

●●●●あの論争は…いま？ (6) ●●●●

VLBI で重力速度を測れたのか？

Was the Speed of Gravity Measured by VLBI?

浅田 秀樹

〈弘前大学理工学部 〒036-8561 青森県弘前市文京町3〉

e-mail: asada@phys.hirosaki-u.ac.jp

論争の種: VLBI を用いた重力の速度の測定

論争のはじまり: 2002 年から現在まで

主な対立説: 測定した, 測定できなかった

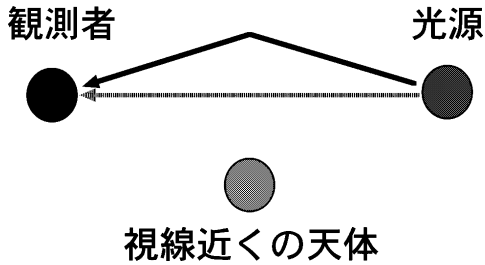
現在有力な説: 測定できなかった

こんな論争を聞いたことがないぞ, という方が結構おられるはずだ. それもそのはず, 直接の当事者は, 日本で筆者だけだからである. 当然, 日本の学会・研究会などで, 両陣営が論争するシーンは全く見られなかった. 2003 年正月早々, 1 通のメールに筆者はたいへん驚いた. そのメールは, 雑誌記者からのものであった. シアトルで開催されたアメリカ天文学会において, Kopeikin 氏と Fomalont 氏は世界で初めて重力の伝播速度 (c_g と記す) を測定したという内容の講演, そしてそれに関するプレスリリースを出し記者向けの発表を行った. その記者は, 「あなたは測れないと以前に反対していたので, それを説明してほしい」と依頼してきたのだった. ちなみに, 金曜にきたそのメールでは, 自分は週末休みなので, 月曜に回答してほしいという“勝手な”期日が指定されていた. 仕方なく, 筆者は週末に回答を拙い英語で作成した. 当時, 彼らのプレスリリースは相当インパクトがあったらしく, *Nature* や *Science* などの科学誌だけでなく, CNN や NY Times も取り上げたほどだ^{1), 2)}.

通常の物理学の枠組みでは, 光速 c は, 少なくとも四つの場面で登場する. 電磁波の伝播速

度, 特殊相対論におけるローレンツ変換 (光円錐の傾き), 重力波の伝播速度, 重力の円錐 (因果律) の傾きである. これらは一般には異なる可能性がある. 例えば, 超弦理論からのスカラー・テンソル理論やブレーンシナリオは通常的一般相対論からのずれを予言する. 重力の速度を測定して光速と異なることを示せば, ノーベル賞級の大発見である. ちなみに, ニュートン重力においては, c_g は無限大とみなされ, 古くは 1805 年, ラプラスがそれまでの観測精度の範囲で月の運動から $7 \times 10^6 c$ の下限を与えた.

筆者の結論に行く前に, まず, 「電波を用いた観測である VLBI で重力の速度を測る」ことを説明しよう. VLBI は長基線の電波干渉計のことで, 例えば, アメリカの VLBA, そして, 日本の VERA がある. 遠くの電波源としてクェーサーを考える. 一見, 電波観測なので重力と無関係に思える. クェーサー方向近くに天体がある場合, 一般相対論的效果が重要となる. 重力は時空のひずみとして表現され, そのゆがんだ時空中では, 光の大域的な軌道は直線からずれ, 「重力レンズ」と呼ばれる (図 1). 時空のひずみが, クェーサーからの電波にわずかな影響を引き起こすのだ. さ



視線近くの天体

図1 重力レンズ.

