの星があって一方がブラックホールでその周りに膠着円盤ができて、そこに流れ込むことによって円盤から出て来る X 線を観測することで、ブラックホールが中心にありそうだというのが分かる。

（図 32）もうひとつは、銀河中心にあるブラックホールで、我々の銀河の中心にもあると思われているわけですが、そういうものがあります。これは、非常に重くて、太陽の重さの 100 万倍から 10 億倍くらいです。

これらは、ブラックホールがあるといっても、実際に直接のブラックホールを見たわけではなくて、その周りの振る舞いを見てブラックホールがあるだろうというふうに推定しているわけですが、実際にブラックホールが見えるかもしれないというわけです。

ブラックホール候補天体 Ⅰ　太陽質量の数倍

X線星	推定質量（太陽質量単位）
白鳥座 X-1	7–14 倍
大マゼラン雲 X-3	7–20 倍
GRO J0422 + 32	9 倍 以上
A 0620 – 00	4.9–10 倍
GRS 1124 – 683	5–7.5 倍
4U 1543 – 47	1.2–7.9 倍
GRO J1655 – 40	7.02 ± 0.22 倍
H 1705 – 250	4.9 ± 1.3 倍
GS 2000 + 250	8.5 ± 1.5 倍
GS 2023 + 338	12.3 ± 0.3 倍

Black Hole Candidate Cygnus X-1
Credit: ESA, Hubble

図 31

ブラックホール候補天体 Ⅱ　銀河中心にある巨大ブラックホール

銀河名	推定質量（太陽質量単位）
銀河系（いて座A*）	2.5×10^6 倍
M31（アンドロメダ銀河）	7.5×10^7 倍
M32	3×10^6 倍
M84	1.5×10^9 倍
M87（おとめ座銀河団）	3.2×10^9 倍
NGC1068	10^7 倍
NGC3115	2×10^9 倍
NGC3377	8×10^7 倍
NGC3379	$(0.5\text{–}2)\times10^8$ 倍
NGC4258	3.6×10^7 倍
NGC4261	4.9×10^8 倍
NGC4342	3.2×10^8 倍
NGC4486B	6×10^8 倍
NGC4594	10^9 倍
NGC4945	10^6 倍
NGC6251	7.5×10^8 倍

the Core of NGC 4261
NASA: STScI-1992-27

図 32

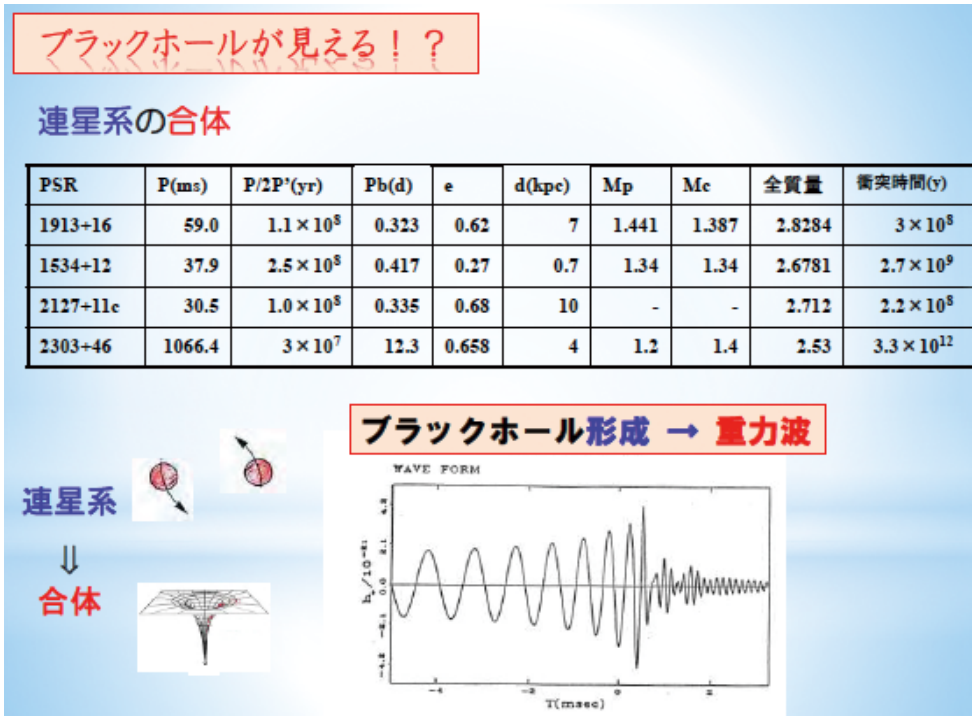


図 33

（図 33）ひとつは、この後、三尾さんの話でも関係してくると思いますが、連星系があったときに最終的に重力波を出して合体してブラックホールになるというものです。そうするとこういう重力波が出て来るわけですが、そういう最後に出て来るブラックホールの振動を観測するとブラックホールができたことが分かる、という意味で、ある意味でブラックホールが見えるというわけです。そういう連星系というのは、ここでは 4 つしか揚げていませんが、いろいろ見つかっています。

（図 34）もうひとつは、ブラックホールの影といって、たとえばこういう VLBI みたいなものを使って、我々の銀河もしくは M81 という非常に大きな銀河でのブラックホールをそのままある意味でその影を観測するというわけです。これは後ろに光源があってブラックホールがどう見えるかというシミュレーション―回転していると左右非対称なのが出て来り、膠着円盤があるとどういうふうに見えるかというシミュレーション―これはシミュレーションですが、そういうのが分かってきていて、非常に面白い時代になっていると

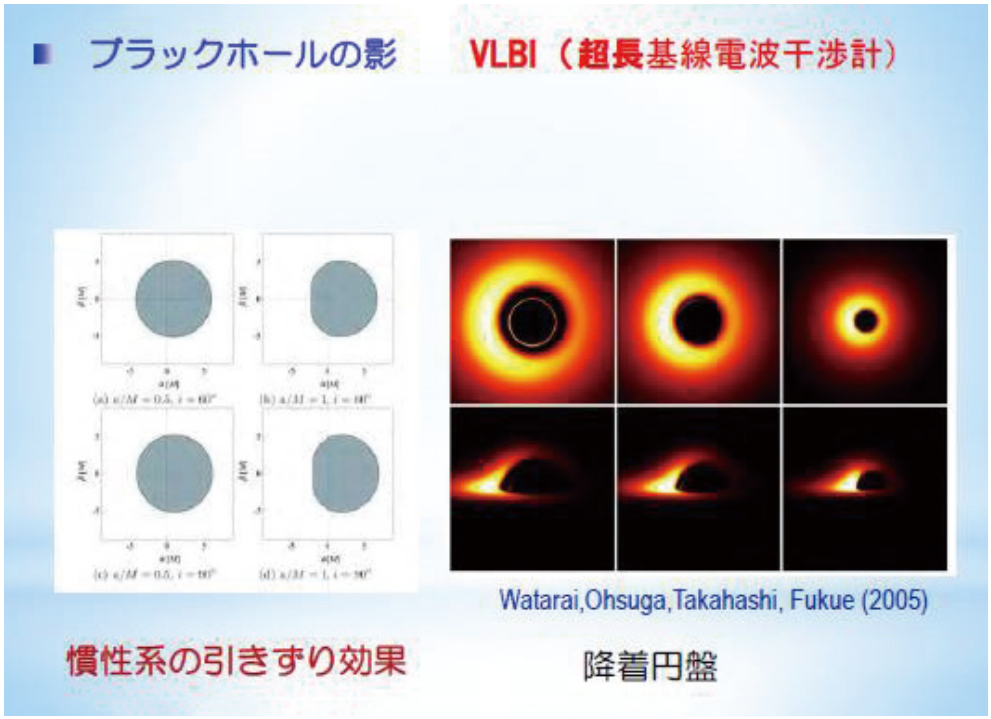


図 34

いうわけです。

アインシュタインを超えて

（図 35）最後に、簡単に「アインシュタインを超えて」という話をします。一般相対論はいろいろなスケールで我々は議論に使っているわけですが、どこまで正しいのか。ニュートン理論はある意味で一般相対論に含まれるので、これらはどこまで正しいのかというわけです。すべての理論には、もちろん適用限界があるわけで、宇宙の大きさ 10 の 28 乗センチから量子重力の世界 10 のマイナス 33 乗センチまでずっとあるわけですが、正しいと分かっているのはこのあたりくらいです。つまり、0.1 ミリくらいから、太陽系のちょっと大きいところらあたりです。

（図 36）実際の実験としては、fifth force を探す、第 5 の力を探すというもので、ニュートンの理論からのずれをこういう指数関数で表して、係数の α とレンジの λ を使って

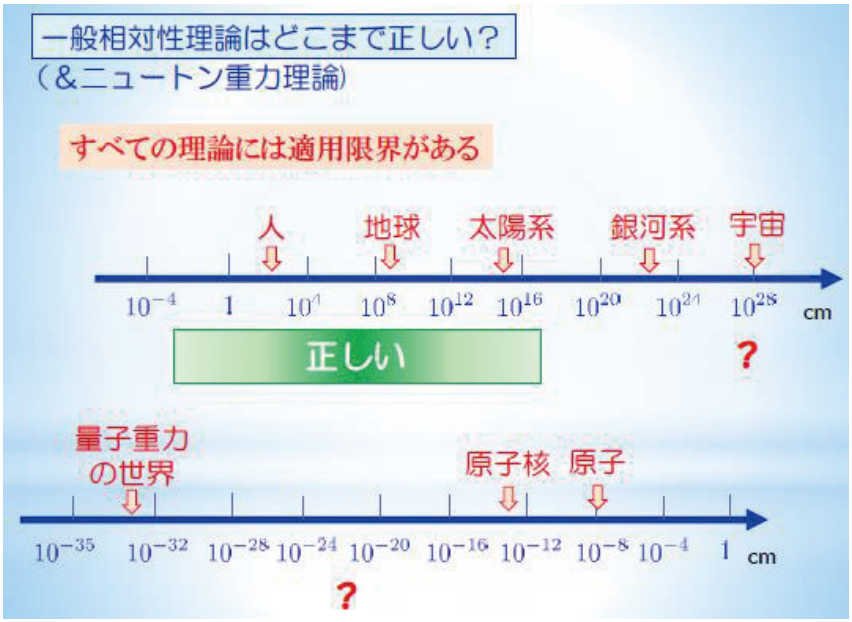

一般相対性理論はどこまで正しい？
（&ニュートン重力理論）
すべての理論には適用限界がある
人
地球
太陽系
銀河系
宇宙
10^{-4} 1 10^{4} 10^{8} 10^{12} 10^{16} 10^{20} 10^{24} 10^{28} cm
正しい
?
量子重力
の世界
原子核
原子
10^{-35} 10^{-32} 10^{-28} 10^{-24} 10^{-20} 10^{-16} 10^{-12} 10^{-8} 10^{-4} 1 cm
?

図 35

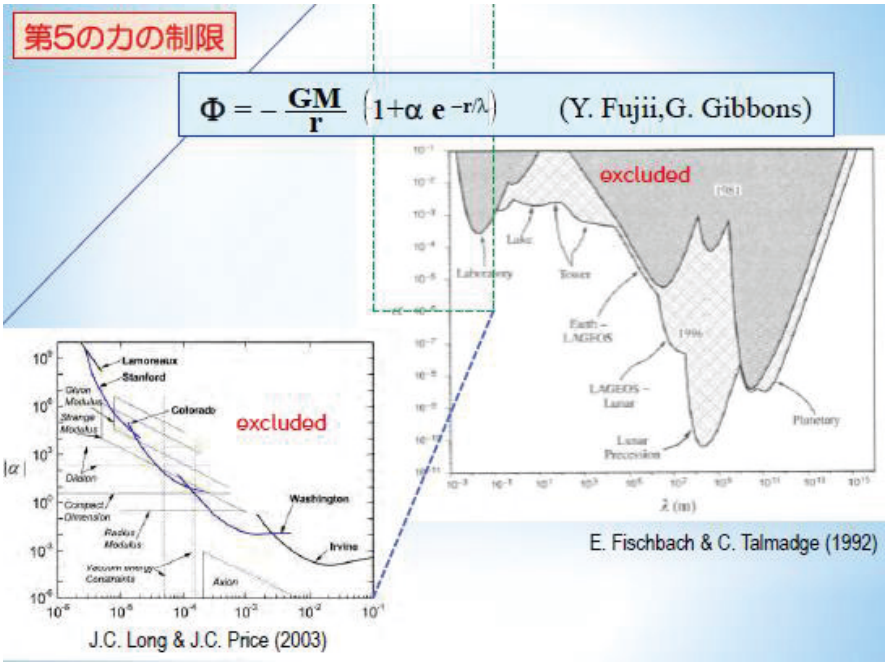

第5の力の制限
$\Phi = -\frac{GM}{r}\left(1+\alpha\, e^{-r/\lambda}\right)$ (Y. Fujii,G. Gibbons)
excluded
Lamoreaux
Stanford
Colorado
excluded
Washington
Irvine
Axion
J.C. Long & J.C. Price (2003)
E. Fischbach & C. Talmadge (1992)

図 36

—横軸にλ、縦軸にαです。この斜線部分が排除されているものです。そんなものは存在しないというわけです。この辺は、たとえば湖とかタワーとか地球上のものを使ったり、惑星とかそういうものを使っています。だから太陽系くらいのスケールです。一方、小さいほうでは、ミクロに $1/r^2$ からのずれの測定がありまして、それが、0.1ミリくらいまでは正しそうだというのがあります。こういう制限があって、この辺は正しいのですが、非常に大きなところは分からない、もちろん非常に小さなところもよく分からないというわけです。

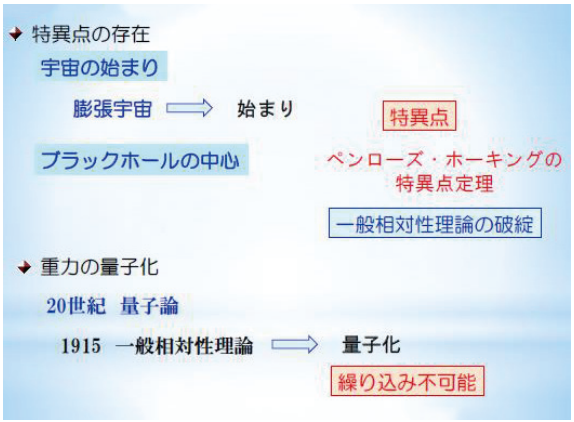


図 37

（図 37）それでどういうものがいま問題となっているかということを少し話します。小さい方が分からないのは、ある意味で未解決問題として前から分かっているわけで、2つの未解決問題があります。ひとつは特異点が存在してしまう。宇宙の始まりには宇宙の過去に遡ると特異点があるとか、ブラックホールの中心には特異点があるとかです。これは、ペンローズ R. Penrose（1931-）とかホーキング S. Hawking（1942-）の特異点定理で証明されているわけですが、これは一般相対論がそこで破綻するということを示唆します。もうひとつは、20 世紀に発達した量子論の中に一般相対論を入れようとすると、繰り込み不可能でうまくいかない。

（図 38）それで、時空そのものを量子化するという試みとして、量子重力というのがあります、重力を統一理論のひとつとして考えようという、超弦理論とかそういうアプローチが、いま、いろいろなされていますが、まだ最終的な答えにはたどり着いていないというわけです。

（図 39）最後に、大きい方でもさらに問題があるというわけです。ビッグバンは正しい

図 38

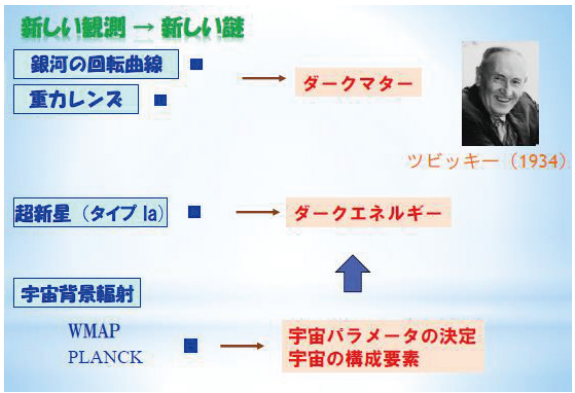


図 39

と言ったのですが、さらにずっと新しい観測をやっていくと、確かにビッグバンは正しいのですが、いろいろ問題点が出てきた。そのひとつが、たとえば、銀河の回転曲線とか重力レンズによる分布を見ることによってダークマターが存在するということが分かったことで、もうひとつは、超新星タイプ 1a の観測に端を発しているわけですけれど、宇宙が加速しているという証拠を見つけたことです。その起源としてダークエネルギーというものを支持する観測データが得られた。宇宙背景輻射の詳細な観測から宇宙パラメーターを決定して宇宙がどういう物質からできているかというのをいろいろ調べることができるようになって、こういうダークマターとかダークエネルギーというのが存在する、ということがほぼ確実になりました。

（図 40）それで得られたのがこういうもので、我々が知っている普通の物質、原子とか陽子、中性子です。こういうものは宇宙全体の 5% しかない。さきほど言ったダークマターというもの、これは実際、ある意味で物質だということは分かっている。それはなぜかというと、たとえば銀河の周りとか、ある部分に局在して存在する、固まっているわけです。そういうのが重力レンズとかで分かっているわけですが、その量がだいたい 27% く

