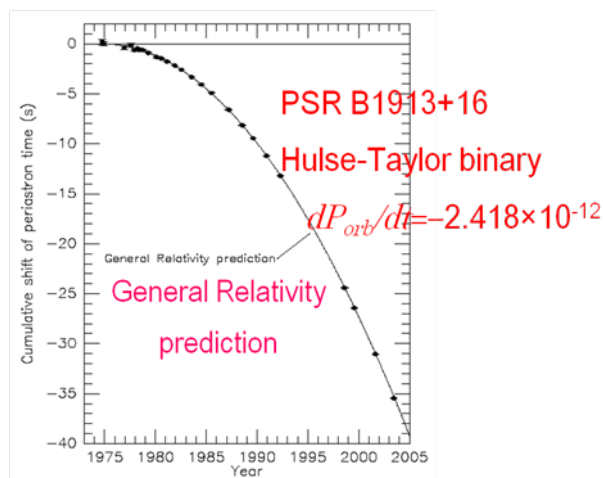


# スペース重力波干渉計に向けて

田中貴浩 (天体核⇒基研)

重力波は時空のさざ波です。重力波は未だに直接は観測されていませんが、間接的にはその存在が証明されています。宇宙には磁場を持ち回転しているコンパクトな天体でパルス状の電波を放出する天体、パルサーが存在しています。これは中性子の縮退圧で支えられた太陽質量程度の星で中性子星と呼ばれるものの一種です。パルサーはその大きな慣性のおかげで非常に精度の高い時計のように振る舞います。この精密な時計を用いてドップラーシフトによるパルス間隔の変化を観測することによって、連星の質量や軌道パラメータが決定されます。したがって、パルサーを含む連星は一般相対論の非常によい検証実験場となります。Hulse と Taylor によって発見された最初のパルサー連星である PSR1913+16 では30年を超える長年の観測からその軌道周期の時間変化が正確に観測されています。軌道周期は重力波放出によるエネルギーロスによる軌道の反作用として一般相対論によって予言される割合いで、まさに変化していることが確かめられました。



J.M. Weisberg and J.H. Taylor, astro-ph/0407149.

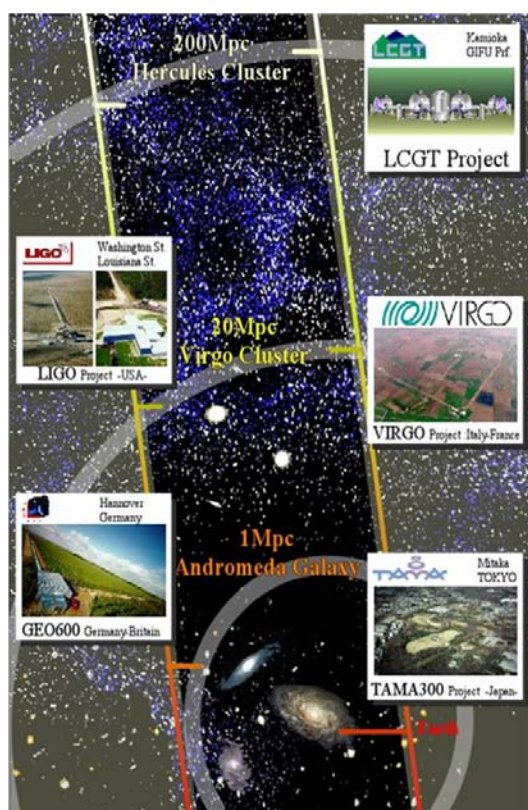
重力波の放射の機構は電磁波の放射とほぼ同じです。しかし、電磁波は双極放射からはじまりますが、重力波の源である物質のエネルギー分布の双極子成分は運動量の保存則から時間変化しません。したがって、重力波の放射としては質量の四重極モーメントの時間変化が最初になります。電磁波の放射との類推から容易に推測できるように、早く運動して質量の重い源からは大きな振幅の重力波が放出

されます。重力波が通り過ぎるときには自由に運動している質点間の距離が変化します。重力波の観測ではこの微小な距離の変化をとらえるということになります。重力波の観測はどのような物理をもたらすのでしょうか。なぜ、重力波なのでしょう。まず、一番目に来るのはそもそも重力波が直接観測されていないという点が重要です。重力波は本当に予想通りに伝播してくるのでしょうか。つまり、一般相対論は正しいのかという疑問です。太陽系内では様々な一般相対論の精密な検証実験がおこなわれてきましたが、強い重力場における検証はありません。Hulse-Taylor の連星といえども軌道周期は(皆さんご存じの数字だと思いますが) 7.752 時間です。この連星が合体する直前の軌道周期は

