

光の位相を考える

重力波検出干渉装置を例にとって

学生時代、レーザーの本を読む際、どうしても光の位相という概念がわからなかった。実のところ学位を取ってからあまりよくわからなかった。この10年ほど、レーザー干渉計を使った重力波の検出の仕事をして、なんとなくわかったような気がする。なのでその意義を考えてみたいと思う。

そもそも、日本語で「位相」という言葉のもつニュアンスがはっきりしない。中国語でも同様らしいが、日本語では、この言葉は日常でほとんど使われない。むしろ英語の phase のほうが使われるような気がする。例えば、このプロジェクトはもうすぐ次の phase にはいるとか、今の phase では、その可能性はうんぬんとか。これに対し英語の場合、phase なる単語は日常頻繁に使われる。例えば、月の満ち欠けは、“phases of the moon” という。つまり、新月に始まって満月を経て再び新月に戻る時間が月の公転の周期であり、地球から見た月の形が「位相」に相当するというわけである。波の位相に対応させれば、最初の半月が $\pi/2$ 、満月が π 、次の半月が $3\pi/2$ 、三日月が $\pi/4$ 、 $3\pi/4$... ということになる。重要なことは、この月の「位相」が、時間だけではなく月の位置によっても表現できることにある。つまり、月の形はまさしく「位相」なわけである。

本題の科学における位相の概念を重力波検出装置を例に考察してみよう。図1に、LIGO (Laser Inter-

ferometer for Gravitational-wave Observatory) プロジェクト¹⁾で使われている重力波検出用マイケルソン型干渉計の概念を示す。原理は一見簡単で、重力波が地球の近くにきた際、時空間がある方向に短くなり、それと垂直方向に長くなる（これがなぜかはそう簡単ではない。一般性相対性理論の本²⁾を本当に一生懸命読まないといけない。とりあえずテニスボールをぎゅっと握ったところを想像していただきたい。一方向につぶれてそれと直角方向に膨らむ様子が目に浮かぶことであろう）ことを使っている。この伸縮を時空間の歪みというが、これを干渉計の2つの腕の中を走る光の相対位相差で検出しようというわけである。つまり、時空の歪みがないときに両腕の長さを調節して、腕の端の反射鏡から戻ってくる光がビームスプリッターのところで互いに打ち消し合うように干渉する、つまりビームスプリッター裏側で観測される光の強度がゼロになるようにしておく。そして、いざ重力波が地球に来たときに、腕の長さの差に相当する光の相対位相差に応じた強度を観測しようというわけである。原理を述べるのは簡単であるが、期待される重力波の信号はきわめて小さく（歪みに換算して 10^{-21} 以下¹⁾）、その検出は容易ではない。また、後で述べるように、なぜ光の位相を使うかを本質的に理解するのもそう簡単ではない。

地上で観測しうる重力波の生成源はこれまでにいくつか提唱されているが¹⁾、早い話、宇宙で巨大な重量の物体が運動すると、それに起因する空間の歪みが、横波として宇宙空間を伝搬するわけである。重力と時空の歪みの関係をアインシュタインの等価原理に基づいてちょっとだけ考察してみよう。まず、等価原理について、かの有名な宇宙船内の仮想実験³⁾を使って復習しておく。ある科学者が、宇宙空間を一定速度で上昇している宇宙船で、天井からつるされ端に錘をとりつけられたバネの伸びを毎日定時に測定している（図2）。当然科学者は、毎日同じ値を測定しそれを記録している。ある日、船長がエンジンの燃料を増した。その結果、宇宙船は上方に加速度をもち、バネの伸びは通常より大きな値