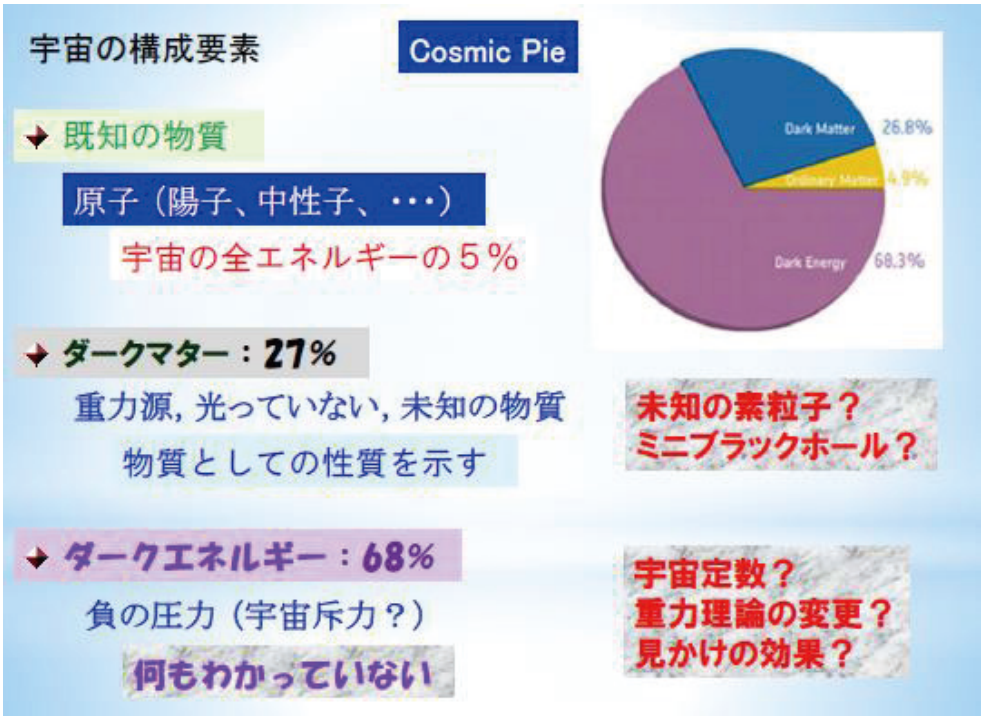


図 40

らい。ただ、何からできているかがよく分からない。多くの人は未知の素粒子ではないかというふうに考えている。もうひとつの最大の問題は、ダークエネルギーです。これは、何かよく分からないのですが、さきほどアインシュタインが導入した宇宙定数と非常に性質がよく似ているのです。ただし、まだ何もよく分かっていないというわけです。

（図 41）重力は万有引力で、通常の物質を考えると減速膨張してしまうので、普通は加速膨張を説明できない。そのためにアインシュタイン理論を少し変更するというわけですが、ひとつは、なんか変な物質を入れる。それがある意味ダークエネルギーですが、重力の方を少し修正して、非常に大きなスケールでは一般相対論でない重力理論を考えるという試みも最近いろいろ行われています。

（図 42）これは Google Scholar の Web ページで修正重力と加速膨張宇宙の 2 つのキーワードで、何件くらい引っかかるかというのを検出したのですが、2000 年くらいまで、

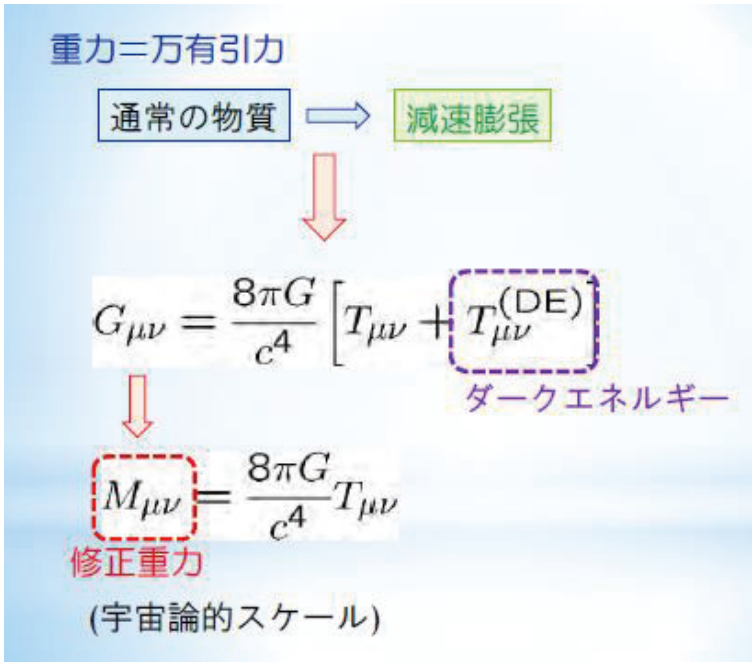


図 41

ダークエネルギーという話が出てくる前までは、そんなに件数はなかったのですが、ここにきて急激に増えている。いろいろなここに書いている重力理論が最近議論されています。ちょっと一般相対論がなおざりにされているような感じです。とにかくまだこれはよく分からないのです。

図 42

（図 43）ダークエネルギーはもしかしたら、現代のエーテルかもしれない。エーテルというのは、昔、光が媒質中を伝播するので、かつ光は波であるから、当然エーテルというのが存在したという 19 世紀の常識があったのですが、アインシュタインはそれを特殊相対性理論を考え

ることで、そんなの考えなくてもいろいろなことが説明できますよと言ったのです。そういう意味で、ダークエネルギーはもしかしたらそういう変なものかもしれない、というわけです。

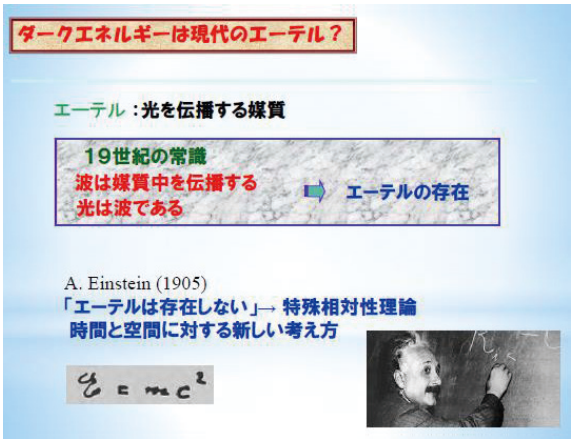


図 43

（図 44）ここまで話してきましたが、宇宙の新しい謎の解明というのは、新しい物理学とか自然法則につながるかもしれないということが期待できます。時空の物理学は、いま、最も面白い時代になっています。以上です。有難うございました。

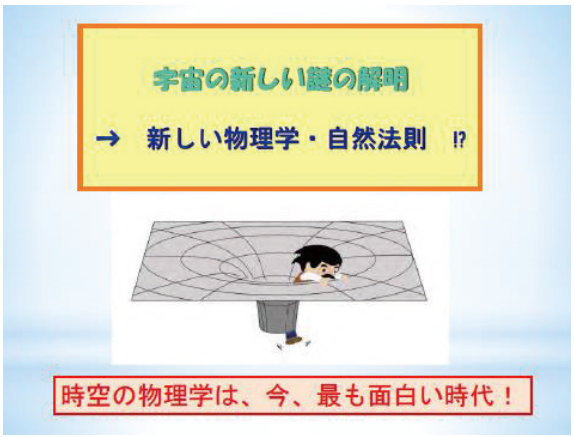


図 44

質疑応答

【司会者】前田先生、どうもありがとうございました。一般相対論の歴史的なところから始めて、宇宙論・ブラックホール、さらにはダークエネルギーとか最近の進展にまで、とても分かりやすく面白い話をしていただいたと思います。それでは少し時間がありますので、この中で質問とかありましたらどうぞお手を挙げていただきたいと思うのですが、いかがでしょうか。

【質問者】万有引力ではなくて、斥力の話が最後の方に出てまいりましたけれども、物質の世界の物質と、反物質世界の反粒子、それとの間に働く力というのは、物質と同じように、万有引力なのであるか、それは斥力なのではないかというのは極めて面白い問題であると思うのですけれど、以前はそんなものはあり得ないと理論家から一蹴されましたけれ

ど、最近、実験として反陽子からできた反水素原子というのは作ることができます。それがほとんど止まっているものを作れたとすると、それを重力空間に入れてやったときにそれははたして重力で落下するのか、あるいは上に向かって走り出すのかっていうそのサインを決めることが、今一番面白いところだと思うのですけれども、そういうところも可能性としては出ていて、理研の山崎さんのグループなんかが参加しているCERNの実験グループがありますけれども、それは、そんなことは頭から意味ないと言われ続けるのか、あるいは実験が出て、もしサインが違うとしたら認めざるを得ないのか、サインが違うということは、よく言われていて、我々の周りには反物質世界は存在しないっていうことの答えとしては、もう極めてはっきりした答えだという―要するに斥力があるから、反物質世界はどんどん遠ざかっていっていなくなっている、と思えば全部極めてよく理解し得るわけで、私はその実験は非常に面白いと思っているのですけれども。最近はどんなエキゾティックなことでも認めるっていうのが、理論の傾向ですから。

【前田】何を答えるべきか分からないのですが、もちろん実験がすべてだと思います、物理に関しては。理論でいくらすばらしいことを言っても、正しくなければ終わりなので。ただ、ニュートンの理論とか、一般相対論では、物質も反物質も同じ引力が働くと。だからそれを変えるともちろん違う力が働くことで、そういう斥力的なものが出てきてもおかしくはないと思います。ここに（図42）パンドラの箱を描いてあるのですが、ダークエネルギーという話が出てから、特に宇宙の理論屋さんはなんかあまり節操がないような気が僕はしているわけですが、もう少しすると落ち着くかとは思うのですが。

【司会者】他にいかがでしょうか。

【質問者】特異点で一般相対論が破綻しているということですけれども、それは、まあ点ですからミクロの問題だと理解していいですか。だからたとえば、量子重力かなんかで解決する問題だと期待していいですか。

【前田】もちろん、自然界には無限大がないというのはあれだと思います。古典論で考える限りは、曲率が発散するというのは実在しないと考えると、一般相対論が予言する特異点は実在しない。何らかのかたちでそれは避けないといけないのですが、それは、量子レ

ベルで避ける問題なのか、重力の問題として、非常に強い重力では一般相対論そのものが変わって避けるのか、それはもちろんまだ分かっていません。

【司会者】他にいかがでしょうか。

【質問者】では、せっかくですからひとつだけ。私が蘊蓄をたれることになるのですけれども。さきほどの、アインシュタインが―1917年でしたか―今から言うと間違った論文を書いていたという話は知っていたのですけれども、最近こういう論文があるというのを初めて知りましたのでご披露したいと思います。これは皆さんがよくご存じのアインシュタインが宇宙定数のことを、あれは私の人生最大の失敗だ、biggest blunder in my lifeと言ったのは、あれは嘘であるというのが話題になっています。まず、それに対する普通の答えは、あれはアインシュタインはどこにも書いていないというものです。ただ、あれはジョージ・ガモフが自分のMY WORLD LINEに書いたアインシュタインがこう言っていたというのが、ずっと最近までの正しい答えだったのですが、マリオ・リヴィオというアメリカの天文学者で科学史家の人がよく調べと、あれはジョージ・ガモフの捏造であると―聞いたようなことを書いているけれど、あれはそんなことはないのである―というのが彼の結論で、最近その本が出てもし興味があればと思いましたのでご披露しました。

【前田】それは須藤さんが書かれたのですか。

【質問者】いえ、違います。マリオ・リヴィオが書いて、実は私はその本の日本経済新聞の書評をしてそこで勉強しただけなのですけれども、非常に面白い本です。

【司会者】どうも有難うございました。それでは皆さん拍手を。

（司会）それでは続きまして、一般相対論に関する実験的なところから三尾先生にお話をお願いしたいと思います。

三尾先生は、現在、東京大学大学院工学系研究科の特任教授をされています。ご出身は東京大学理学部の物理学科で、大学院では故平川浩正先生の研究室で重力波の実験および小さいスケールでの万有引力の逆二乗法則からのずれ、そういうものの実験的な検証をされていました。大学院を出て通産省の工学技術院計量研究所の研究員をされた後、東京大学理学部の坪野先生の研究室の助手をされました。そして、工学部の助教授と新領域創成科学研究科の助教授、准教授をされて、現在は工学系研究科の特任教授をされています。

さきほど前田先生には理論的なところをお話ししていただいたのですけれども、皆さんもご存知のように最近重力波を直接見つけようという、そういう試みが世界中で行われていて、特にアメリカではLIGO（Laser Interferometer Gravitational Wave Observatory）という計画が非常に進んでいます。そのLIGOはAdvanced LIGOといってアップグレードしたものがすでに3ヶ月ぐらい観測をしていて、ひょっとするとそれが本当に重力波を見つけるかもしれないと言われています。

LIGOは3カ月間観測をした後は1回休んで―10ヶ月か1年ですか―さらにアップグレードをして、その後また観測を開始すると聞いています。ちょうどその時、日本のKAGRAが観測を開始して、うまくいけば重力波の発見に初名乗りを上げるかもしれないという、非常にエキサイティングな時です。多分、三尾先生にはそういうことも絡めて「アインシュタインへの挑戦―実験物理の極限を目指して―」という話をしていただけると思います。では三尾先生どうぞお願いします。

【註：この講演会の後、2016年2月にLIGOは重力波の観測に成功したと発表した。なんと、この観測期間の開始直後の2015年9月14日のイベントで、なおかつ、中性子星連星ではなく、ブラックホール連星の合体の際に発生した重力波であった。】

アインシュタインへの挑戦
― 実験物理の極限を目指して ―

三尾 典克
東京大学大学院工学系研究科 特任教授

本日はこういう大変光栄な場所でお話をさせていただける機会をいただきまして大変あ

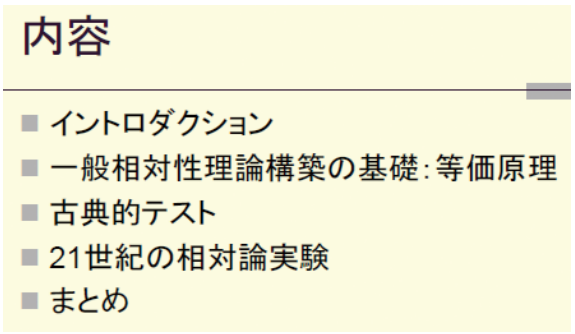


図 1

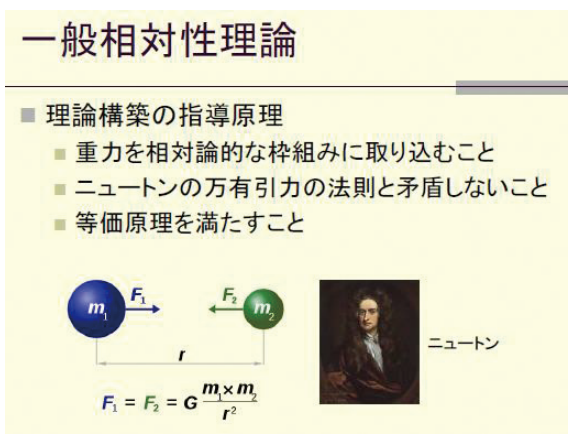


図 2

りがとう有難うございます。会場を見ますとちょっと緊張するというか、学生のときの諮問を受けているような雰囲気になります。100 年の歴史を語るにはちょっとペーペーなのですが、お付き合いのほどお願いいたします。

今日は実験のことを主にお話しさせていただくということで、ちょっと大げさなタイトルをつけさせていただきました。いま前田先生からお話がありましたように、理論というのは常に実験と両輪のようになって進むもので、実験データが支持していないような形のものは進まない、理論として成り立たないということになっています。

（図 1）本日はこんな感じでお話を進めていこうと思っております。前田先生のお話と内容が少し被るところもありますが、ご容赦いただいてお話を聞いていただければと思っています。

一般相対性理論構築の基礎：等価原理

（図 2）最初に、一般相対性理論についてです。これは重力理論であって、理論を構築するときには、相対論的な枠組みがちゃんと取り込まれていること、またニュートンの法則がちゃんと再現できないといけないし、さらに等価原理というものが大事な役割を果たしているという条件があります。

（図３）いまお話があったように、重力の効果というのは実際には時空間の幾何学に置き換えて議論するのがよろしいということです。さらに任意の観測者がいろいろな見方をしてもちゃんと物理法則が成り立つような表現になっていること。そういう形で一般相対性理論が作られてきたということは前田先生がお話しくださった通りです。

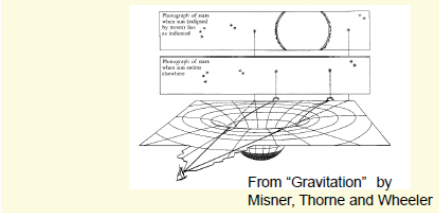


図３

（図４）ところで、重力というのは大変弱い力で、水素原子で働く電磁気力と重力の比をとってみると、40 桁くらい違うということが知られています。もし重力が 40 桁も強かったらこんなにのんびりと話なんか聞いていられないわけですけども、

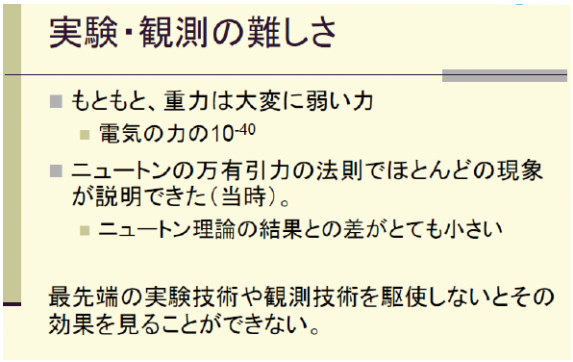


図４

実際にそれを確かめようと思うと非常に難しい力のひとつになっているということがあります。それからニュートンの万有引力の法則というのはいろいろな現象をとてもよく説明できていて、相対論の効果というのは実はほとんどよく見えないということが知られています。とにかくそれを見つけるには一番新しい実験技術や観測技術を見つけないといけない―そういうことで来ております。

（図５）先生方には釈迦に説法なのですが、有名な阪大の内山龍雄先生が 1978 年に書かれた教科書―これは自分の本で、勉強した跡があって汚れているのですけれども―の序章に、一般相対論という理論はニュートンの理論とは非常に違う形式で導かれるのだけれども、二つを比べるとあまりに違いが小さ過ぎて、大山鳴動ネズミ一匹型の理論である、そ