1msec 程度になりますから、Hulse-Taylor の連星の観測はそれほど強い重力場を見ていることにはなっていないことが理解していただけると思います。直接観測にかかるような重力波というのはまさに合体直前、直後の連星から放出されるものです。

次に、ニュートリノの観測にも似た側面がありますが、重力の相互作用が非常に弱いという点が光学の天体観測と大きく異なる点です。通常の光学での観測では高密度天体の内部で起こっていることはなかなか見えてきません。超新星爆発や中性子星の合体などを考える場合、中心付近からやってくる光は必ず散乱されて直接に見ることができません。この点重力波はあらゆるものを透過してやってきますから、中心付近で起こっていることをとらえることが可能です。あるいは、初期宇宙を考えても同様です。光学観測では宇宙の晴れ上がり以前を見通すことはできません。それに対してインフレーション中やインフレーション直後のリヒーティングの時期に生成されたような初期宇宙起源の重力波も我々に届いているはずで

す。3つ目に強調したい点は、放射機構が理論的によく理解されている天体現象があるということです。これは中性子星やブラックホールのようなコンパクト星からなる連星の合体を起源とする重力波です。重力波の放射はほぼ等方的で途中で吸収や散乱をされることもないと考えられていますから、このような連星系の合体のイベントレートは原理的に観測から曖昧さなしに決定できます。したがって、銀河中心ブラックホールの合体進化や、連星中性子星の赤方偏移分布等が重力波観測によって精密に決まってくるということになります。



このような中、重力波の直接観測を目指した重力波レーザー干渉計が各地に建設されています。現在世界最高感度を達成しているのはアーム長が 4km で2台の独立な干渉計を擁するアメリカの LIGO 計画で、現在中性子星連星をとらえることができる最大の距離が乙女座銀河群に届きかかっているという状況です。この計画は、次にエンハンスドフェーズへと進み、さらに最終的には1ケタ以上感度を向上させたアドバンスド LIGO と呼ばれるフェーズまで進めるおよそ\$200M の予算措置が今年決定しました。アドバンスドフェーズになると、300Mpc 程度までの中性子星連星をとらえることが可能になり、少なくとも年間数回のイベントが観測されると予測されています。ヨーロッパではフランスとイタリアによるアーム長 3km の VIRGO 計画が LIGO 計画を追いかけ

ています。まだ、感度の点では LIGO にわずかに劣っていますが、第一段階としてはほぼ目標感度を達成しています。さらにイギリスとドイツによるアーム長 600m の GEO600 があります。日本では、干渉計のアーム長が 300m の三鷹の天文台敷地内に建設された TAMA300 と、低温ミラーの技術実証を行う目的で神岡鉱山に建設されたアーム長 100m の CLIO の 2 台があります。これらの干渉計によって技術を確立し、LCGT 計画と呼ばれるアーム長 3km の干渉計を神岡鉱山に建設しアドバンスド LIGO と肩を並べる感度を達成しようと努力が続いています。

多数のレーザー干渉計が全世界に作られています、独立な干渉計が多数存在することには全く無駄がありません。まず、微弱な重力波信号を確実に検出したと主張するには複数の干渉計による同時検出が必須です。そのために国際協力によるシグナルのコインシデンス解析が行われています。さらに、重力波には 2 つの独立な偏極成分がありますが一台の干渉計では一方の偏極しかとらえることができません。また、重力波のやってくる方向を調べるためには異なる干渉計における重力波の到来時刻の差を用います。到来時刻の差は干渉計間の距離が近いとほとんどあられわれませんから、地球規模で広く干渉計が分布していることが重要です。また、原理的にも到来方向を完全に決定するには最低 4 台の干渉計が必要です。