に、光源から観測者までの光（電波も）の経過時間は、時空が平坦な場合よりも遅れることが知られており、発見者にちなみ、「シャピロの時間の遅れ」と呼ばれる³⁾。

1919年、エディントンたちは太陽そばをかすめる星からの光を観測し、太陽重力による重力レンズ効果を初めて検出した。現在では、「重力レンズ」は天文研究にもはや欠かせないものとなっている。一方、「シャピロの時間の遅れ」は、1970年代に始まったNASAの衛星を用いた太陽系探査と関連していた。衛星軌道のレーダートラッキングにおける到着時間の遅れの測定がなされた。そして、実際、太陽重力による「シャピロの時間の遅れ」が検出された。これらのテストをパスして、一般相対論は正しい重力理論とみなされるようになってきた。

干渉計であるVLBIの場合、天体の方向は信号の到着時刻の差で決められることに注意しよう（図2）。太陽の場合、重力レンズによる曲がり角は最大で1秒角のオーダーで、木星の場合、その千分の1、つまり、1ミリ秒角のオーダーとなり、VLBIを用いて測定可能となる。

木星の公転周期は約12年だから、数時間の観測では、木星とクエーサーの相対運動は直線軌道をなすはずだ。しかし、重力レンズによる見かけ上のクエーサーの像の位置の余分なずれが、測定されたのであった⁴⁾。最近の観測技術の進歩を考慮して、Kopeikin氏はシャピロの時間の遅れを以下のように再考察したのだ⁵⁾。

木星は約10 km/s の速度 v で太陽に対して動

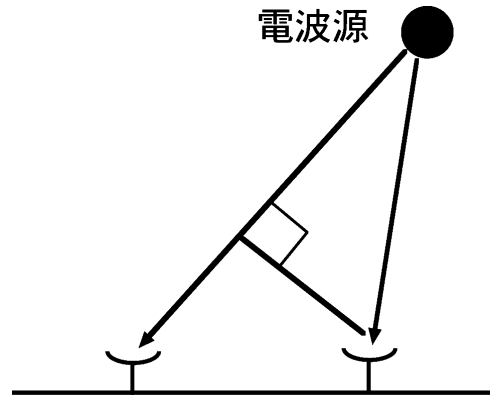


図2 VLBI.

いている。つまり、木星による重力場は「時間変動」する。この時間変動する重力場中での時間の遅れを彼は調べたのであった。ニュートン重力は瞬間に遠隔伝播するが、一般相対論での重力では、重力源の運動の情報が遠方に伝わるには時間がかかる。このときの速度を「重力の伝播速度」と呼ぶ。これは、ちょうど電磁場の場合に類似である。その議論では、遅延時間 $u = t - r/c$ が登場する。ただし、 r は源からの距離を表す。重力の場合、 $u = t - r/c_g$ としてよいだろう。一般相対論では、光速 c しか現れず、「 $c_g = c$ 」となる。彼の計算結果によると、木星の質量による効果に対する速度比「 v/c_g 」の補正項が現れる。（詳細は省くが）小さな値が分母にくるため、補正項は数十マイクロ秒角となり、進歩したVLBIの手の届く範囲に入る。もし測定できれば、「世界初の重力速度の測定」となる。事実、2002年9月にあるクエーサー方向に木星が接近するので、測定可能となる。以上が、彼の主張のあらましである⁵⁾。

時空のひずみの時間変動が伝わるものを、「重力波」と呼ぶ。ハルスとテラーは、初めて連星パルサーを発見した。この重力波放射によってエネルギー・角運動量が運び去られる結果、軌道半径の収縮に伴い公転周期が減少することがその後実証された。この画期的な発見に対して、1993年、彼らはノーベル物理学賞を受賞した。そし

て、重力波の直接検出を目指して、LIGO (米)、VIRGO (仏伊)、GEO600 (独英)、TAMA300 (日) が、検出感度の向上への努力を払いつつ観測を開始している。本来なら、こうした重力波観測によって初めて、「重力の伝播速度」が測られるものと信じられている。果たして彼の予言は正しかったのか？ 否定する見解を著したのが、わずか2頁の筆者の論文である⁹⁾。その要旨は以下のとおりである。