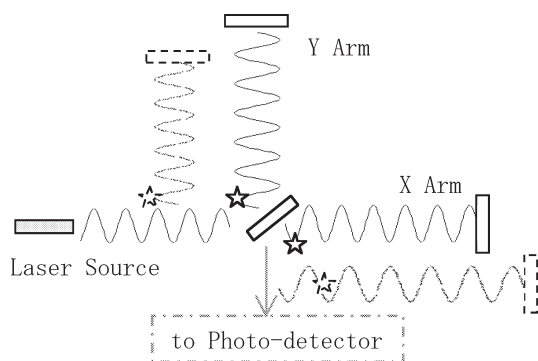


図1 重力波検出干渉計の原理。実線（破線）は、両腕の重力場強度が同じ（異なる）場合を概念的に表す。☆印は、両腕の光路を戻ってきた光が互いに干渉する位相を表す。

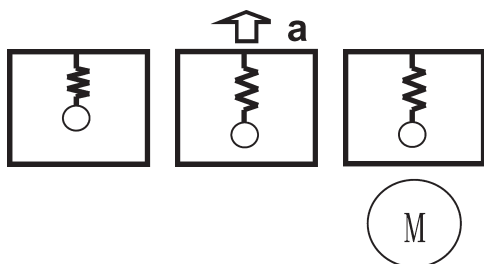


図2 重力または加速度によって伸びるバネ。(左) 加速度も重力もない。(中) 宇宙船が上に加速度をもつ。(右) 宇宙船の下に巨大な惑星M.

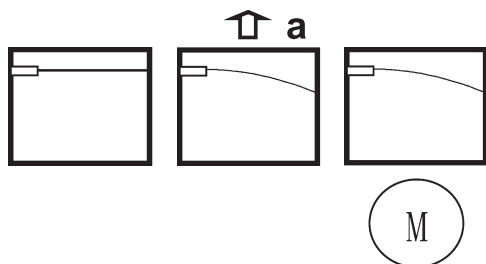


図3 重力または加速度によって曲がる光路。Mは、巨大な惑星。

を示した。科学者は、この予想された結果に満足し、その通常より大きな測定結果を実験ノートに記録した。何日か後、今度は宇宙船が明らかに停止しているときに、科学者はバネの伸びが通常より大きいことに気がつき、困惑する。つまり、宇宙船の加速度がゼロであるにもかかわらず、錘のバネの平衡位置に対する相対位置が変化しているわけである。このとき、船長が宇宙船の下に巨大な惑星を発見し科学者に報告する。そこで科学者は、「加速度と重力は等価である」と結論せざるを得ないことを発見する。次にこの科学者は、別の実験を開始する。それは、宇宙船の左の壁にレーザー光源を垂直に固定し反対側の壁で、そのレーザー光の当たる位置を記録するといったものである(図3)。以前の実験と同様、宇宙船が加速度をもたない日には、毎日同じ位置が記録される。また、宇宙船が上に加速度をもつときには、レーザー光の当たる位置が下方に移動する。「ところで、」科学者は考える。「以前バネの実験で得られた結論によれば、加速度と重力は等価であるから、今この宇宙船の下に巨大な質量の惑星

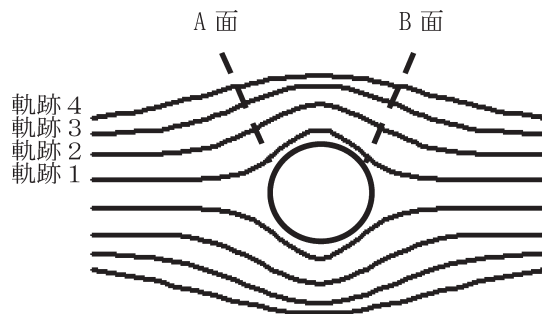


図4 異なった重力場を通過する共通の光源から発せられた光波の軌跡。A、B面は、一定位相の面(波面)を表す。

が来たら、たとえ宇宙船が静止していてもレーザー光線は下に曲げられねばならない。」つまり、光は重力場の下では、直進しない。これは、あの有名なA. Eddington⁴⁾による1919年の皆既日食における星の位置の観測結果、つまり太陽の重力場で光がアインシュタインの予想とおりに曲がるという実験結果により証明された。

次に、巨大な質量の惑星の近くを飛ぶ光線の軌跡を考察しよう。この光波は何らかの光源(たとえばナトリウムのある遷移による発光源)から発せられている。当然、惑星に近いほど重力は強いはずだから、光線の軌跡は、図4に示すようになるであろう。ここで、軌跡上の2点で波面、つまり位相一定の面を考え、図のA面とB面で表現する。明らかに惑星に近いほど軌跡上のAB面間の距離は短い。仮に、光が左から右へ伝搬し、この位相面間が波長 N 個分(N :整数)に対応する、つまり光波のある谷がA面にある瞬間に N 波数先の谷がB面にあるとしよう。すると、軌跡1(図4で惑星に最も近い軌跡)にも、軌跡4(最も遠い軌跡)にも N 個の波数が描かれることになる。当然、軌跡4の N 波数分の長さは軌跡1のそれより長いわけだから、軌跡4のほうが長波長といわざるを得ない。次に時間の進み方を両軌跡で比較しよう。光波が、重力場で場の強いほうに曲げられるということは、光子が重力場からエネルギーを受ける、つまり重力場のポテンシャルエネルギーが光子の運動量の増加に寄与するということである⁵⁾。光子のエネルギーは