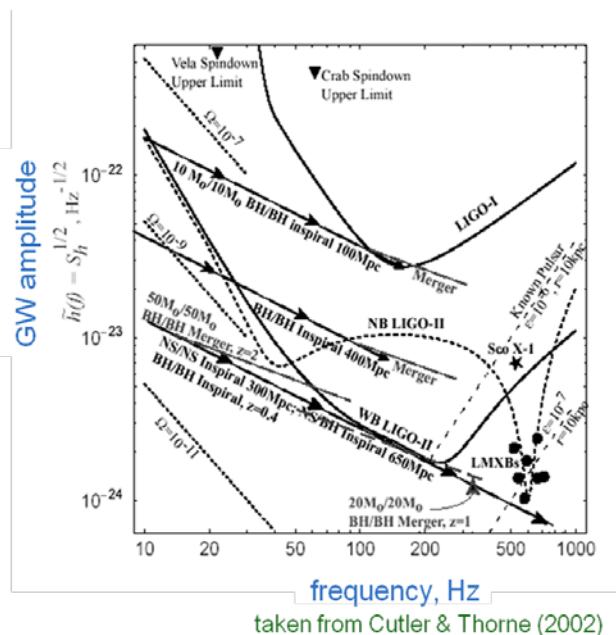
このような中で地上の重力波干渉計による直接観測が天体観測上意味をもつ制限になる例が出始めています。Short  $\gamma$ -線バーストは  $\gamma$ -線バーストの中でもバーストの期間が短いもので、long  $\gamma$ -線バーストとは別の起源である可能性が高いです。Long  $\gamma$ -線バーストには超新星が付随して起こる場合が観測され、星の最後のフェーズで起こった爆発現象を見ていると思われています。一方で、short  $\gamma$ -線バーストの有力な起源のひとつに中性子星連星の合体が挙げられます。2007 年に起こった  $\gamma$ -線バースト GRB070201 は short  $\gamma$ -線バーストか soft  $\gamma$ -線リピーターと呼ばれる別の種類のものかもしれないと考えられています。このバーストは M31(アンドロメダ銀河)で起こったようにみえます。このバーストが起こったとき、LIGO が重力波の観測をおこなっていました。このバーストが M31 で起こった short  $\gamma$ -線バーストで、中性子星連星の合体に起因するものであったならば LIGO で重力波が検出されたはずだということになります。解析の結果、このイベントは M31 で起こった中性子星連星の合体ではないということが結論され、観測上意味をもつ制限を与えた最初の例となりました。

重力波のソースとして、連星系の合体は重力波波形が理論的に予測でき、ノイズと区別しやすいため、まず第一のターゲットと考えられています。この他にも光学観測での対応物が観測可能な場合、比較的検出が容易になります。パルサーのように周期的な運動をするものからは、その振動数に対応した周期的な重力波がやってくるのが期待されます。その振幅は星の非一様性の程度によりますが、将来的には十分に観測される可能性があります。また、突発的な天体現象として超新星爆発や  $\gamma$ -線バーストのような現象では球対称性が破れて十分な振幅の重力波を放出する可能性が極めて高いと思われれます。このような

天体現象に起因する重力波の波形を高い信頼性で予言することは理論として非常にチャレンジングな問題ではありますが、

しかし、その到来時刻と到来方向が予測されることから、波形の予測が不正確であっても検出が可能であると期待されます。

さて、もっとも重要な重力波源のひとつと考えられている連星系ですが、そのイベントレートについての研究も進んでいます。色々な方法でレートが評価されていますが、ひとつは直接に観測されている連星パルサーを用いる方法です。この方法では近傍の宇宙年齢以内に合体するような近接連星が重要な役割を果たします。寿命  $\tau$  で合体する連星がパルサーの観測から(実際、



我々の銀河内の一部に限られる観測可能域内で)見つかり、我々の銀河程度の大きさの銀河一個あたりに連星系の合体がおこるレートはおおよそ(我々の銀河の体積)/( $\tau \times$ パルサーが観測できる最大の体積)と評価されます。銀河内の星の分布などをモデル化したより詳しい解析でもこの大雑把な評価とそれほど変わらず、先に紹介したようにアドバンスド LIGO において少なくとも年間に数個、おおければ、数百の連星系の合体が観測されると見積もられています。この見積もりは、星の進化のシナリオにもとづいた理論的予想とも矛盾しません。