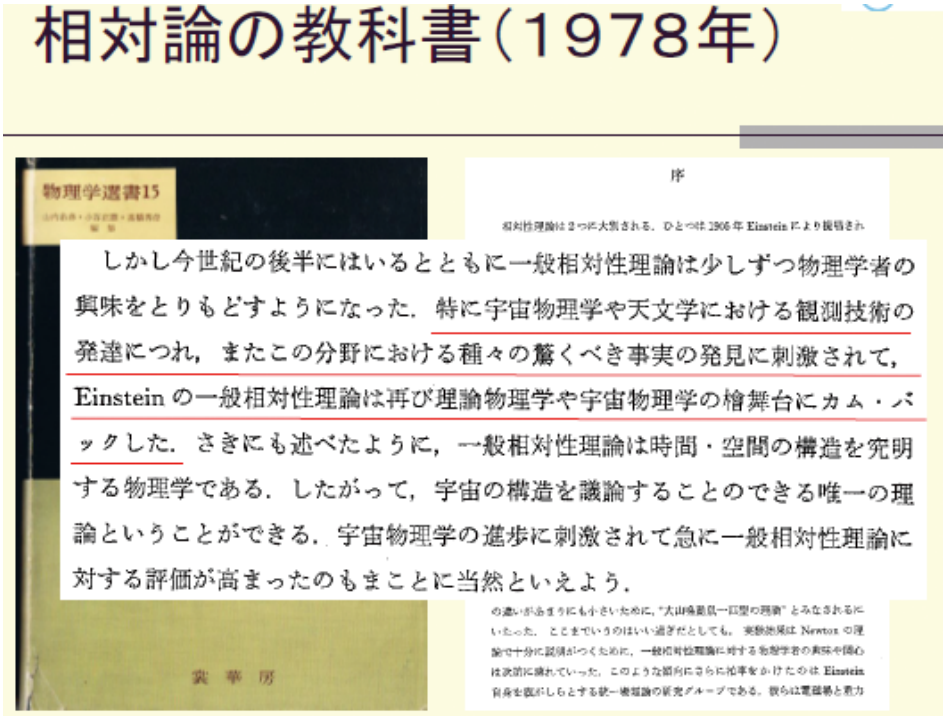


図 5

のせいであまり研究者の興味を引くことは無かった、という話が書いてあります。実際に確かにそうです。でもこれで終わってしまうと話が終わってしまうのですが、実はこの次のページにこんなことが書いてありまして、最後のところですが、「特に宇宙物理や天文学における観測技術の発達につれて、この分野における種々の驚くべき事実の発見に刺激されてアインシュタインの相対論がとにかく檜舞台にカム・バックしてきた」とあります。ちょうどそれが先ほどのお話しにもありました 1960 年代から 90 年代、そしてずっといままで続いている観測技術の進歩に合わせてきているものだというふうに考えています。

（図 6）これもお話がありましたけれども、一般相対論では、このような効果すなわちニュートンの重力では説明できないと言われている効果がいくつか提唱されています。有名なものが水星の近日点が移動するという話、いまお話がありました光が曲がるという話、それから光の伝搬が重力の影響を受けて少し遅れるという話、それから少し振動数がずれるという話、このうち最初の 3 つの項目というのは古典的なテストと呼ばれています。4

番目の話は、アインシュタインが一般相対論を創ったときには、前田先生のお話でもありましたように、等価原理でほとんど説明がついてしまっていて—等価原理といっても相対論の一部だろうということがもちろんあるわけなのですけれども—実際には相対論と言っても他にも似たような理論はたくさんあって、それらを区別するときには実はこの 4 番目のものは使えないというか、もともと理論がそれを満たすように作られているという—そういう話になっています。21 世紀になりまして、いくつかの新しい研究が進められているというのが現状です。

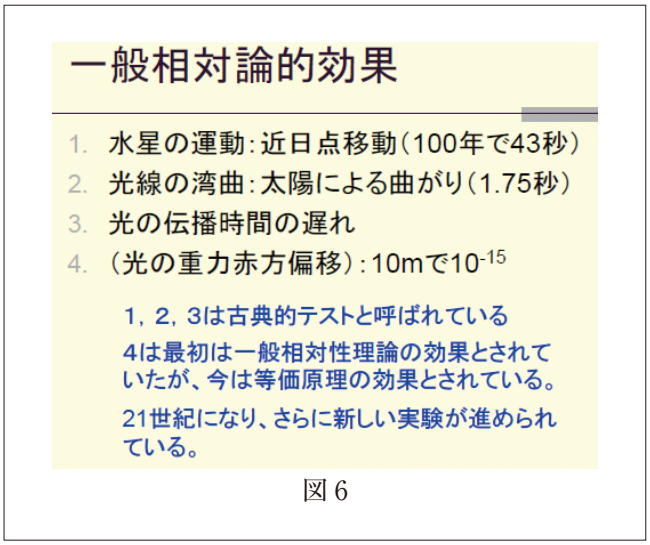


図 6

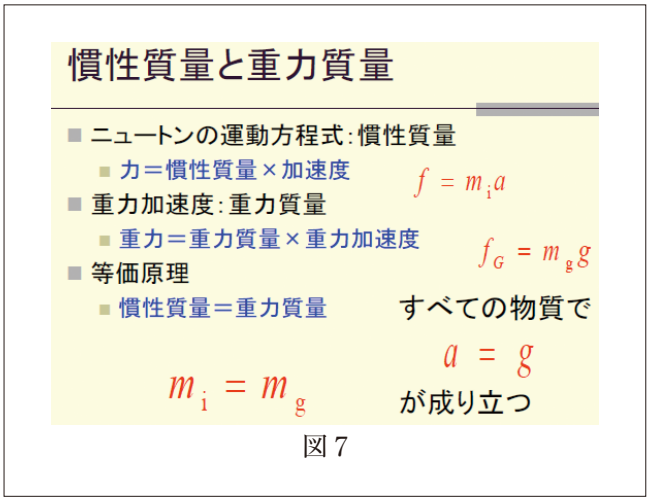


図 7

（図 7）最初に等価原理の話をもう一度させていただこうかと思います。これは本当に釈迦に説法で申し訳ございませんが、とにかくニュートンの運動方程式に出てくる質量と、重力の方程式に出てくる質量とが、等しいというわけです。なので、すべての物体で加速度が等しいとなります。ちなみに前田先生のところで質問のありました負の質量の問題ですが、慣性質量が負だとしても、実は、重力質量と等しければ質量に関係なく下に落ちるという話があって、負の質量をもった物体と正の質量をもった物体は追っかけっこするのではないかとか、いろいろなファンタスティックなことが起こるので、単純にどっちが負だとか正だとかという話になったときには、またいろいろなところで議論が始まると思いますので、何か分かりましたら是非教えていただければと思っています。

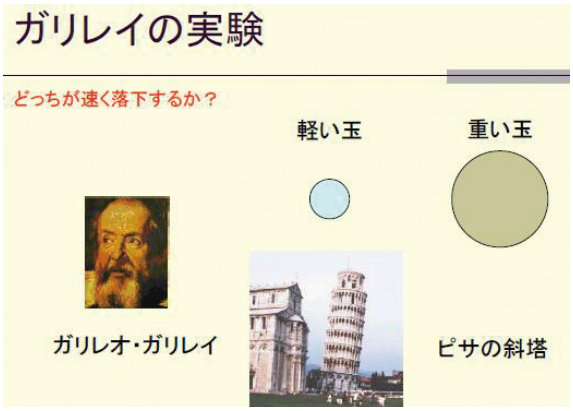


図 8

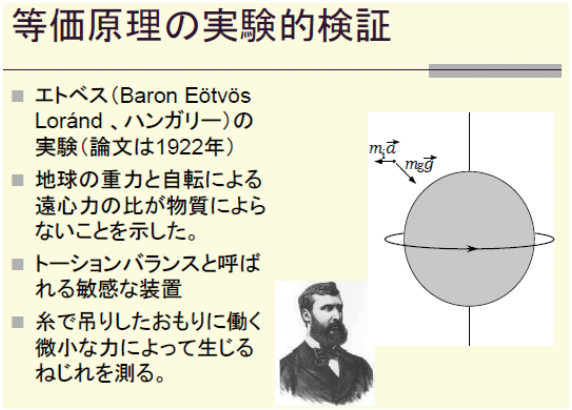


図 9

（図 8）これは本当にガリレイがやったのかどうかよく分かりませんけれども、ピサの斜塔で物体を落したという話があります。実際には斜面で実験をしたというふうに言われていますが、それほど精度が良かったかどうかは分かりません。

（図 9）本当にこれをちゃんと実験的に調べようという最初の試みはこのエトベスさんという方が、ハンガリーの方ですけれども、行った実験になっています。地球は回転をしていますので中心に引っ張られる重力と遠心力による慣性力の 2 つの力を受けています。この比が物質によって一定ならば同じと思って良いということで、トーションバランスと呼ばれる大変巧妙な装置を作って糸に吊した重りに働く力でこういうのを測定するという実験が行われています。論文が出たのは 1922 年ですが実はエトベスさんは 1919 年にもう亡くなられていて、死後に出た論文ということになっています。

（図 10）実際にはこんなふうにして 2 つの物質がこう棒の先についていて、糸がついていて、ここに重力と遠心力が働く、そんな形になっています。エトベス比いう、これは完全な業界用語なのですけれども、2 つの重力質量と慣性質量の和平均を差で割ったような量があって、これがどのくらい小さいか大きいかというのがこの実験の精度を表している量になっています。この装置はとてもよく考えられていて、この 2 つの質量がちょっとく

らい違っていたり、腕の長さがちょっとくらい違っていても、この２つの質量に働く力が平行になっていれば回転が起きないという仕掛けが作られています。そのお陰でこういう装置でも非常に桁の高い精度の測定ができるわけです。

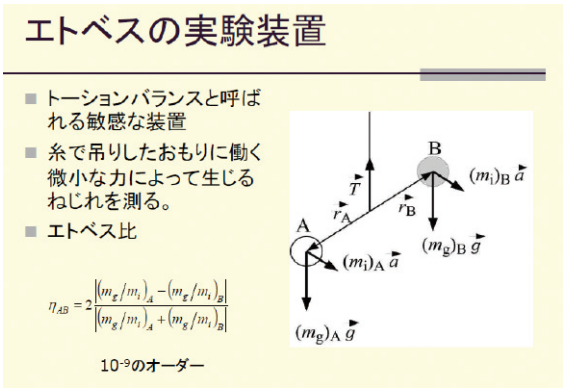


図 10

（図 11）実際にこんな写真がいまも展示をされていて、この装置も保存されています。実はこの写真は今日司会されている須藤先生が実際に行って撮った写真を頂いてきました。

図 11

（図 12）結果はこんなふうになっていまして、これは元の論文はドイツ語でして、持ってはいるのですがよく分からないので―その後ディッケ R. Dicke (1916-1997) 先生が書いた論文の中に表がまとめられていて、それにはいろいろな物質を測った結果がでています。エトベス比にすると 10 のマイナス 9 乗くらいの数字がザーっと並んでいます。多少、何か誤差よりも大きな数字が出ているのですが、バラバラしているのでこの当時は10のマイナス9乗の精度でOK だったということになっていました。ところが、1986 年頃にちょっと考えて並べ直すと実は直線に乗っているという論文が出まして、横軸が何だったかというと物質を作っている質量ではなくてバリオンの数の差みたいなものを規格化してやった量で見てみると、ほらこんなふうに並んでいるぞというふうな話が出てきて、これはちょっとびっくりした結果だったので、ひょっとしたらこういう力があるのではないかという話になりました。先ほどちょっと話がありました fifth force 第５の力のことです。いっぱい実験があってほとんどの結果は、最終的にはこういう力はないというところに落ち着いてはいるのですけれども、今もまだ研究を続けている

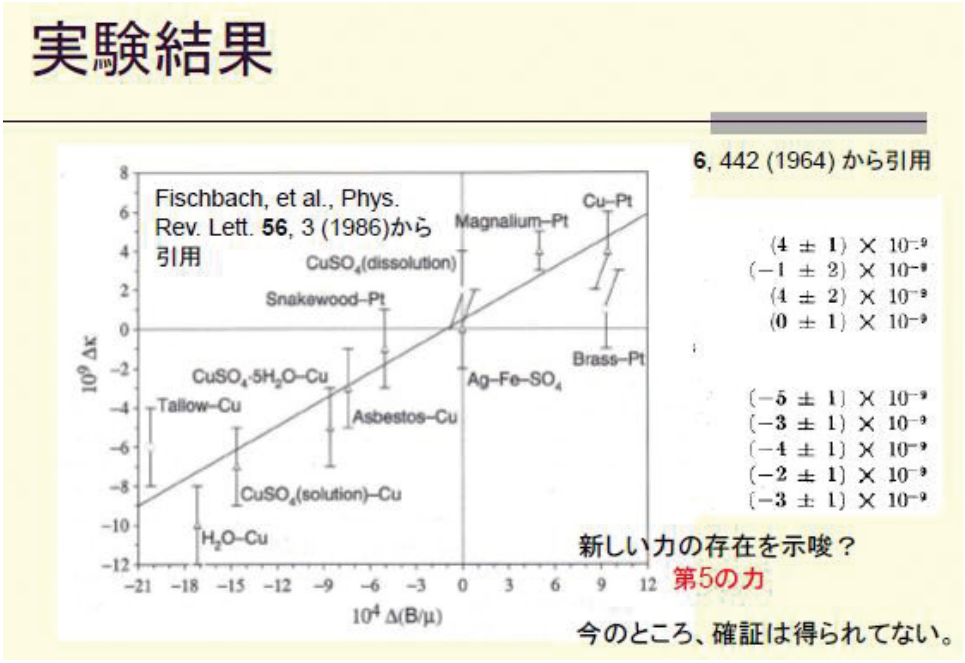


図 12

分野でもありますし、こういうのはまぁアッパーリミットを一生懸命下げながら、本当に何があるのかということを探しているという段階になっています。昔の実験ですごい実験なのですけれども、いろいろなことが隠されているということも事実で、100 年の長い歴史の中にこういうことが時々起きているということになります。

（図 13）いま等価原理はどんな感じになっているかということですが、これはクリフォード・ウィル C. Will（1946-）さんという方が、インターネットの上で発表されているものです。本も書かれていて、こういう分野でただ一人、ずっとこういう研究をされている方なのですけれども、エトベスの結果はここで 10 のマイナス 9 乗くらいでした。その後例えばここにプリンストンと書いてあるのは、ディッケ先生がやったもので、モスクワと書いてあるのはブラギンスキーさんがモスクワでやったもので、ほとんどこれが決定版だろうと言われていたのですけれども、10 のマイナス 13 乗の上の辺で 12 乗に近いところなのですが、ここにその fifth force の何とかというさっきの話が出てきて、みんな「えーっこれは大変だ」と言って、いろいろ実験を始めて実際に最後に残ったのはこのワシント

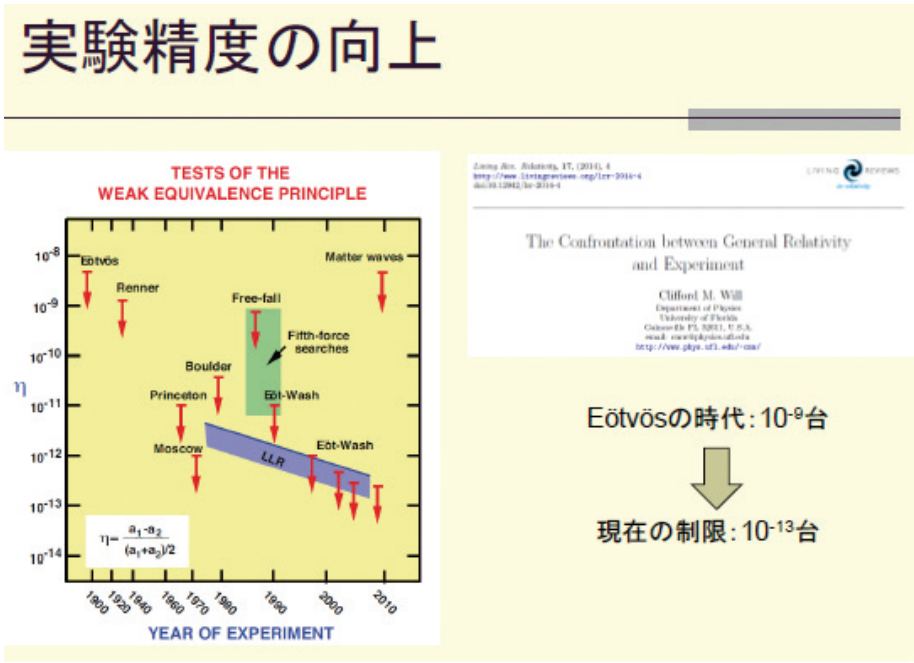


図 13

ン大学のグループで、いま、ちょうど 10 のマイナス 13 乗の下ぐらいのところになっています。ずいぶん時間がたっていますけれども実際に 4 桁くらい精度が上がってきていて、さっきのような第 5 の力のような話も含めるとこういう研究というのは、今も脈々と続いているということをぜひご理解いただければと思っています。

（図 14）お話したようにアインシュタインの等価原理が一般相対論の基礎になっていまして、慣性質量と重力質量が等しいという話以外に、例えば局所慣性系といって重力と慣性力が釣り合って無重力になったような状態では本当の無重力状態と区別がつかないようなことになるは

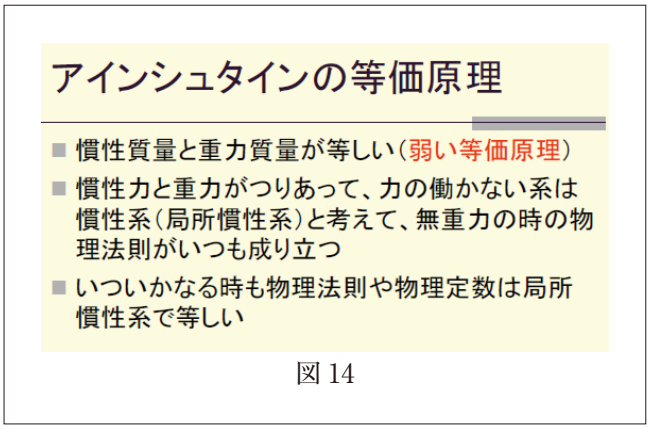


図 14

図 15

図 16

ずだとか、この局所慣性系では、いつどこでも物理法則は同じになるようにできるというのは、こういうものを組み合わせて話が進むことになります。

（図 15）すみません。ちょっと本当に一般向けの話なので。猫をいじめるのは物理学者の癖ではないのですが、猫がエレベータの中にいるとして、支えているワイヤーを切るとエレベータは落ちていくことになるのですが、実際にはその中に無重力が生まれます。そうするとこの状態でも普通の物理が成り立つというふうに思うことになります。