プランク定数と周波数の積だから、惑星に近いほど周波数が高いことになる。つまり、惑星に近いほど振動の周期が短く観測されるわけである。(たとえば、軌跡1にいる人は、このナトリウムの遷移による発光の振動数を5と読むのに対し軌跡4の人は4と読む、あるいは、その振動周期を軌跡1の人は $1/5=0.2$ 、軌跡4の人は $1/4=0.25$ と読む。いいかえると軌跡4の人の時計は軌跡1に対して進むことになる。)これらの考察をまとめると、同じ遷移に起因する電磁波を観測したとき、強い重力場のもとではその波長および周期が短く、弱い重力場のもとでは長く記録されることになる。

ここで本題の重力波検出干渉計に戻って、この重力場の強度による時空の伸縮の計測について考えよう。いま、 X Armの一部の重力場強度が通常より小さく、 Y Armの一部が大きいたとしよう(図1)。すると、上のパラグラフで述べた原理により、 X Armの端の鏡で反射されてきた光はビームスプリッターのところに戻って来る際、 Y Armのそれに比べて、より少ない振動を経験してくることになる。つまり、ビームスプリッターのところでの累積の波数を勘定するならば(ビームスプリッターのところである参照時刻から累積何個の波数が到着したかというふうに)、 X Armのほうが Y Armより少ない波数が計上される。したがって、当初(両腕に重力強度の差がないとき)の干渉条件が崩れ、ビームスプリッターの裏側で干渉縞が観測されるわけである。ここで重要なことは、ビームスプリッターのところで周波数計や波長計を使って両腕の光を比べたところで、(その測定はビームスプリッターのところでの重力場強度によるわけであるから)答えは同じになることである。つまり時空の歪みは、光の波長でも周波数でもなく、累積の波数差、すなわち位相差によってのみ検出できるわけである。

以上述べてきたことをまとめると次のようになる。光の位相は、光波が経験してきた振動の累積を周期 2π の関数として表現する量である。ある特定の原子遷移による発光が与えられたとき、その振動数や波長は、それを計測しようとする系の時空の座

標に依存する。したがって、重力波計測のように、異なる重力場の影響による時空間そのものの変動を相対的に検出しようとする際、対応する振動数や波長の差を共通の座標系で測定することは原理的に不可能である。これに対し、位相を使えば、同じ座標系のベース(つまりビームスプリッターの置かれた時空上の座標点)でその差を検出することができる。そして、干渉計というすばらしい装置を使うことにより、位相差を光の強度変化に変換でき、さらにテクノロジーを駆使することによって、重力波の影響による時空の変動を歪みに換算して 10^{-21} (すなわち、位相変化としては 2π の 10^{21} 分の1)レベルの感度で測定することも可能となる¹⁾。他の波動現象(たとえば音波)を使っても同様の議論がなされる。しかしながら、光子だけが重力のみの影響を受けることを考えると、重力波検出にあたっては光波を使うことが本質的に意味をもつ。まさに光のもつ神秘性を感じるところである。

最後に、この原稿を記すにあたり、Malik Rakhmanov 博士(Penn State University)と多くの議論をし、貴重な助言ならびに指摘を受けたことを感謝する。LIGOプロジェクトの詳細および現状をお知りになりたい方には、<http://www.ligo.caltech.edu/>を参照されることをお勧めする。また、私の解釈に誤りがあった場合は、すぐご連絡いただきたく願います(E-mail: syoshida@selu.edu)。

文 献

- 1) B. C. Barrish and R. Weiss: "LIGO and the detection of gravitational waves," *Phys. Today* **52** (1999) 44-50.
- 2) 例えば I. R. Kenyon: *General Relativity*. (Oxford University Press, New York, 1990).
- 3) H. Kondo: *Adventures in Space and Time: The Story of Relativity*. (Holiday House Inc., 1966). (杉本賢治訳 "相対性理論の話—空間と時間への挑戦—", 東京図書, 1976).
- 4) A. S. Eddington: *Space, Time and Gravitation: An Outline of the General Relativity Theory*. (Cambridge University Press, Cambridge, 1987).
- 5) A. Einstein: "On the influence of gravitation on the propagation of light," *Annal. Physik*, **35** (1911) 898-908.