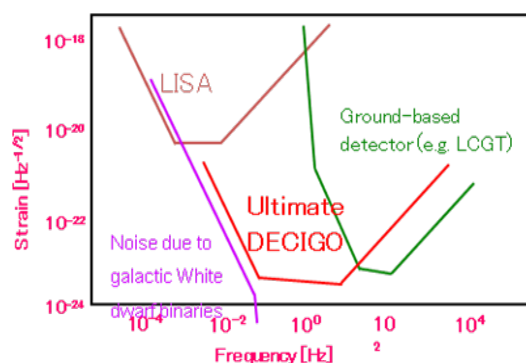
連星系の合体レートに関して最近の話題としては我々の銀河系外にある近傍の銀河群に属する IC10X-1 という X 線で観測されている連星系があります。この連星系の一方の星は太陽質量の 23 倍のブラックホール候補天体で、そのブラックホール候補天体にガスを降り注いでいるのは太陽質量の 35 倍のヘリウム星だと考えられています。このヘリウム星を星の進化のシナリオにしたがって考えるとブラックホールへと進化してブラックホール連星を形成し、長くても今から 30 億年以内に合体すると評価されるという話です。この話が正しいとして、上述のような合体レートの評価をこの天体に当てはめると、この連星が比較的近くにあるため合体レートは現在の LIGO の感度であっても 2 年に 1 回程度になると評価されます。中性子星連星の検出レートと比べても非常に高いレートになるのは、質量の大きなブラックホール同士の合体では中性子星連星の合体よりも放出される重力波の振幅が非常に大きいために遠くの合体イベントまで観測可能であるという事情が効いています。

次に、本題の宇宙重力波干渉計の話に移りましょう。宇宙に干渉計を持っていくことの最大のメリットは長いアーム長を心おきなくとれるということと、地面の振動に悩まされ



なくてすむということにあります。干渉計の光を折り返す鏡の位置に関するゆらぎを  $\delta L$  として、アーム長を  $L$  とすると重力波の感度は  $\delta L/L$  で決まります。したがって、 $L$  が長い方が高い感度を実現する上で有利になります。アーム長が長いと、より低い振動数の重力波をターゲットにすることが可能です。重力波の振動数が低いということ、つまり波長が長いということは主な重力波源が銀河中心核超巨大ブラックホールのようなより大きな天体であるということの意味しています。し

たがって、重力波の振幅も大きくその分でも検出には有利になります。宇宙に重力波干渉計を打ち上げる計画の中でもっとも実現に近づいていると考えられているのが LISA 計画です。LISA は太陽周回軌道に3台の衛星を投入し、ほぼ正三角形を保つように編隊飛行をします。それぞれの衛星の中に衛星と接触せずにプローブ質量を浮か



ばせた状態に保ち、このプローブ質量間の距離をレーザーを使って測るということを行います。プローブ質量にはたらく外乱は衛星によって遮蔽されます。LISA の技術実証のための衛星 LISA pathfinder が 2010 年に打ち上げられる予定となっています。さらに野心的な計画として DECIGO という計画が発案されています。これは、LISA と地上の重力波レーザー干渉計の間の周波数帯を宇宙から狙う計画で瀬戸、川村、中村によってその有用性が指摘されました。0.1Hz 以下では大量に存在していると考えられる白色矮星の連星からくる重力波がノイズになってしまうため、精度の高い観測は原理的に難しいとかがえられます。しかし、白色矮星はサイズが比較的大きいため 0.1Hz 以上の振動数への白色矮星の連星の寄与は小さいとかがえられます。したがって、0.1~1Hz の周波数帯は超高精度な重力波観測をおこなうことのできる可能性を秘めた周波数帯であるということができます。

宇宙重力波干渉計 LISA のターゲットとなる重力波源としては、まず確実に存在している我々の銀河内にある白色矮星の連星、銀河中心核にあると思われる巨大ブラックホールの合体や形成時に放出される重力波などがあります。それに対して DECIGO では周波数が高いため白色矮星からの重力波は主なターゲットにはなりません。代わりに、初期宇宙起源の背景重力波を観測できる可能性があります。加えて、通常の中性子星連星の合体一年前くらいに放出される重力波がちょうど観測帯域に入ってきます。DECIGO のユニークな点は白色矮星によるノイズを逃れているというだけではなく、他の周波数帯にない高い角度分解能を持ちえるという点にあります。重力波の到来方向は基本的には2台以上の干渉計の重力波到来時刻の差によって決まります。(実は、きちんとやると特に宇宙重力波干渉計では公転運動によるドップラー効果や干渉計の向きの時間変化による振幅の変化なども重要です。) 地上の干渉計では観測している重力波の波長が短いので到来方向を決める上で有利ですが、2台の干渉計間の距離は地球のサイズで制限されています。これは宇宙重力