（図 16）こんなふうにして落ちているエレベータの中では光がまっすぐ飛んでいても、実際には外から見ていると曲がって進むことになります。今お話のあった通りで、光の曲りというのを等価原理だけで話しをするとこんな感じになります。ただ、さっきの話の通りでこれだけでは実際には不充分なのだけれども、とにかく光が曲がるという話もここから出てきます。

（図 17）つぎに周波数が変わるという話ですが、最初にこれが実験で証明されたのは 1960 年で、パウンド R. Pound（1919-2010）とレプカ G. Rebka（1931-2015）の実験という有名な実験です。これは 23 メートルある塔の上と下にガンマ線の検出器と発生器を置いて、その間で振動数を測定する実験を行いました。最終的にこの上と下をひっくり返して 2 つの差をとって測定をしています。その当時の写真が残っていて、この当時は電話だ

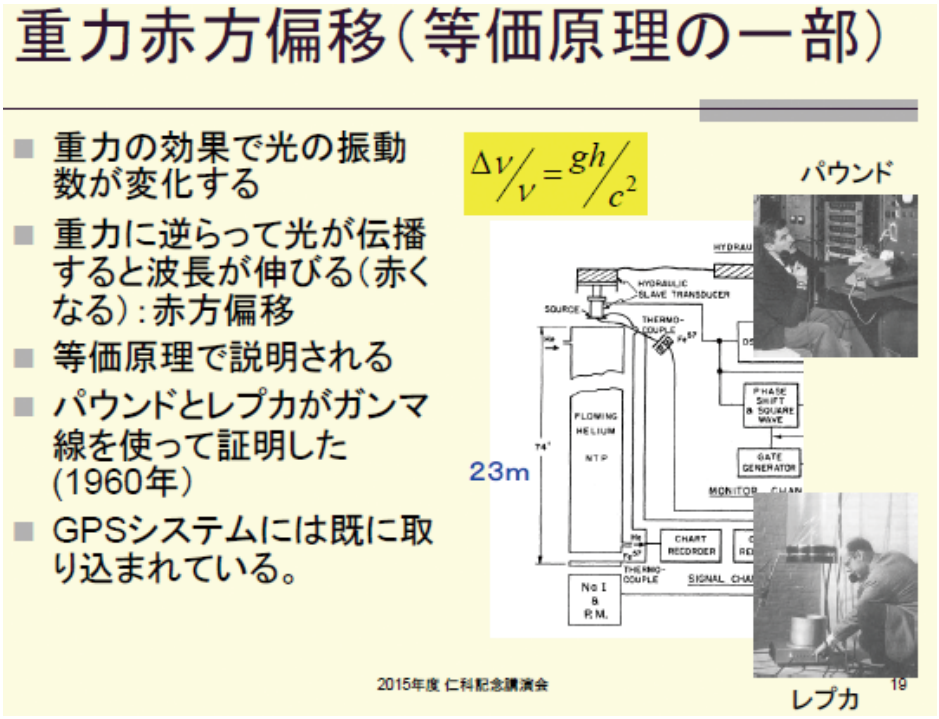


図 17

ったみたいで上から下へ電話をかけながら、実験をしていたということです。この現象は有名で、すでに GPS の原子時計には、この効果を補正するために少しだけオフセットが加えられていて、一般相対論は実は実用学なのですという説明に使われています。

（図 18）せっかくなので同僚の先生の話をさせていただきます。日本が世界に誇る最先端の話として光格子時計というのがありますが、これは東京大学の香取秀俊教授がご提案されたものです。レーザー光を使って格子状にポテンシャルを作り、そこに原子をトラップするという技術です。この提案そのものは今日いらっしゃっている清水富士夫先生のグループでなされたもので、そこで開発されてきていたのですけれども、そこへ原子を 1 つトラップして分光してやって新しい時計を作ろうという技術になっています。ひょっとすると 1 秒の定義がこれに置き換わるかもしれないという状況にきています。理論的には 10 のマイナス 18 乗の不確かさぐらいまで追い込めるというのが提案当時のものです。

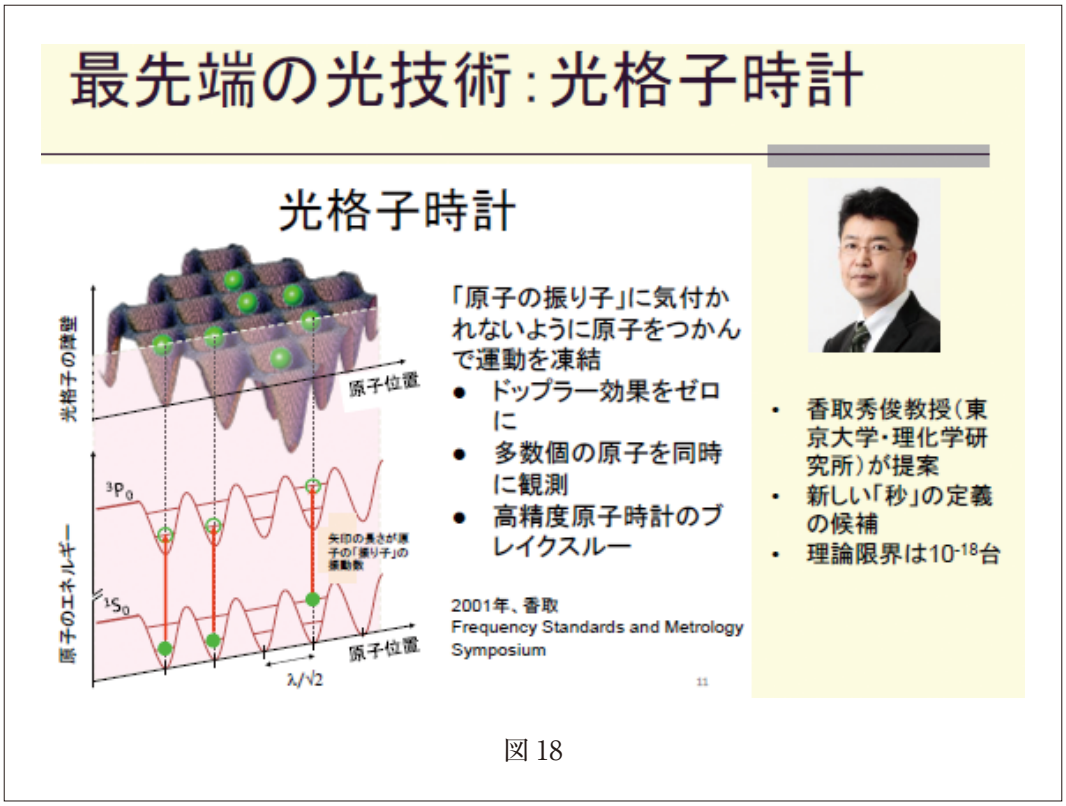


図 18

（図 19）香取先生から何枚かスライドをいただいてきました。いまやっていることは―いろいろなことで研究が進んでいるのですが―東京大学と和光市にあります理化学研究所を光ファイバーのリンクで繋いで、2 台の格子時計を置いてそこで時計の比較を行っています。ここととここに時計があってという感じです。ちょうど高低差が 15 メートルくらいあります。

（図 20）理研の光格子時計と東大の光格子時計の間のリンクです。ちょっと見にくくて申し訳ないのですが、この方は国土地理院というチョッキを着て歩いています。この高さの差は国土地理院の方が来て、実際に測量して測っていったとのことです。本当にさっきの効果がこの光格子時計でも出るかどうか、そういう研究が進んでいて、実際にやってみると水準器で測定した量をもとにこのくらいの周波数のズレがあるだろうという理論予測と実測値で、ここまで一致しているというのが分かっています。

ちなみに、これは未発表のデータだそうなので取扱注意だと言われてきたのですが、理研にある 2 台の光格子時計はぴたっと同じ振動数で 10 のマイナス 18 桁のところの精度で

光ファイバーで時計をつないで比較する
Riken
UT
直線距離　15 km
有楽町線と南北線を乗り継いで30km
（理研の光は0.15msで東大へ）

図 19

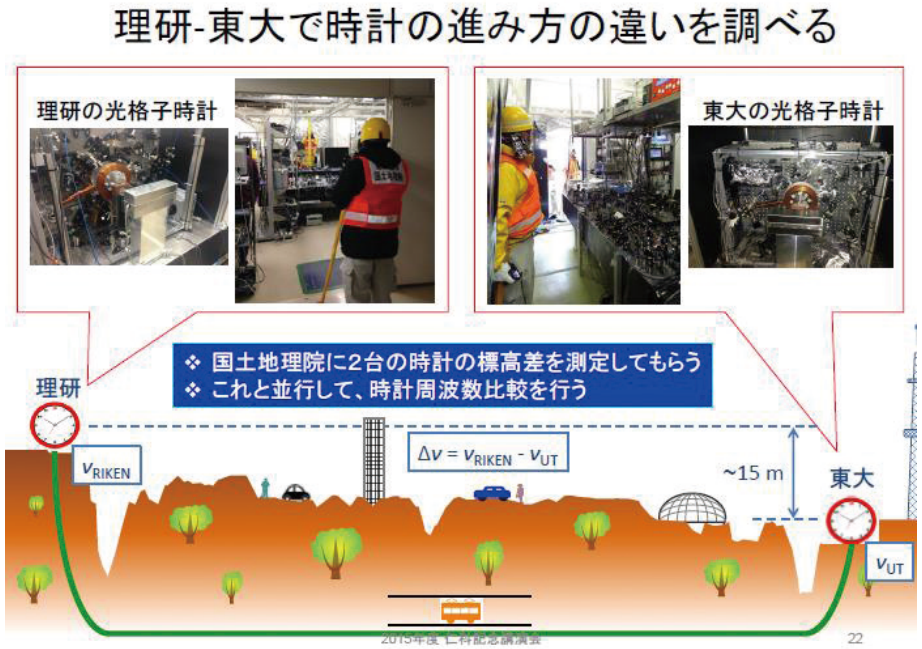

理研-東大で時計の進み方の違いを調べる
理研の光格子時計
東大の光格子時計
❖ 国土地理院に2台の時計の標高差を測定してもらう
❖ これと並行して、時計周波数比較を行う
理研
ν_{RIKEN}
$\Delta\nu = \nu_{RIKEN} - \nu_{UT}$
~15 m
東大
ν_{UT}
2015年度仁科記念講演会
22

図 20

安定しています。それに対して理研と東大の時計では、周波数のズレがきちんと見えています。もちろん、さきほどのパウンド・レプカの実験を光の技術で置き換えているということになりますけれども、時計が違うとひょっとすると効果が違うという話もあります。なので、こうやっていろいろな形で検証を進めていくということが実際にできるようになりますし、ガンマ線みたいに危なくないので、いろいろなところに設置して、ひょっとしたら測地学を変えることができるのではないかとか、そういう話までいろいろな話が進んでいます。

古典的テスト

（図 21）さて次は古典的なテストの話に移ろうと思います。

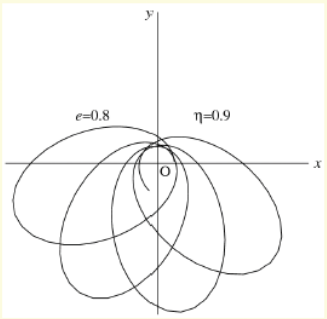
まずこれですけれども、これもよくご存知の通りで、とにかくケプラーの法則が正しければ一定の楕円を描くはずの軌道が、少しずつ動くことがよく知られていたそうです。100 年間で 43 秒というとてつもなく小さな数で、その差が分かっていたというのもすごいなといつも思うのですけれども、とにかくニュートンの理論では説明できないという話が、結局一般相対論の摂動効果でこれが出るということで、これは最初にアインシュタインが言ったときに大喜びされたという話です。

（図 22）ただ実際にこれはどのくらい本当は動くかということがあって、100 年間で実は 5,000 秒くらいは地球がプリセッションしている効果で春分点が動いていて、他の惑星の影響で 500 秒くらい動いていて、本当に残ったのは 43 秒ということでした。こういう話なので、この辺の桁がちょっと変わると実はこの辺もおかしくなるのではないかという素朴な疑問ももちろんあるのですが、実はこれがきちんと説明できるくらい天体の運行とか天体力学というのは素晴らしい精密科学であり、この時代から既にそうなっていたということです。

（図 23）ただ、ひとつ疑問がありました。この話が正しいためには太陽が本当は球でなければいけない、歪んでいて、quadrupole moment があったりすると、少しポテンシャルの形が変わるので、実はその効果で近日点が移動するということも言われていました。さらに言うとブランス C. Brans（1935-）・ディッケの理論が提案され―本当はこの他にも同じ時期に似たような理論が出ているそうなのですが有名なのはコレなので、しょっちゅ

水星の近日点移動

- 近日点は惑星が太陽に一番近づく点
- ケプラーの法則では惑星の軌道は太陽を焦点とする楕円：近日点は移動しない
- 100年間に43秒のずれが観測され、ニュートン理論では説明できない謎となっていた。



一般相対論で説明ができた

図 21

Table 1.1. *Perihelion advance of Mercury*

Cause of advance	Rate (arc s/century)
General precession (epoch 1900)	5025″.6
Venus	277″.8
Earth	90″.0
Mars	2″.5
Jupiter	153″.6
Saturn	7″.3
Others	0″.2
Sum	5557″.0
Observed Advance	5599″.7
Discrepancy	42″.7

図 22

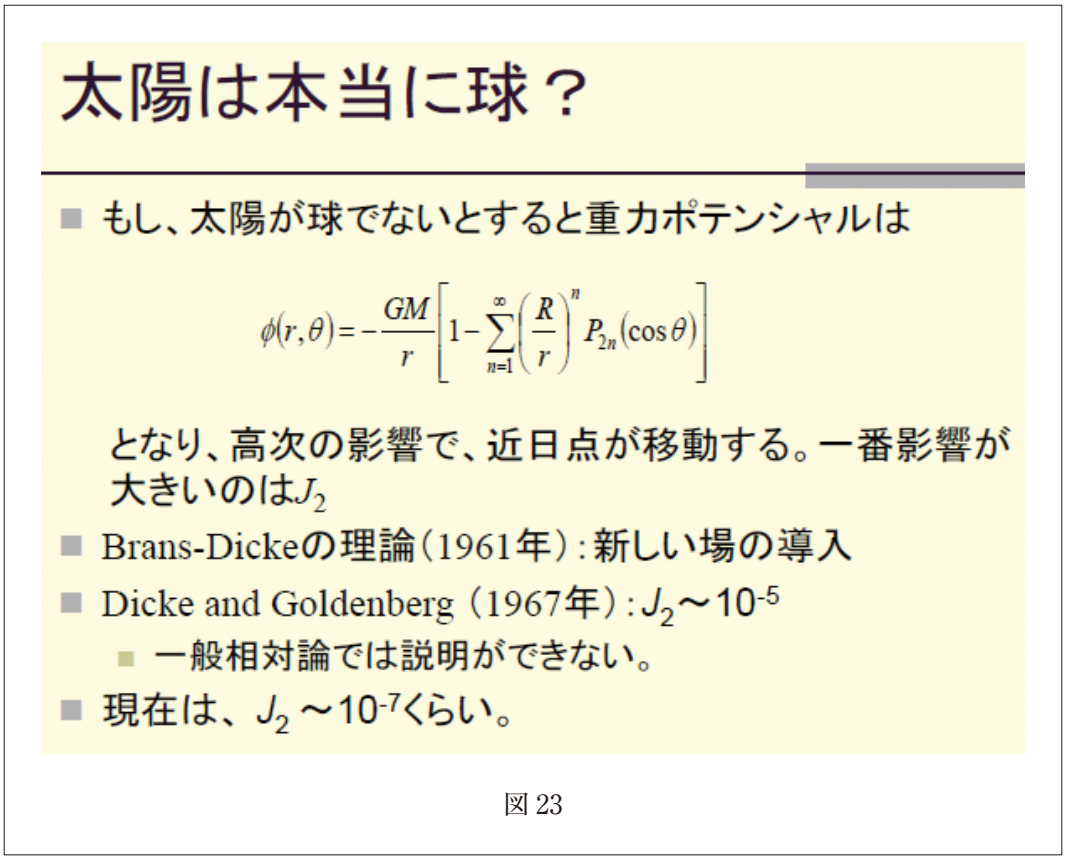


図 23

うこの話をするのですけれども―重力の効果を表すためにスカラー場をもうひとつ導入したら良いという議論がありました。さらにこのディッケ先生は一生懸命太陽の形を測ってJ2 という quadrupole moment の大きさが 10 のマイナス 5 乗くらいあるということをお話になっています。もしこれが 10 のマイナス 5 乗あると、一般相対論というのはアジャスタブルなパラメーターがひとつも入っていないので実は逆に理論が破綻してしまうという話になります。ブランス・ディッケの理論にはパラメーターがひとつだけあって、そのパラメーターを合わせてやると実は非常にうまく説明ができるということになりました。こういう理論、実際にはさっきの等価原理を満たしているなど、いろいろな指導原理を満たしている理論というのは一般相対論以外にもあるということが分かったということが大事で、そのためにテストするという意味で古典的なテストと言われているものは、理論によって違う結果を与えてくれるようなテストでなければいけないということになるのです。これもいろいろ紆余曲折があったようですが、実際に測ってみると J2 の値というのは 10 のマイナス 7 乗であるということになっています。実は極半径と太陽の赤道半径の相対比