(1) 孤立した源から遠く（正確には「波動帯」と呼ばれる領域）にいけば、波は遅延時間 $u = t - r/c$ に依存する。木星の速度 v は光速に比べてはるかに小さいので、 v/c で遅延時間をテーラー展開することが可能である。電磁気学の場合、全電荷は保存するから、時間変動は双極場から登場する。一方、重力の場合、四重極場から時間変動を始める。一般相対論を含むまともな重力理論の場合、質量は正しくないので、重心を取ると双極場は必ず消せるからである。このことは、一般相対論における重力場の遅延展開は、 v/c の2次以上になることを意味している。つまり、 v/c の1次を期待する Kopeikin 氏の主張は、オーダー勘定の段階でおかしいのである。(2) 一体の球対称重力場はシュバルツシルト解と呼ばれ、重力速度が全く入らない、それをを用いた計算でも、観測者の運動を考慮すれば Kopeikin 氏の補正項が出てくる。だから、「光速」しか入らないのである。

筆者の論文は *ApJ Letters* にすぐに掲載された。観測のふた月前のことである。実は、astro-ph に投稿直後、Kopeikin 氏から反論のメールが届き、数回議論を繰り返したが結局、彼は納得しなかった。数カ月経ちすっかり忘れていたが正月休み明けの一通のメールで筆者は論争の渦中に引き戻されることになったのである。無名の研究者の見解はとかく軽視されがちであるが、*Science* 誌は筆者の論文を反論として取り上げてくれた²⁾。ニュース報道の後、重力速度の測定を否定する論文が次々出てきた^{7), 8)}。結局、観測の論文は出版

されたが⁹⁾、肯定側の論文は彼自身のものだけであった¹⁰⁾。この頃には、コミュニティでの大勢は決まったと言える。なお、プレスリリース以前に批判したのは私の論文だけである。

筆者の見解では、ハルス・テーラーの連星パルサーの公転周期の減少は、いわゆる「四重極公式」で説明されており、その公式を通して c_g は間接的にはあるがすでに測定されている（光速と大差ない）。 c_g の直接測定を含めた相対論的重力の解明は、大型重力波検出器を用いた今後の観測に期待したい。

それでは、この論争で何も生まれなかったのか？ 筆者はそうは思わない。まず観測面では、数十マイクロ秒角の測定が実際に VLBI で可能になったことが挙げられる。星の固有運動の測定精度が向上するなど、天文学の大きな前進が楽しみである。重力に関する研究面では、重力の伝播に関して精密な研究をする動機を与えた^{11), 12)}。新展開が今後期待できるかもしれない。

最後になりましたが、有益なコメントをいただいた方々に感謝いたします。論争の最近の状況を詳しくお知りになりたい方は、物理学の雑誌上のディープな“特集”をご覧ください¹³⁾。

参考文献

- 1) Brumfiel G., 2003, “Gravity experiment sparks spat between physicists,” *Nature* 421, 198
- 2) Irion R., 2003, “Confirmation of Gravity’s Speed? Not So Fast,” *Science* 299, 323
- 3) Shapiro I. I., 1964, *Phys. Rev. Lett.* 13, 789
- 4) Treuhaft R., Lowe S., 1991, *AJ* 102, 1879
- 5) Kopeikin S., 2001, *ApJ* 556, L1
- 6) Asada H., 2002, *ApJ* 574, L69
- 7) Will C., 2003, *ApJ* 590, 683
- 8) Samuel S., 2003, *Phys. Rev. Lett.* 90, 231101
- 9) Fomalont E., Kopeikin S., 2003, *ApJ* 598, 704
- 10) Kopeikin S., 2003, *Phys. Lett. A* 312, 147
- 11) Carlip S., 2004, *Class. Quant. Grav.* 21, 3803
- 12) Ellis G., Uzan J., 2005, *Am. J. Phys.* 73, 240
- 13) Asada H., 2006, *Int. J. Mod. Phys. D* 15, 289; Carlip S., 2006, *Int. J. Mod. Phys. D* 15, 291; Kopeikin S., 2006, *Int. J. Mod. Phys. D* 15, 273