波干渉計の2台の間隔が1天文単位程度になるのに比べると非常に小さいと言えます。宇宙重力波干渉計の間で比較をするとLISAとDECIGOでは2台の干渉計間の距離は同じ程度ですが、メインの観測周波数が二桁違います。このため、DECIGOの周波数帯は原理的に2桁程度高い角度分解能が期待できます。これはシグナル対ノイズの比が同じだと考えた場合ですが、加えてDECIGO周波数帯では高い感度が達成できる可能性があるため、より一層の高い角度分解能が実現できることとなります。中性子星連星を考えると、この高い分解能で天球上の位置が予言できるのが合体直前ではなく、合体に先立つこと1年前、あるいは、1週間前に得られるということとなります。その為、合体の時刻を予言し、その時刻にその他の電磁波を用いた検出器を向けて同時観測することが可能となります。このことは重力波を用いた天文学をおこなう上で非常に大きな要素になるに違いありません。

DECIGOの目指す物理としては大きく分けて、(1)一般相対論の検証、(2)重力波による宇宙論、(3)重力波天文学の3つがありどれも3つ星の成果が期待できます。後により詳しく議論するように、すべてにおいてやはり連星系を起源とする重力波は重要となります。(1)に関しては、ゴールドンイベントと呼ぶべきシグナル対ノイズ比の非常に大きなイベントがDECIGOでは期待できます。そのようなイベントを使うことで一般相対論に対する高い精度の検証が可能となります。(2)の観点では、中質量ブラックホールが合体進化して銀河中心核ブラックホールが形成されたのだとすると、その進化の過程がつぶさにわかることになるでしょう。また、太陽質量程度の連星系に関しても膨大なカタログが作られて統計的な議論が可能となります。(3)については、中性子星の合体をターゲットにしたとき、1kHz程度の帯域の重力波の方がたくさん情報をはこんでくると考えられますが、DECIGOの周波数帯は前述のように合体の時刻と天球上の位置を事前に予測するためには不可欠です。その他には(2)の重力波による宇宙論に関して、背景重力波はもっとも重要なターゲットのひとつです。背景重力波はマイクロ波宇宙背景放射によって先に観測されるかもしれませんが、DECIGOが狙う背景重力波は波長が大きく異なり、その宇宙論的意義はマイクロ波宇宙背景放射で背景重力波が先に見つかったとしても薄れるものではありません。

さて、いよいよ連星系からの重力波に話の焦点を移したいと思います。連星系の合体の初期フェーズでは連星はお互いに比較的離れていて星の内部構造などが連星の運動にはほとんど影響を与えないクリーンな物理系であると考えられています。このフェーズをinspiralフェーズと呼びます。その後の合体フェーズに関する理論的研究においては数値相対論が不可欠ですが、数値相対論において最近多大な進展がありました。この進展に関しては世界的に中村-柴田の日本発の業績も高く評価されています。ここでは、私の専門とするinspiralフェーズに焦点を当てたいと思います。inspiralの際に放出される重力波の振幅は大きくはありませんが、何周も公転を重ねるために実効的な振幅という意味では多くの場合に最も重要になると考えられています。このように何周期にもわたる微弱な重力波を検出するためには、ただぼんやりと信号を眺めているだけでは無理です。理論的に重力

波の波形を予測し、その予測と観測を比較することでシグナル対ノイズの比を高めるといふ努力が必要とされます。また、重力波の検出に成功した後も、データから重力波源に関するパラメータ(質量や自転、合体時刻、到来方向等)を正確に決定するためには、データの精度に負けない正確な波形の予測が必要となります。さらに、このデータを用いて一般相対論の検証を行おうという場合にも、正しい理論予想があつてこそ観測との比較が可能になります。

波形の理論予想と言ったときにもっとも重要になるのが、位相の時間発展をどれだけ正確に予言できるかです。理論的な波形の予想をテンプレートと呼んでいますが、テンプレートとデータとの相関をとることで重力波がやってきたのかどうかを判定します。位相が半波長分もずれると相関は極端に小さくなってしまいます。それに対して振幅のエラーがわずかにあっても重力波の検出やパラメータの推定には大きな影響を及ぼしません。位相の進化というのは基本的には連星系の軌道周期の時間変化によって決まります。つまり、重力波放出の反作用で連星系の軌道周期が短くなるのを正確に理論的に計算することが求められているのです。

このような正確な波形の計算の手法として、(1)ポストニュートン展開と(2)ブラックホール摂動の二つの方法があります。ポストニュートン展開の方法は典型的な運動の速度が光速に比べて小さい ( $v/c \ll 1$ ) というものを使って展開する方法です。この手法での計算は  $(v/c)^4$  のオーダーで長い間停滞していました。遠方で観測される重力波の波形という意味では  $(v/c)^4$  のオーダーさえも計算されていませんでした。この計算が急速に進展するようになったのは Kip S. Thorne らの“*The last three minutes*”(1993)という論文でこのような波形の正確な予想が重力波観測にとって非常に重要であることが指摘されてからのことです。現在ではポストニュートンの近似は  $(v/c)^7$  のオーダーまで進んでいます。