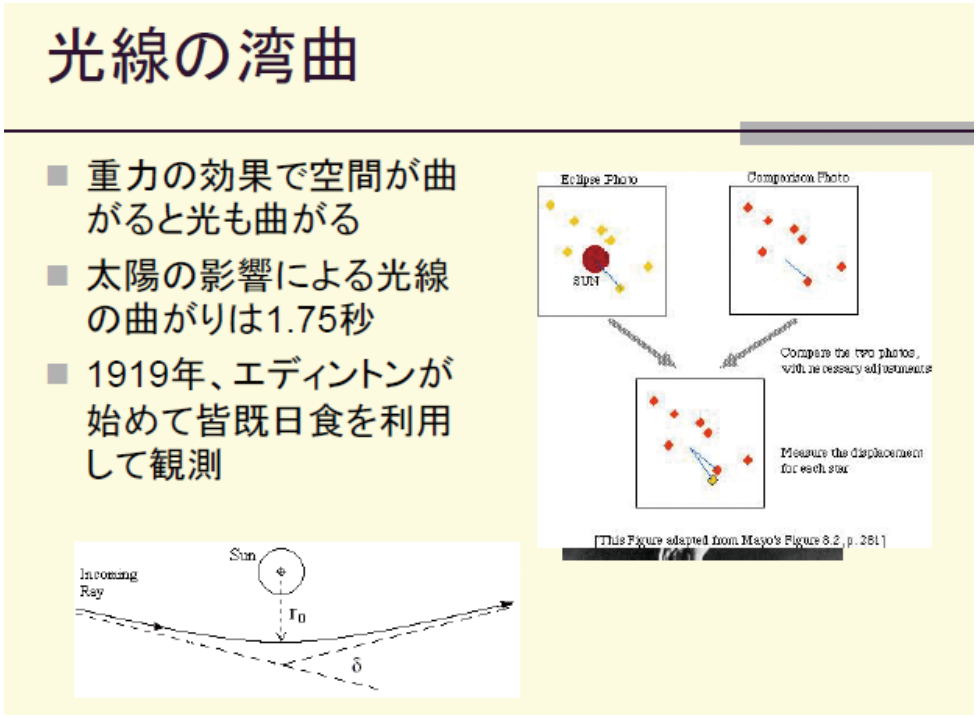


図 24

が 10 のマイナス 7 乗くらいで実は測れているということも—これもまたすごい話なのですけれども—実際にはいろいろな惑星の運行とか、飛翔体の運行を精密に観測して、それらからモデルを立てていろいろな太陽の内部構造まで含めた計算をしてこういう値が出ているということになっていて、いまのところ、どうしてもスカラー場をもってこないといけないというところには来ていないようです。

（図 24）光が曲がるほうの話ですが、これはさっきの話のとおりでこのエディントン A. Eddington（1882-1944）さんという人が 1919 年の日食で初めて観測したという話になっていて、1.75 秒くらいになっているのが初めて見えたということです。写真を撮ってその位置の差を比べて。でも実際には、どうもこのエディントンのこの時の観測というのは怪しいという話もあって、本当はこんなに測定精度がなかったのではないかという議論もずっと続けられているようです。2 箇所、アフリカとブラジルで測ったデータを突き合わせて議論しているのですけれども、やはりこれだと言い切れるほどのデータではなかったの

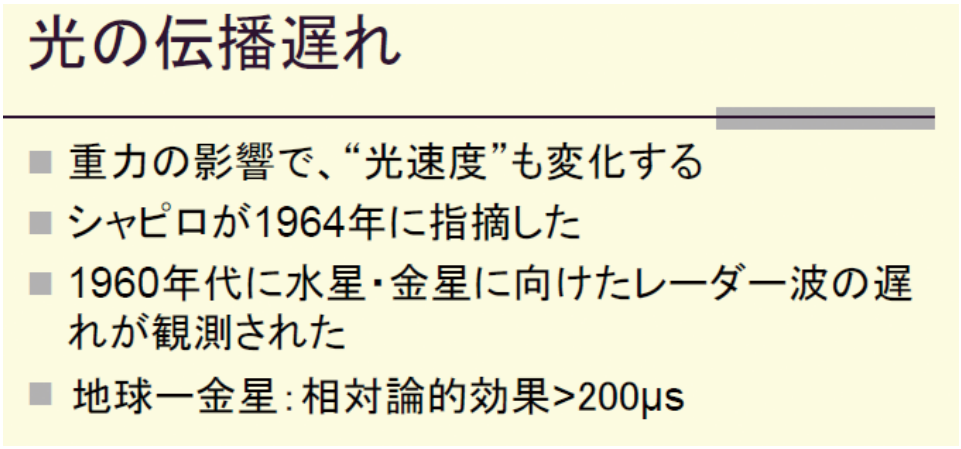
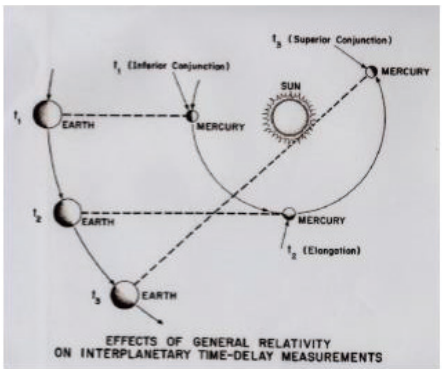


図 25



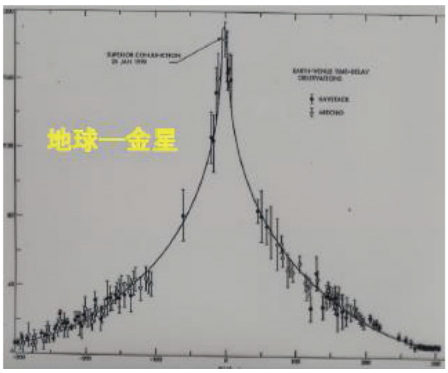


図 26

ではないかというのが正直なところです。ただ、実際にこのデータを別の人たちが本当に写真を持ってきて 1979 年にもう一回解析をし直したデータというのもあります。それによるとやはり相対論の結果がほぼ再現されているということです。

（図 25）もうひとつ新しい、これも 3 つめの等価原理の代わりにでてきた話として、光速度が変化するのを測るということをシャピロさん I. Shapiro（1929-）という方が 1960 年頃に提案しています。実際に惑星に電波を当ててレーダーで測ることができるようになるとこういう測定ができるようになって、金星と地球で 200 マイクロセカンドくらいの遅れが見える。

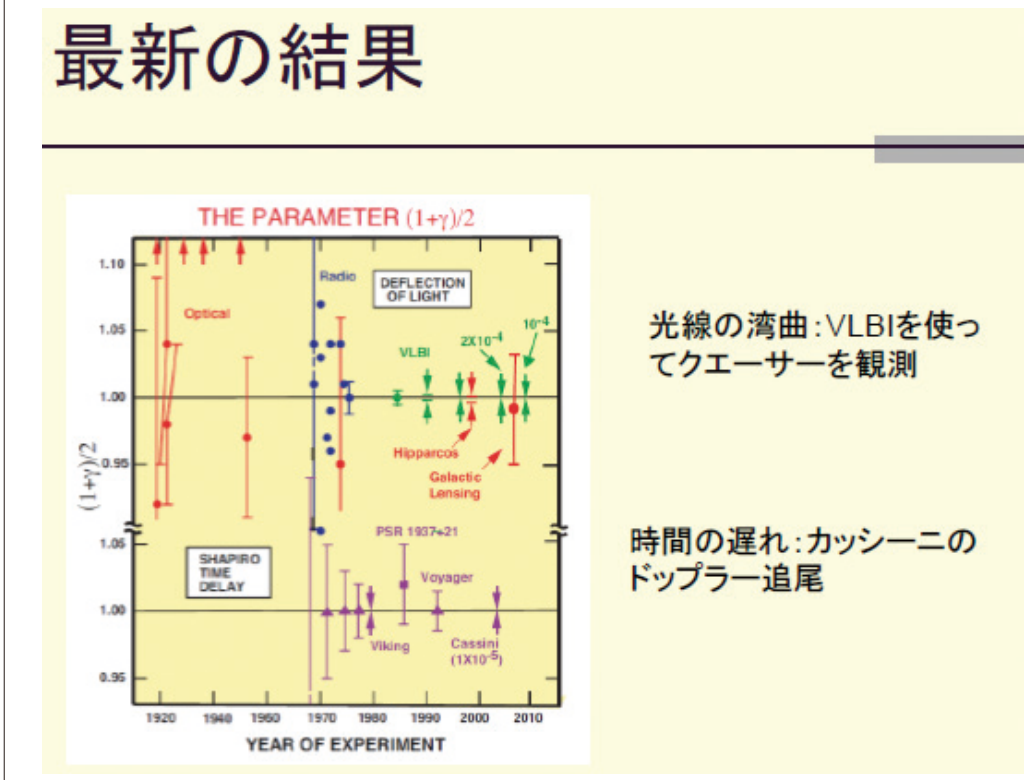


図 27

（図 26）左の説明の絵は水星だったり、右のデータは金星だったりと、ちょっとコンフュージングな図なのですけれども 光が太陽の傍を通ったときと、こちらを通ったときで測ったときにズレが出る―そういうことが実際に測られているそうです。

（図 27）このデータは横軸を年代にして、縦軸を γ というパラメータ（一般相対論では 1）を用いて書いたものです。さきほどのウィルさんのところから持ってきたのですけれども、例えばこの辺は光線の曲りのデータなのですが、1919 年というのはちょうどここになります。ものすごく大きな誤差があるのですが、現在、一番厳しいのは遠方のクエーサーを VLBI という超長基線干渉計で光線の向きを測ったというデータが出てきていて 10 のマイナス 4 乗くらいまで精度が上がっています。

（図 28）時間の遅れについても―これは始まったのが新しいのですけれども―一番厳し

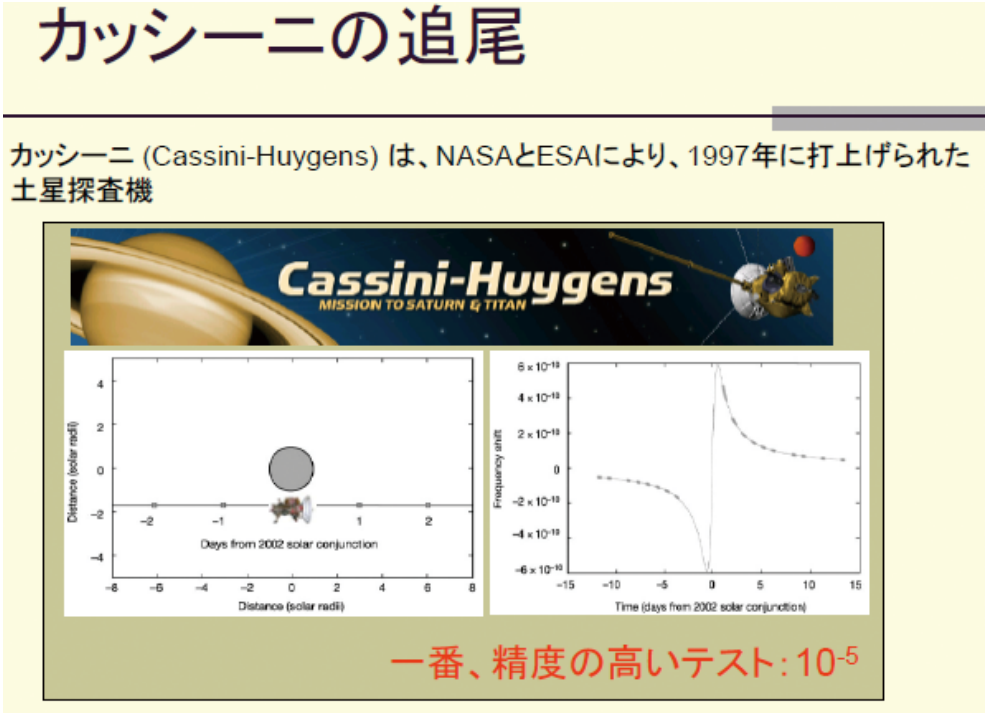


図 28

いのはカッシーナという土星の探査衛星を測定したデータがあって、ちょうど太陽の向こう側にいるときに当てるとこういう綺麗な遅れが見える。これでいま 10 のマイナス 5 乗の精度までいっていて、これがいまだに相対論のテストとしては一番厳しい上限を与えているということになっています。

（図 29）とにかくいろいろなデータが一般相対論を全て支持してきたということです。他の理論というのは大体パラメーターが入っていて、そのパラメーターがどこか極限をとると一般相対論に一致するような構造をしています。そして、観測の結果、どんどん、どんどんその極限に追いやられてしまって、一般相対論との差がなくなってきたというのが現状というところになります。

21 世紀の相対論実験

（図 30）それで 21 世紀に入ったというわけです。では何をやろうかということなのですが、

大きな話として2つ例をお話ししようと思っています。一つは慣性系の引きずり効果とか重力磁気効果と呼ばれている実験があります。これはGravity Probe B（GP-B）というプロジェクトになります。ちなみにBがあるということはAがありまして、Gravity Probe Aというのは原子時計をロケットに積んで打ち上げてその赤方偏移がちゃんと理論通りになっているかというのをやった実験です。でもあまり結果が出てこないです。で、もう一つは重力波の話をさせていただこうと思っています。

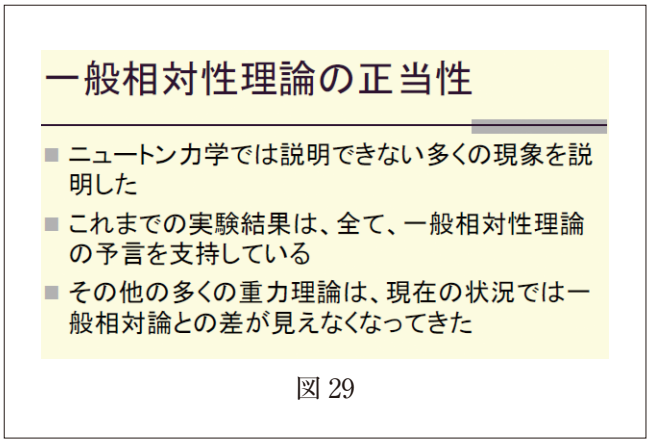


図29

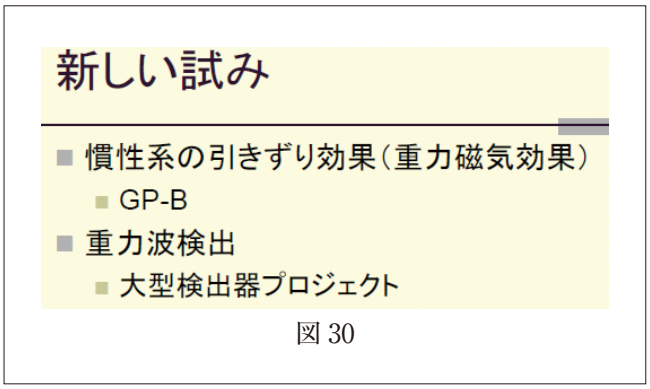


図30

（図31）まず、計量テンソルというのはこういう形に書かれます。これが計量テンソルの正体で、足が2つあるので行列みたいに書けます。0から3までが時間と空間の座標を表します。対称なのでこちらは書いてないのですけれども、これら10個の役者がどのように振る舞ってくれるかが一般相対論のテストになるわけです。ここで、00の成分というのは時間と時間のところに組み合わせをしていて（時間・時間成分）、例えば赤方偏移の話をする場合にはこの成分で議論をすることになっています。それから古典テストというのは基本的にはこの対角成分を使って議論しているようになっています。さきほどの重力磁気効果というのはこの成分（時間・空間成分）が役者を果たしています。それからこの空間・空間の成分は、三角形にしか書けなかったので四角で囲ってあるのですけれども、この成分というのが実は相対論でのダイナミクスを見るときの主要な成分を表しているということになっていて、これからお話をさせていただく重力波もこの辺のいくつかのパラメーターの組み合わせで表現されるという形になっています。なので、一応全部埋まると全ての成分が見えて、めでたしめでたしということになるわけです。

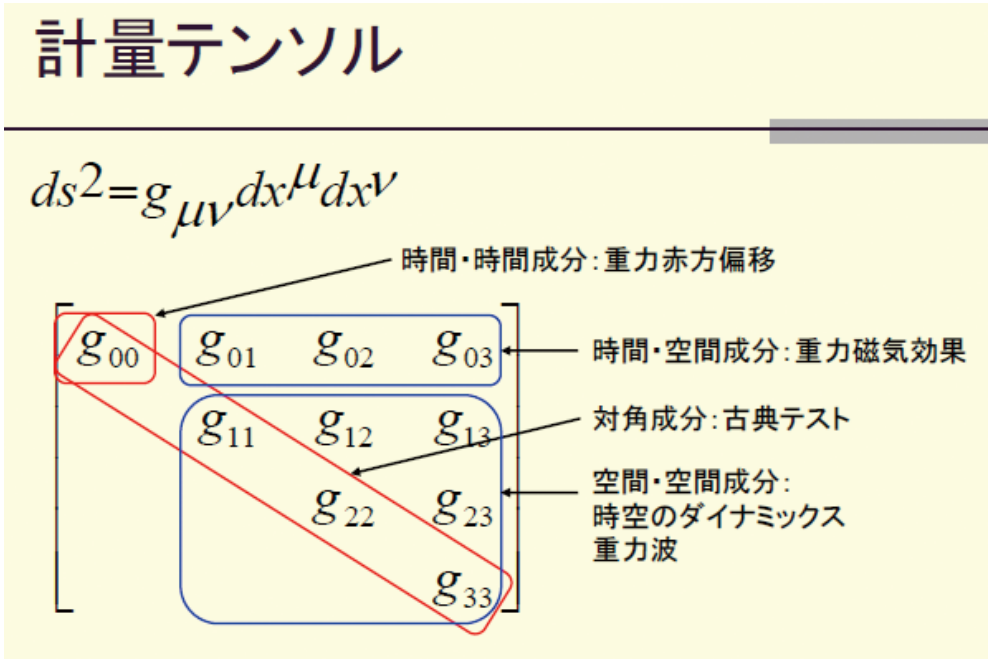


図 31

（図 32）最初に「慣性系の引きずり」の話になります。これは、質量が回転しているとその周りの空間が質量の回転に引っ張られて、その慣性系そのものも引きずられる効果だというふうに言われていて、絵ではこんなふうに描かれています。地球をターゲットにしていますので地球がくるくる回っているとその周りにできるフレームが引っ張られる（Frame-dragging）というふうに言われています。そこで重力磁気効果とか J. Lense（1890-1985）さんと H. Thirring（1888-1976）さんが最初に言われたので、Lense-Thirring 効果とか言われています。実際にこれをどうやってテストしたらいいかということになりますが、ジャイロを使って検出したら良いというアイデアが、量子力学の本で有名な Schiff 先生が 1960 年頃にお話しされています。これがそのポンチ絵なのですけれども、ジャイロは力が働かなければ角運動量の保存則があるので、常に一定の方向を向いているはずです。ところが、こういう軌道運動を描くと、この地球が全く止まっていたとしても、地球の質量で曲がった空間のせいでベクトルの向きが少し傾くという Geodetic Precession 測地線才差と呼ばれる効果があります。これはジャイロが極軌道に乗っている絵なのですけれども、その極軌道の面内に対してジャイロが傾くという効果となります。

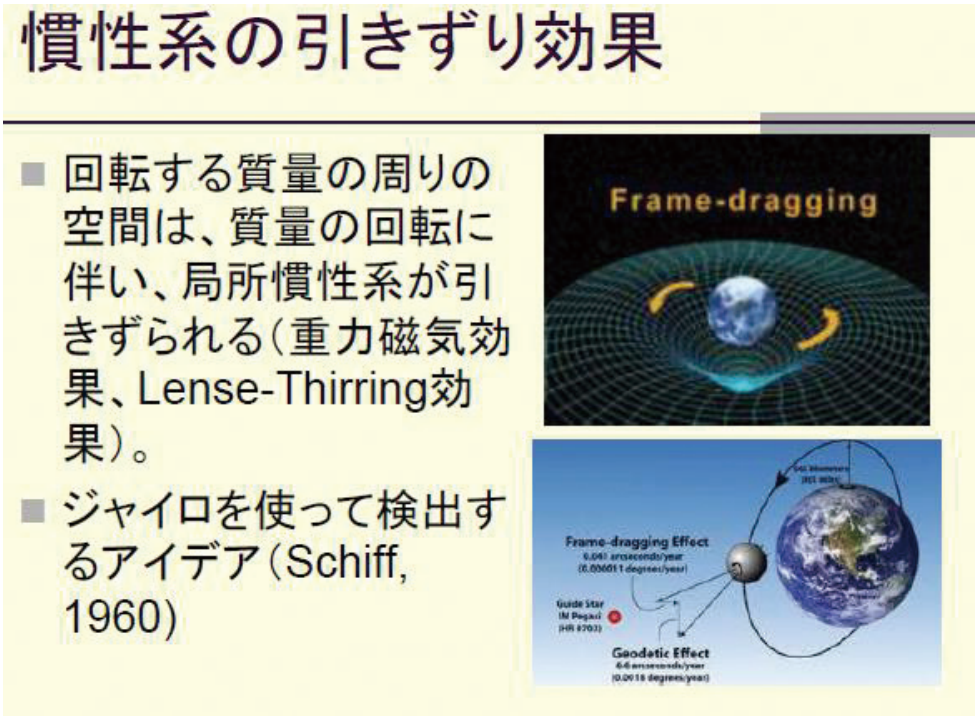


図 32

これに加えてさらにこの地球がくるくる回転していると、今度はジャイロが横へ回るという引きずりの効果が加わります。ジャイロの回転を見てやることによって、この 2 つの効果が見えるというアイデアが提唱されていて、さきほどのシャピロさんとかその時代からずっと試行結果が出て来ていました。

（図 33）では、これは実際にはどのくらいの量かというと、計算すると 1 年間で 100 分の 4 秒、測地線才差でも 6 秒 / 年くらいというとっても小さな量になります。これはジャイロが命なので、とても精密なジャイロを作るのにすごく時間がかかりました。とにかくほんのちょっとでもでこぼこしているとそのでこぼこにトルクが働いて Precession が起こるので、その効果を抑えるためにひたすら丸い球を作るということが行われていました。私も含めてちょっと口の悪い人は、こんなものは磨けないよね、どうせ打ち上がらないよと言っていました。まあ 1960 年代の提案なので、50 年以上経っていたのですが、かなりの長い期間どうやってこの球を磨くかというのが研究のミッションだったということを聞

図 33

いています。最終的にはこういう玉が磨かれていて、これは直径が 38 ミリメートルの石英の球だそうですが、表面にニオブがコーティングしてあって超伝導を使って検出するような形をしています。でこぼこが 20 ナノメートルしかない、世界で最も球らしい球だといって作られています。これが数個搭載されていて、しかも超伝導を維持するために巨大な液体ヘリウムのタンクも衛星に乗せて 2004 年に打ち上がりました。みんなびっくりしました。本当にこれは上がったのだと、その当時は言っていました。確か 1 年ちょっとで液体ヘリウムがなくなってしまったので、ミッションは終了しています。この衛星自身には望遠鏡が積んでありまして、遠くの、星の名前は忘れてしまいましたけれども、常にその星を見ながらその星に対してこのジャイロがどう運動しているかを精密に測定するという実験になっています。実際には、超伝導の膜に不均一の効果が残っていたというのが打ち上がった後で分かりました。パッチ効果というのだそうです。超伝導の膜というのは普通一様かと思うのですけれども、ほんのちょっとのわずかな不均一さが残っていて、それが電磁気的な効果で周りと相互作用しているというのが分かったのだそうです。打ち上が

った後彼らは一生懸命解析をしてなんとかその不規則な運動を取り除くことをやって、やっとこの Lense-Thirring（LT）の効果を 20 パーセントくらいで見たという報告をしました。測地線才差は、0.3 パーセントで見たと結論づけて終わっています。本当は確か 1 パーセントくらいの精度で LT の効果を見たいという実験だったのですが、少し残念な結果になりました。 いろいろな、7 つの 0 だか、いくつかの 0 を目指して実験をしたというのが、ここのホームページに上がっていますけれども、こういうことはやってみないと分からないことがどうしてもありまして、実験の面白さでもありますけれども怖さでもあります。この研究をずっとやっていたスタンフォード大学のエベリットさんいう方は、これ一筋にずっとやってこられて最後結果が出た時にたまたま国際会議でお会いしてちょっと話しをしていたら、かなり不機嫌な状態で違う話をされていました。でも実際にこの実験ができたというのは実験をやる立場からしてみると本当に素晴らしいことだと思っていますが、もうひと頑張りする価値があるかどうかはまたこれからの問題かと思います。もうひとつ、この引きずり効果に関連すると、レジオスというレーザーで衛星の軌道を観測するシステムがあって、それは全くこれとは違うのですけれども、衛星の軌道を解析することで Lense-Thirring 効果が見えたという研究論文があります。それもやっぱり 10 パーセントから 20 パーセントくらいの精度で引きずりが見えたということが言われています。ただこちらの研究では、地球のすごく複雑なモデルがあって、それを用いて様々な効果を引き去った残りを議論しています。なかなか厳しいところは厳しいというところで、これはもう少し次の世代の宿題になっているというふうなところが正しい解釈かもしれません。

（図 34）残りは重力波の話をさせていただければと思います。もちろんここで話をさせていただく重力波の話は一般相対論から出てくる波です。電磁気学によれば、電荷が加速度運動をすれば電磁波が出ると同じように、質量の加速度運動で重力波が出ます。多少絵を描くときに気をつけたのは、大きさが小さいとか、波の振動数が電磁波の 2 倍になっているとか、などの点です。

（図 35）実際に回転する物体から出る重力波の計算では、質量の 2 乗、半径の 4 乗、周波数の 6 乗に比例するというざっくりした式があるのですが、かかっている係数がやたら小さくて、とにかく地上の物体をいくら振り回しても何も出てこない。でも質量とか、天体規模まで行けばまぁかなり大きなものが回ってくれるということは分かっていて検出の

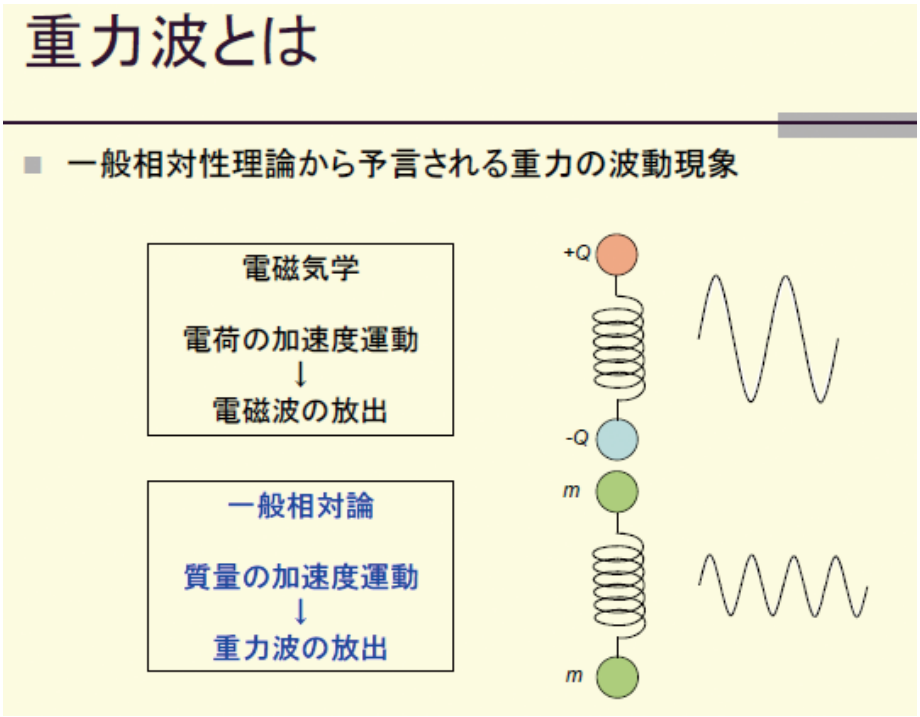


図 34

可能性があるということになっています。それなので基本的には空から降ってくるものを狙うというのがすべての重力波実験の基礎になっています。

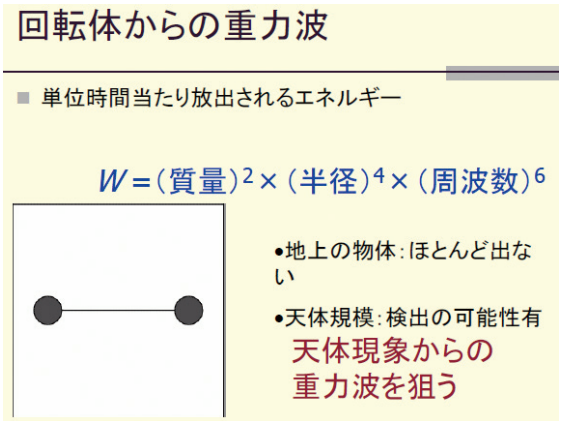


図 35

（図 36）ただこれもよく知られている話なのですけれども、連星を組んでいるパルサーというのが世の中にいくつか見つかっているという話をさきほど前田先生がされていましたけれども、太陽質量の 1.4 倍くらいの星が 2 つくっついて、くるくる回っています。最初に見つかったものだと思うのですけれども、

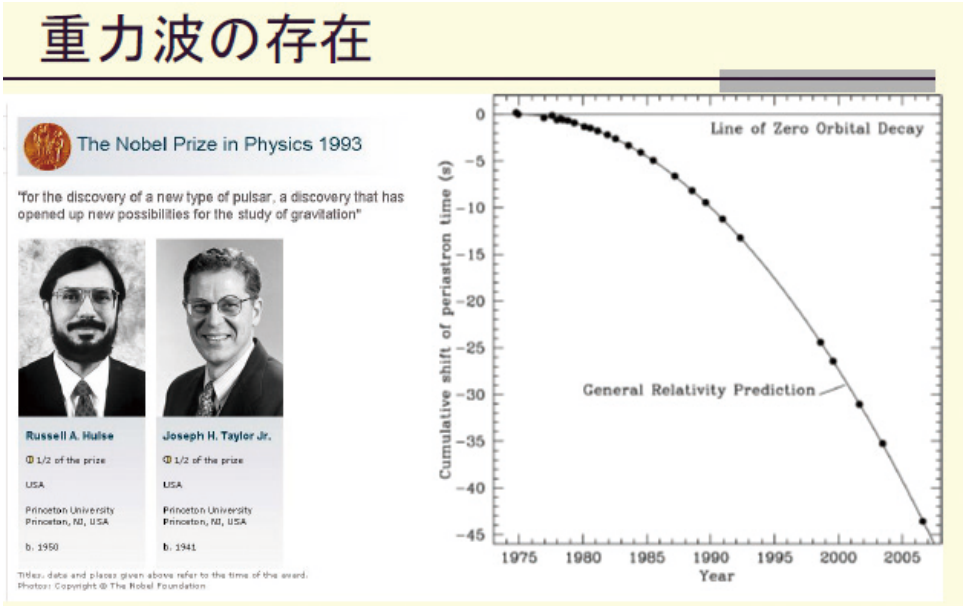


図 36

これは PSR1913 +16 というもので公転周期が 8 時間くらいになっていますが、徐々に公転周期が短くなっているということが知られています。その短くなっている周期の計算を重力波の放出によるエネルギーの損失が本質だと思って計算すると本当に何パーセントの精度で良く一致するということが知られているのです。量子力学の入門の話で古典的な電磁気学では水素原子が電磁波を出して潰れるという話の重力波版です。実際この星は 300 万年後には潰れて合体するということが分かっています。これで 1993 年のノーベル賞を J. Taylor（1941-）と R. Hulse（1950-）のお二人がお取りになりましたし、すごいのはずっと観測が続いているのですけれど、最初は 1975 年くらいで、2005 年とか 2006 年で切れていますけれど、この点線がフィッティングではなくて計算した値なのですね。そのくらい非常によく合っている。だから重力波はあるのは間違いないと皆信じているのです。

（図 37）そのせいで、こういう重力波天文学をやりましょうとかという、見てきたような話をすることになります。電磁波が出るというは基本的には電荷の運動を見ています。それに対して重力波は質量の運動が見えるというのがそれとの大きな違いで、とにかく違うものが見えたら、いろいろなものが分かるのではないかというのが、重力波をやっている

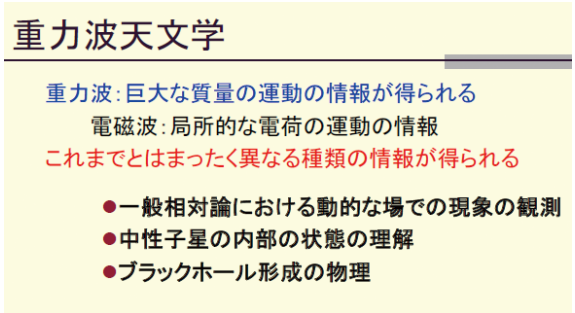


図 37

人達、我々の望みでもあります。

（図 38）こんなものがあるだろうという話で、さきほどの中性子星の合体みたいな話ですとか、超新星の爆発とか、ブラックホールの合体の話もありましたし、パルサーが自分で回っているところから出ているのではないかとか、さらに背景放射のようなものも含め、いろいろなものがあるとか、そういう話がいくつも議論の対象になっています。今のところ中性子星が合体するときの重力波が一番ターゲットになっていす。さきほどのものは 300 万年経たないと合体してくれないの

図 38

で、それを待っているというわけにはいかないということになるわけです。

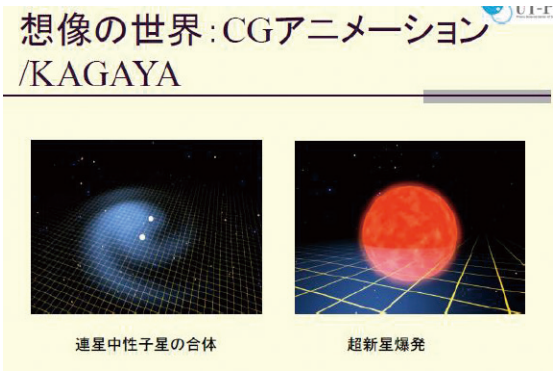


図 39

（図 39）これは KAGAYA さんというアニメーターの方が全くの想像で創ってくださったものなのですけれども、本当は音も入っているのですがちょっといま出せなくて。このような感じで周りに広がっている波が重力波をイメージしたものです。こちらは超新星爆発です。この絵は実はだいぶ前に作っていただいたものなのですけれども いろいろな方にお見せしています。光っているのは電磁波なのですけれども、周りに出ている波を見たい、それが望みです。

（図 40）数値相対論という大変精緻な分野がありまして、さきほどのアインシュタイン方程式を数値計算で解く―そういうことができれば本当に何が起きるかというのを予言できることになります。これは柴田大先生（京大基研）が、東大にいらした頃の計算なのですけれども、例えばこれはほぼ 1.3 倍くらいの中性子星がどう動くかという、これは想像ではなくて計算なのです。こんなふうに波が出ていく様子がもう計算でできるようになってきています。 ちょっと質量が違うと、これは片方がちょっと重いのですけれども、もう全然違う、ぐちゃっと潰れる。ですから重力波を見るとこういうのが区別できるのではないかという強い期待がもてるものが出来てきています。

（図 41）問題はここから先なのですけれども、重力波の振幅は h を使って表すことになっていて、さきほど実は絵にこっそり書いてあったのですけれども、これは相対的な変異の比を表しています。ちょっと恥ずかしいのですけれども、このような感じで変化するのが見えるようになっています。ここは修正していなくて単に時間変化でこうなっただけなのですけれども、ほんのちょっと変わっても実際結構見えるのですけれども、これが 10 のマイナス 21 乗とかの数字になったときにそれが見えるのかというのが大問題になっています。

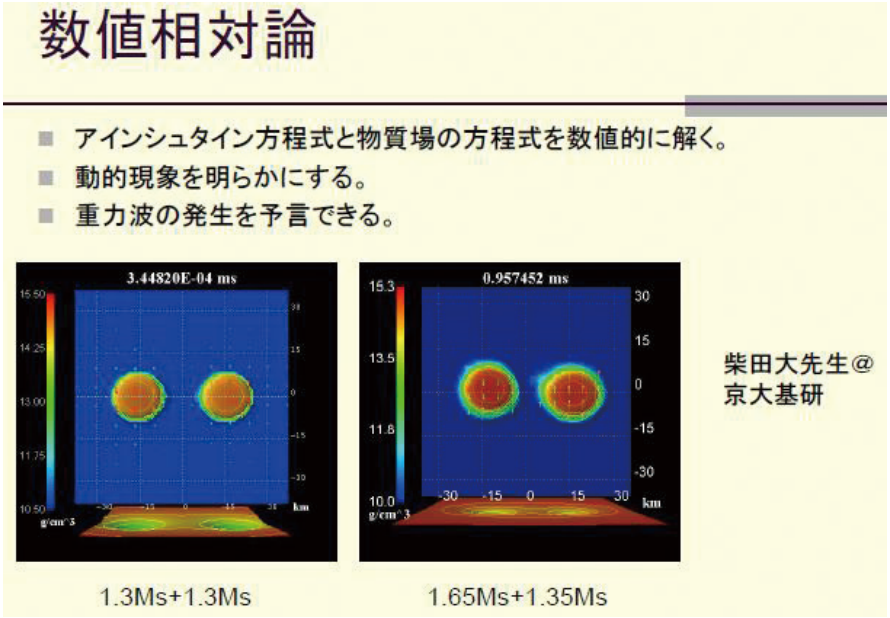

数値相対論
アインシュタイン方程式と物質場の方程式を数値的に解く。
動的現象を明らかにする。
重力波の発生を予言できる。
3.44820E-04 ms
0.957452 ms
柴田大先生@
京大基研
1.3Ms+1.3Ms
1.65Ms+1.35Ms