それに対して、ブラックホール摂動の方法は  $(v/c)$  が小さいと仮定する必要がありません。代わりに、連星の質量比が大きいこと ( $\mu/m \ll 1$ ) を仮定します。連星の質量比が大きい例は銀河中心の巨大ブラックホールに小さなコンパクト星(サテライト)が落ちる場合などが代表的に挙げられますが、そのような連星系の *inspiral* は **Extreme Mass-Ratio Inspiral** の頭文字をとって **EMRI** と呼ばれています。このような連星では重力波放出の反作用が小さい為に合体までに巨大ブラックホールのまわりを何周もまわります。そのため、ブラックホール時空を精密にプローブできると期待されています。

ブラックホールの線形摂動は古くから調べられており、回転するブラックホールの場合においても摂動の方程式は1本の完全に変数分離可能な2階の偏微分方程式に書き表すことが可能です。この方程式はマスター変数に対する方程式で、その解からは無限遠方に放出される重力波を簡単に読み取ることが可能です。しかしながら、この方程式は計量の摂動の成分に対する直接の方程式ではないため、ブラックホール近傍での計量の摂動をマスター変数から再構成するのはそれほど容易ではありません。ブラックホールまわりをまわるサテライトの軌道の進化を計算するには、サテライト自身が引き起こした計量の摂動を

サテライトの位置において計算し、サテライトにはたらく自己力を求めなければなりません。しかし、サテライトを点粒子としてあらわしてしまうと、計量の摂動はサテライトの位置において発散してしまいます。発散をうまく除去して、正しく正規化された自己力を求める基礎方程式は Mino, Sasaki & Tanaka(1997)によって与えられました。しかし、この方程式は形式的なもので、実際の応用には(特に回転のあるブラックホールに関しては)未だに困難が残されています。

そのような困難を回避して、自己力による反作用を手っ取り早く計算する手法はないものだろうかと思うでしょう。実際、ポストニュートンの計算においても、必ずしも自己力をいちいち計算しているわけではありません。まずは、最低次の反作用の効果を見るにはエネルギーバランスによる方法が有効です。重力波として無限遠方に放出される重力波のエネルギーと軌道運動のエネルギーの変化が釣りあうとして軌道の変化を求めるのです。この方法は円軌道に限ればうまくいきますが、一般の軌道では3つの独立な“運動の定数”すべてに対するバランス関係が必要です。ここで、運動の定数とは自己力による反作用がなければ保存する量のことを指しています。回転するブラックホールの場合に、回転軸方向の角運動量は背景時空の持つ対称性と関係しているため、重力波の角運動量も含めて全体で保存する量を構成することができます。これで、エネルギーと合わせて二つの運動の定数に対する発展方程式を立てることが可能です。しかし、第3の運動の定数は存在するのでしょうか。幸いなことに回転するブラックホールのまわりの点粒子の運動には第3の運動の定数が存在しています。これをカーター定数と呼びます。この定数は時空のある種の対称性と結びついてはいるのですが、この対称性に付随した重力波の保存量を構成することができません。そのため、長い間、直接的に自己力を計算する以外に方法はないと考えられていました。

ところが、近年、画期的なアイデアがもたらされました(Mino (2003))。これは自己力の計算に放射重力場 $=\{(\text{遅延重力場})-(\text{先進重力場})\}/2$ を用いて計算しても長時間平均すれば正しいカーター定数の変化率を求めることができるというものです。これの何が嬉しいかというと、放射重力場は遅延重力場、先進重力場の双方に含まれている点粒子の位置での発散が相殺して、そもそも発散を含んでいないのです。そのため、ややこしい正規化を考える必要がありません。

この手法は瞬く間に応用されるかと思いましたが、それでも実際に計算をしようとするとなかなか大変な労力がかかりなかなか実行されませんでした。次のブレークスルーはいくつかの幸運が重なりました。その過程を説明するのは大変なのでここでは述べませんが、少々思いもよらないような新しい変数を導入するとカーター定数の時間変化の式がどんどんと単純化して、最終的にはエネルギーや角運動量の時間変化を求める式とほとんど同じ表式にまで変形されてしまったのです(Sago, Tanaka, Hikida & Nakano (2005))。この最終的な公式を用いてカーター定数の時間変化を長時間平均ながら世界で初めて計算することに成功しました。