図 40

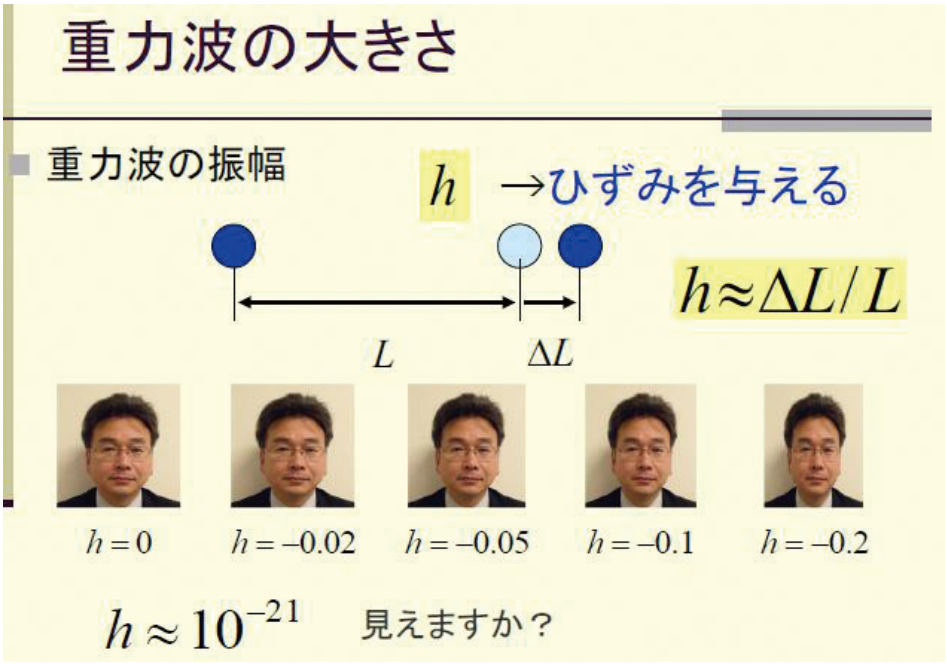

重力波の大きさ
重力波の振幅
h →ひずみを与える
h≈ΔL/L
L
ΔL
h = 0
h = –0.02
h = –0.05
h = –0.1
h = –0.2
h ≈ 10^−21
見えますか？

図 41

（図 42）さきほどの絵は 1 方向の圧縮だったのですが、実際の重力波は直交する 2 方向で伸縮の方向が違います。この方向だと今縦方向が伸縮していて、横方向は伸長しています。 波なので偏波がありまして、こういうプラス方向に偏波しているものとクロス方向に偏波しているものと 2 種類あります。実際にこんな感じで、このモードで言うと潰れたのが伝わってくると嬉しいと、そういうことになっています。

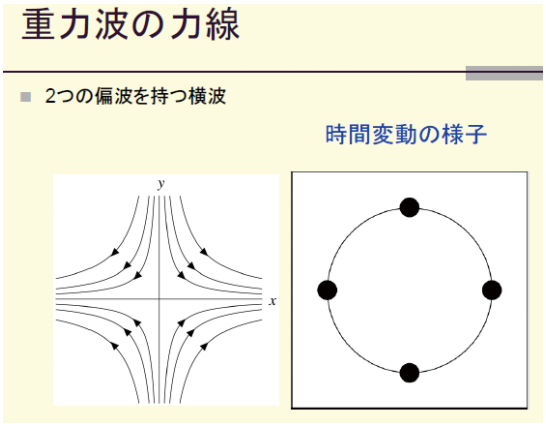


図 42

（図 43）10 のマイナス 21 乗というと、簡単に言うとこういう話をよくするものですから、ちょうど太陽と地球の間の距離と水素原子の大きさの比をとると 10 のマイナス 21 乗くらいになるので、これをとにかく受ける装置ができたら重力波が受けられると、そういう話になっています。本当にできるでしょうかというのがずっと我々に課されてきた宿題です。

（図 44）歴史的には、1960 年頃にメリーランド大学の J. Weber（1919-2000）先生がこういう弾性体の共振器を使って実験を始めました。これはちょうど 1 キロヘルツくらいの共振周波数をもっている振動体で、それに重力波が加わるとこんなふうにして大きな振幅が見えて、受けられるのではないかという話になっています。こんな感じの、これは実際ご本人が実験をされて、昔はちゃんと教授が実験できたという、そういう話です。

（図 45）それで 1969 年実際に重力波を見つけたという論文を彼は書いています。1,000 キロメートル離れた 2 台のディレクターがほぼ同じ時刻に大きな信号を検出した。 これはああ見つかった、じゃあ皆でやろうという話で、世界中にこういうアクティビティーが広がりました。でも結局、誰も追試ができなかったですし、あまりにエネルギーが大き過ぎて、これはどうも重力波ではないという結論になっています。ただこういうことでもないとこんな突拍子もない研究というのは始まらなくて、やはり最初に始める人というのはと

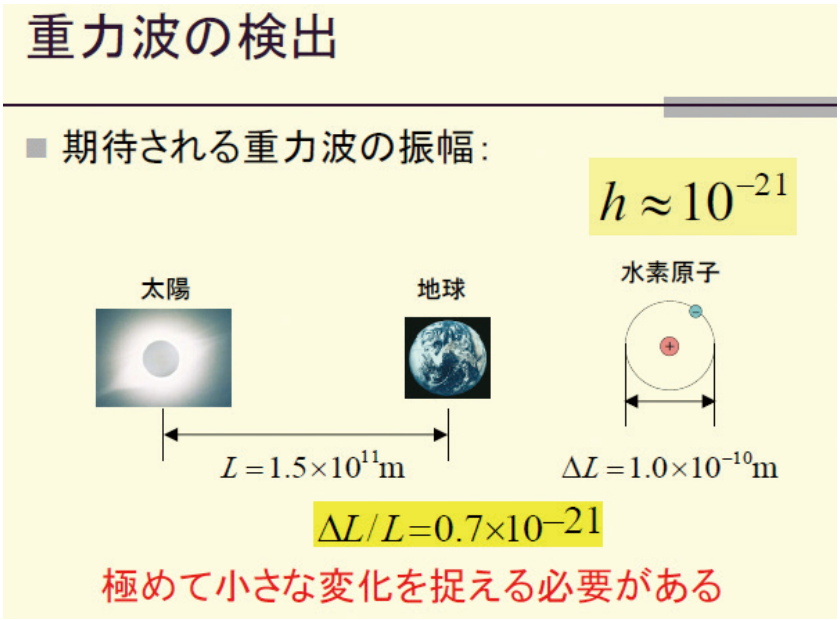

重力波の検出
期待される重力波の振幅:
$h \approx 10^{-21}$
太陽
地球
水素原子
$L = 1.5 \times 10^{11}\mathrm{m}$
$\Delta L = 1.0 \times 10^{-10}\mathrm{m}$
$\Delta L / L = 0.7 \times 10^{-21}$
極めて小さな変化を捉える必要がある

図 43

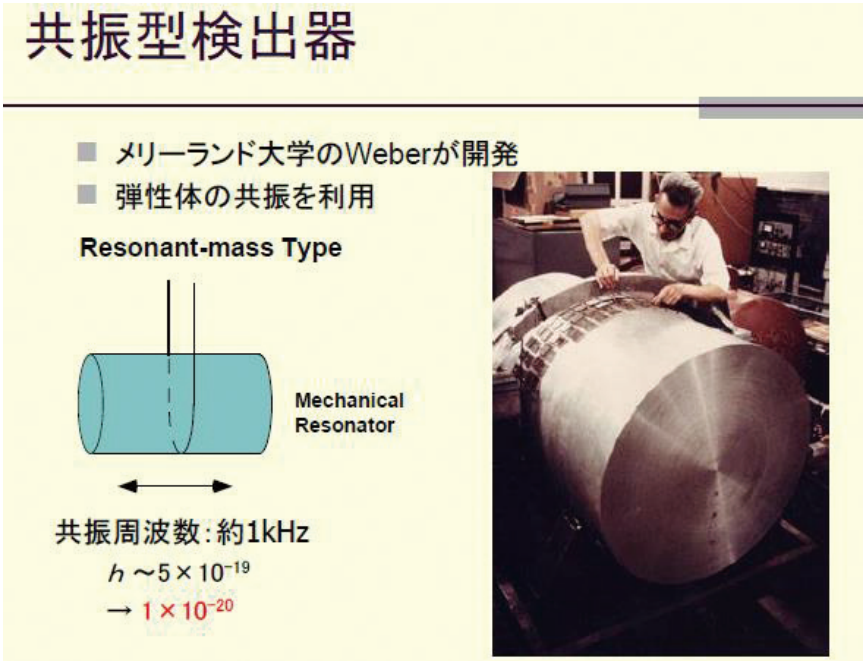

共振型検出器
メリーランド大学のWeberが開発
弾性体の共振を利用
Resonant-mass Type
Mechanical Resonator
共振周波数:約1kHz
$h \sim 5 \times 10^{-19}$
→ 1×10^{-20}

図 44

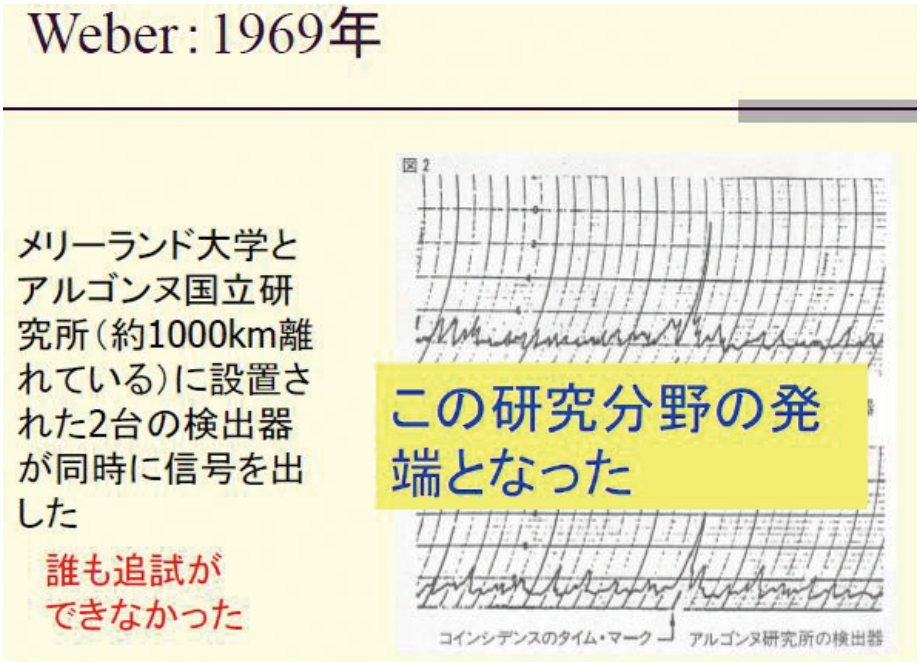


図 45

ても大事で、皆からなんかちょっとおかしいと思われるくらいでも初めて、こういう結果が出てくると皆さんがついてくるという、そういう一番良い例ではないかと思っています。

（図 46）いまはレーザー光を使った検出器になっていて、マイケルソンの干渉を使った装置が作られています。1980 年代頃に長さが 10 メートルくらいのものが作られてきて、90 年代を超えたあたりからこの長さがキロメートルのものに移り変わってきています。こんな感じで鏡の振動に従って明るくなったり暗くなったりというのが干渉計の原理なのですけれども、実際に重力波の値を入れてみるとこの明るさが 10 のマイナス 10 乗くらい変化するものを捕らえたい、そういう話になっています。

（図 47）こういう波が入ってくるとちょうど干渉計とマッチして非常に感度が上がるというわけです。

（図 48）実際のものはこういう大きな真空装置の中に鏡が入っていて、しかも普通 3 キ

レーザー干渉計型検出器

- 自由質量型検出器:すべての鏡が吊ってある
  - 周波数　100～1kHz
  - $h \sim 10^{-19} \rightarrow 1 \times 10^{-22}$
- 1980年代:　プロトタイプ
  - マックスプランク研究所(独)
  - グラスゴー大学(英)
  - カリフォルニア工科大学(米)
  - 宇宙科学研究所(日)
- 1990年代:　大型計画

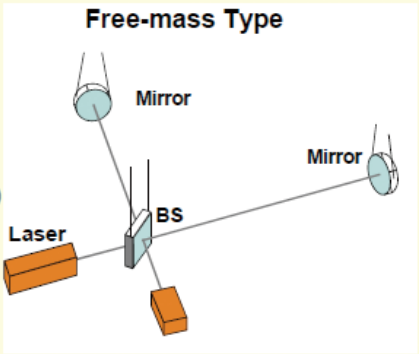
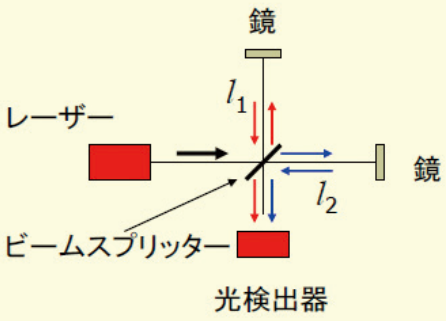


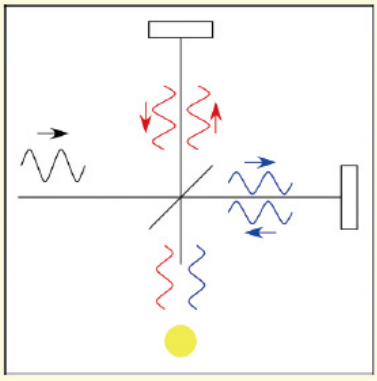
図 46

マイケルソン干渉計

- 2つの直交する経路を持つ干渉計



マイケルソン干渉計



$$\Delta\phi = \frac{4\pi}{\lambda}(l_1 - l_2)$$

図 47

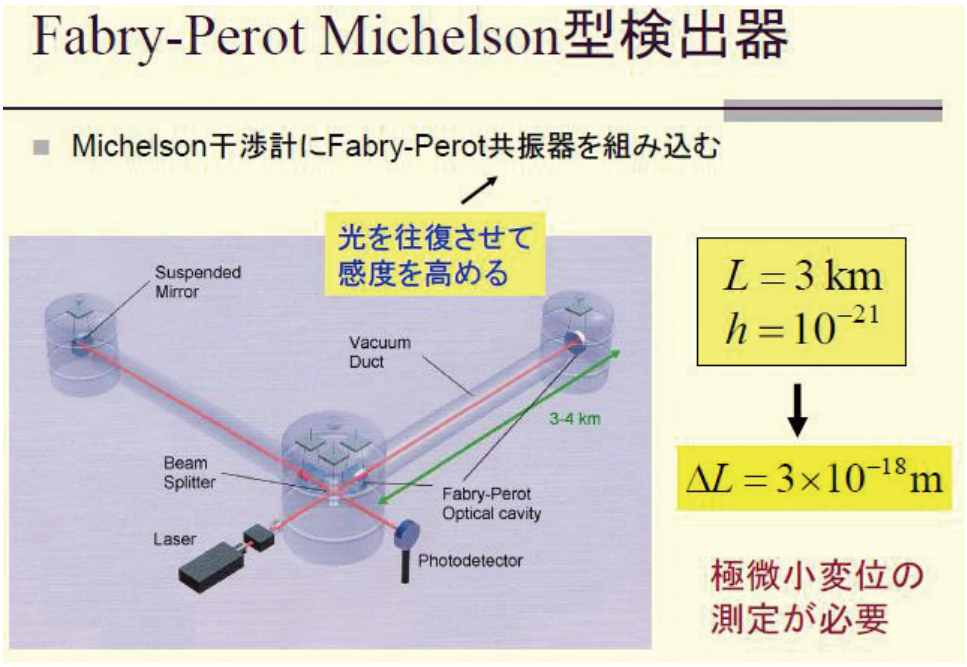


図 48

ロメートルでは足りなくて、その中を光が何回か往復して、大体 100 キロメートルくらい光を飛ばしてやることによって感度を稼いで検出するという装置が作られています。でも実際に原子核半径の 1,000 分の 1 とかそのくらいの鏡の変位をきちんと検出する装置というものが必要になります。

（図 49）さきほどお話しがありましたように、こういうのは巨大な計画で、ちょっとした実験装置ではありません。国が巨費を投じて作るプロジェクトになっています。アメリカは LIGO というプロジェクトがあって、西海岸と東海岸に 1 台ずつ大きな検出器があります。ヨーロッパには VIRGO といってフランスとイタリアが共同で作っています。今、我々は KAGRA と呼ばれている検出器を建設しているところです。

（図 50）やはりアメリカは凄いというか、やり方がやはりなんとも言えず迫力があって、最初にこういうものを始めたのもアメリカでしたし、ずっと着実にステップを踏んで新しい検出器を作っています。2 つの検出器の距離が 3,000 キロメートルくらい離れています

大型計画

- LIGO
  米国
- VIRGO
  フランス、イタリア
- GEO600
  イギリス、ドイツ
- TAMA
  日本
- KAGRA
  日本

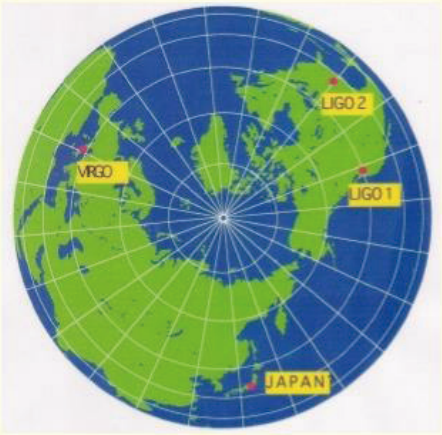


図 49

LIGO - Laser Interferometer Gravitational Wave Observatory

- 4km干渉計を2台建設（ワシントン州Hanford、 ルイジアナ州Livingston）
- 2001年秋：テスト運転開始
- 2002年中にすべてのシステムが完成
- 2003-4年: Science Run（S1-S3)
- 2005-7年：S4, S5（長期観測）
- 2008-9：Enhanced LIGO
- 20010- :Advanced LIGO（2016?年観測開始）

図 50

図 51

ので、ちょうどここに日本がすっぽり入ってしまうくらい離れたところに検出器が置いてあります。離れているところで同時に受けると重力波の信号であるという可能性が高くなります。3 台あれば三角測量ができるので、どこから飛んできたか方向だけは分かるというのが本来の姿なのですが、2 台だとまだ方向は分かりません。そこで、いろいろなところとコラボレーションをして、検出器のネットワークを構成し、将来に備えています。

（図 51）1980 年代には、お金を獲るときはこういう絵を必ず書くのだと思うのですが、こういう想像図が世界中に配られていました。それが今はこんな写真で、実物になっていますし、Google earth で見るとちゃんと確かにあるのだというのが分かります。Google earth で L 字を探すというのはなかなか楽しいのですけれども、このように、L 字がきちんと見えるようになっています。

（図 52）1990 年代から建設されていたものは第一世代と呼ばれています。これだとさきほどの中性子星連星の合体だと 1 個受けるのに大体数十年かかるだろうと考えられていま

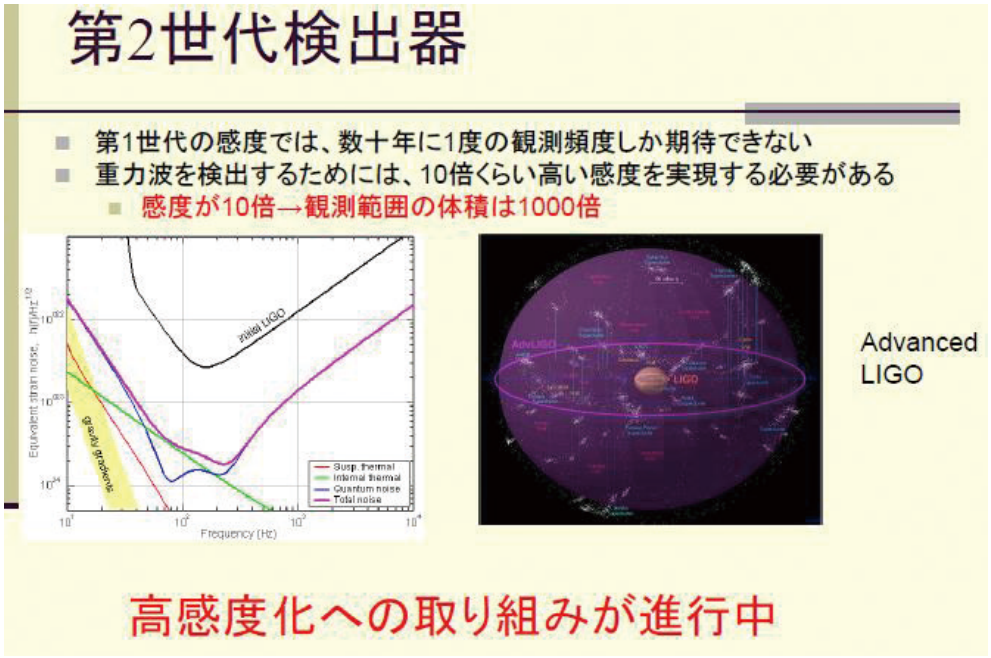


図 52

す。少なくとも感度を 10 倍くらい上げてやらないと、やはり天文学者の皆さんと話ができるところには行かない。10 倍というとたいしたことのないように見えるのですが、実際には距離は 10 倍伸びると観測可能な領域の体積が 1,000 倍増えるので、相手の数は 1,000 倍増えます。そうなのでそれを見てやると結構いろいろなものが見えるようになるはずだというのが、今第二世代の検出器と呼ばれているものです。この真ん中の円が最初に作られた LIGO 検出器で見えた領域で、この外側の円が今作っている装置でどこまで見えるかということを示しています。本当にこの感度までいくと、うまくすれば 1 ヶ月に 1 回くらい何か見えるのではないかという期待感があります。

（図 53）最近の話をちょっと調べてみたら、この夏にとうとう最初の観測実験をやったという事実が出ていました。ただもちろんフルの感度にはいっていないのですがさきほどの小さく書いた Initial LIGO という円のほぼ 4 倍のところまできたということです。2 台で動いているのもほぼ半分くらいの時間動いていて、80 メガパーセクくらいのところまでです。フル感度は 240 とか 300 メガパーセクとか言っていますので、まだまだなのです

図 53

けれども、なんか噂に聞くともうキャッチしたのではないかという話も聞こえてくるのですが、本当のところはよく分かりません。【註：この講演会の後、2016 年 2 月に LIGO は重力波の観測に成功したという発表をしました。なんと、この観測期間の開始直後の 2015 年 9 月 14 日のイベントで、なおかつ、中性子星連星ではなく、ブラックホール連星の合体の際に発生した重力波でした。】

（図 54）我々の KAGRA の話を最後にさせていただこうと思います。大まかには、今の話の通りなのですが、違うところは、まずとにかく地下に建設するということを目指しました。地下はとても静かなので、さきほどの原子核の 1,000 分の 1 とかを実現するのにはとても良い環境になっています。とにかくこういう絵を描いて、代表は梶田隆章先生で、今頃スウェーデンにいらっしゃっているのですけれども、是非またこちらでもスウェーデンに行っていただきたいなと思っているところです。入り口がこんなふうになっていまして、この 3 キロメートルのトンネルができていて、中に今こんな装置が作られているという状況になっています。

KAGRA 大型低温重力波望遠鏡 KAGRA
・アインシュタインが予言した重力の波、重力波を検出
・岐阜県神岡鉱山（地下）に3km干渉計
・原子核の大きさの1000分の1以下の変動を検出
・新しい天文学の窓を開ける
引用元:
blog-imgs-38.fc2.com
遥か彼方の天体から飛来
3km
3km
代表者：梶田隆章教授
57

図 54

KAGRA？
KAGRAは大型低温重力波望遠鏡（LCGT）の愛称
愛称公表式
愛称は
かぐら
KAGRA
と決定されました。
たくさんのご応募
ありがとうございました。
KAGRA
愛称公表式（2012年1月28日）
審査委員長は小川洋子氏
KAは神岡のKA, GRAはGravity やGravitational wave といった重力をイメージする言葉です。神様に奉納する踊りである「神楽」とのごろ合わせも少し意識しています(宇宙線研のホームページより)。

図 55

図 56

（図 55）KAGRA って何だって時々聞かれるのですけれど、これは元々、LCGT という名前で、大型低温重力波望遠鏡というものの愛称を募集し、ここに小川洋子さんという小説家の方なのですけれども、「博士の愛した数式」を書かれた方なのですが、その方が命名委員長になってこの名前を創ってくださいました。これは別に本当はちゃんとした意味ではないのだそうですが、一応 KA は神岡の「か（KA）」で、GRA は Gravity だとか、奉納する踊りの神楽と合わせたと書いてあったのですが、本当のところは何かの略ではないというのが正しい見解なのだそうですけれども。ぜひこういうものが、いろいろなところで名前を聞いた時に思い出していただければと思います。U が入っていないということだけご注意ください。

（図 56）去年、トンネルが完成したということで、2014 年 7 月に会見を行いました。中央に梶田隆章先生とその当時の総長の濱田純一先生がいらっしゃいます。

（図 57）その後、中のものもかなり出来たというので、今年 2015 年の 11 月に第一期工事の完了の式典がありました。式典には新しく総長になられた五神真先生にもご参加いただきました。今度はかなりいろいろな装置が入ってきていて、着々と検出への備えが進んでおります。

（図 58）大体 1 年間に 1 回以上重力波を受けたいということで、2017 年度観測開始を目指して頑張っていますので、まだちょっと、さきほどの 200 メガパーセクなんとかというところにはいかないのですけれども、100 メガパーセクくらいまでいけばこの目標が満たせるだろうという設計で進めています。

図 57

（図 59）いま第 2 世代の検出器として LIGO の advanced バージョンとかヨーロッパの advanced バージョンとか KAGRA とかが並んでいます。ET というのは第 3 世代で、さらに巨大で宇宙の果てまで見えてしまうのですけれども、今は当面ここを頑張るという話です。感度曲線というあまり詳しい話はできませんけれども少しずついろいろ各地の特色を生かして、観測可能なレンジとしては 200 メガパーセクくらいを超えるところを狙って今建設をしております。

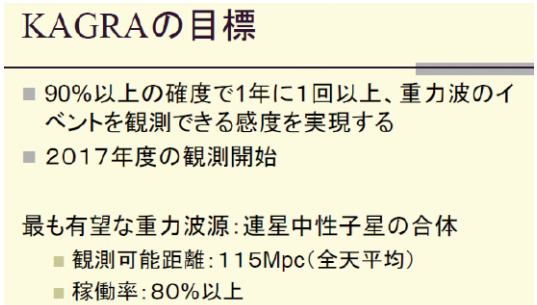


図 58

（図 60）こんな感じでスケジュールしていまして、2 段階に分けてイニシャルの KAGRA とベースラインの KAGRA という 2 段階のプロジェクトが進行していて、今ちょうどこの辺です。今 iKAGRA の最終段階

にきていて、干渉計を作って、真空度テストしてというところがちょうど今年度中に終わる予定です。2016 年度からは新しいプロジェクトに移行して、低温の鏡を入れたり、いろいろな新しいオプティクスを入れて何とかこの辺から観測を開始して検出したいなと、そういうところにきております。

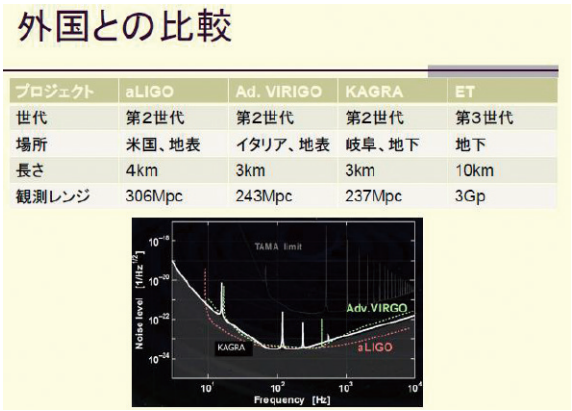


図 59

まとめ

（図 61）ちょうど時間になりました。とにかく 100 年経ったということなのですけれども、一般相対論というのは非常に多くの事実を 1 つの理論で説明しています。アジャスタ

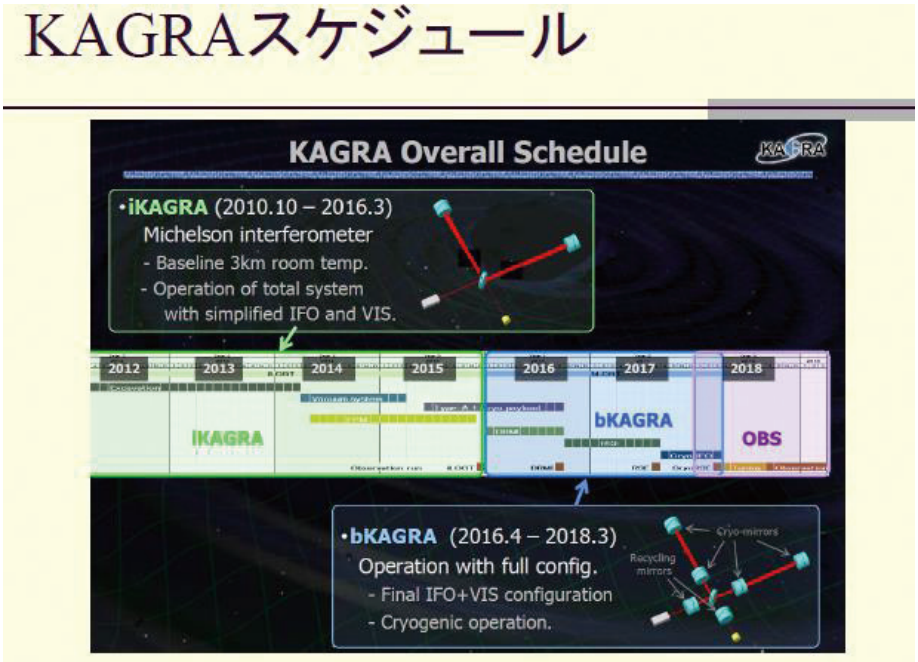


図 60

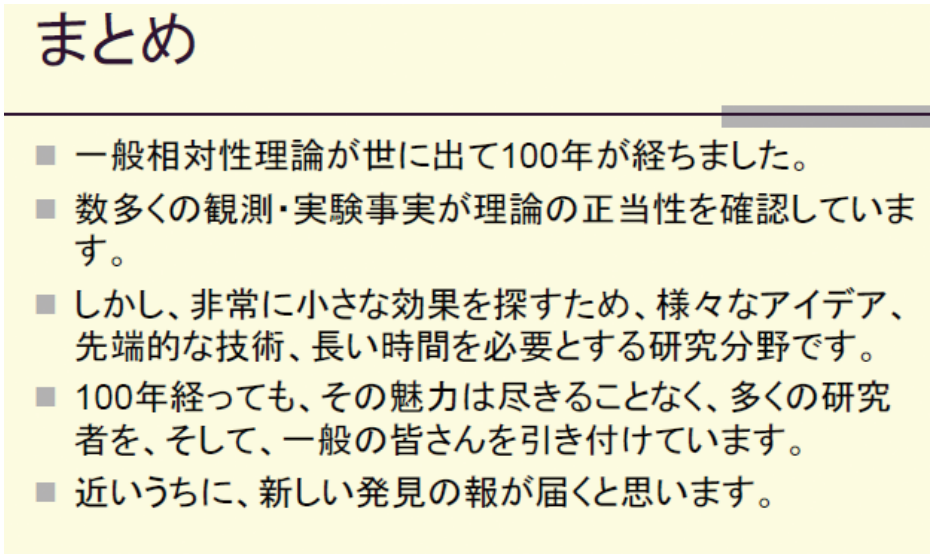


図 61

ブルなパラメーター、さきほどの宇宙項の 1 個だけですけれども、このパラメーターは、普通は、観測する立場からではなかなか得られにくい（宇宙論的なスケールで初めて現れる）ので、今回の話には出てきません。いま、お話ししたように、相対論の効果を観測するためには、ほんとに小さな効果を一生懸命探すという必要があります。いろいろなアイデアも要りますし、新しい技術も要りますし、それ以上になにしろ長い時間がかかる。21 世紀の実験と申し上げましたけれども、GPB も重力波も始まったのは 1960 年頃なので、もう 50 年も皆それを一生懸命やっていることになります。でも 100 年経ってもやはりなんか魅力のある分野であって、多くの研究者がそれに関わっていて、また、相対論というと一般の方も大変興味をもっていただける分野です。中にはちょっと違う方向で興味をもっていただいている方もいるのですけれども、でもやはり皆さんが興味をもってくださっているのは大変有難いことだと思っています。近いうちに必ず新しい一報が届けられるのではないかと思っています。どうもご静聴有難うございました。是非この分野を長い目で見守っていただければと思っています。

質疑応答

【司会者】三尾先生どうも有難うございました。一般相対論の非常に歴史的なところから

最新の非常に精度の高い実験の進展までをユーモアを交えて楽しいお話していただいてどうも有難うございました。

それではまだ時間がありますので、質問あるいはコメントとかございましたらどうぞお手を上げてください。ではどうぞ。

【質問者】さきほどの昔の話ですけれども、水星の近日点は、実は天文では 19 世紀からおかしいと分かっていたのです。というのは、どうも天文の人も皆、太陽系の惑星は離心率が小さくて丸い円に近いと。冥王星を追放するときに冥王星だけが特別だと言っていましたけれども、水星は冥王星と同じくらい離心率が大きいのですよね。だから近日点の動きがよく分かったのです。あれはアイシュタインの相対論ができる前からおかしいと分かっていて、いろいろな理屈がこねられていた。それからエディントンのは、太陽のそばの光の湾曲の答えが分かってからの実験で、あれはご存知のように日食の時と半年経ったときに同じ星がまた来る時の差を見たわけですね。その間に望遠鏡の焦点距離がどう変わるかというのは推定するのが非常に難しい。それであれは答えを合わせたのではないかという説まであったのですけれども、実際はその後、電波でクエーサーを昼間追いかけてクエーサーが太陽に隠れるのと、それから 1 時間後、2 時間後、それから前との区別を非常に正確に測ればあの値が出るということなので、むしろエディントンの日食の星の観測より電波の観測の方がいまは当になっていると思います。以上です。

【司会者】有難うございます。ついでに言っておきますと私が最近読んだものでは、アインシュタインは相対論を創る前は、天文学はいかに無駄に桁ばかり計算するものだと言って非常に不愉快に思ったらしいのですけれど、自分が水星の近日点移動を計算してぴったり合った時に天文学はなんて素晴らしいと言ったらしいです。

【三尾】久し振りにお話しすることになったので、調べ直したのですけれども、エディントンの話はいろいろな方が議論されているようで、おっしゃったとおりで答えに合わせたところもあるのかなというのは確かにあります。望遠鏡を 2 台持って行って、片方があまりちゃんと動いてないとか、そういういくつものこともあったのでしょう。

【司会者】メインの方が動かずサブの方でやったのですよね。ピーターコーズという人が

非常に面白いそれに関する彼の解釈を書いてあって中々面白い本があります。他にございませんでしょうか。それではちょうど時間ですので三尾先生どうも有難うございました。

それでは記念講演会はこれでお終いということにさせていただきます。皆さんどうも有難うございました。