

# 重力波の放出

二 間 瀬 敏 史\*

重力波天文学の目的の一つは、検出される重力波から、それを放出した系の情報を得ることである。そのためには当然、重力波を放出する物体の運動と観測される重力波の関係を知る必要があるが、これはなかなか一筋縄ではいかない問題である。ここではどんな場合に問題が解決されているか、どのような場合が未解決で残っているかを見ていこう。

物体が加速度運動すれば重力波が放出され、それによってエネルギーや角運動量が持ち運ばれ、運動が減衰する。このような輻射の反作用は電磁気学では、よく知られており、その効果は運動方程式の中に反作用力を導入することで表現される。この反作用力は加速度の時間微分を含むため、運動方程式はいわゆる逃走解という非物理的な解を含み、それを除くためには因果律をごく短時間破ることが、しばしば問題にされる。これは本来、荷電粒子の運動の自由度と電磁場の自由度との両方が存在し、両者の連立方程式を初期値問題として設定すべき問題を、粒子の自由度だけを用いて電磁場の自由度を無視する近似を行なったことによる見かけの矛盾であって、何等本質的なことではない。輻射の反作用力はあくまで近似的概念であることを忘れてはならない。(余談ではあるが、重力場の輻射補正によって曲率スカラーの二乗のような項が作用に付け加わり、それが宇宙のインフレーション膨張をさせるという立場もある。これは一種の逃走解のようなものであり、なぜ電磁気学で拒否されたものが宇宙論では受け入れられるのであろうか?)

重力の場合も事情は似ている。重力波放出の反作用は運動方程式の中で物体の四重極モーメントの時間についての5階微分を含む減衰力として表現される。従ってこの公式を四重極公式という。運動方程式は重力場の自由度を含んでいないのでアインシュタイン方程式とは(原理的には)独立に解け、物体の運動は反作用もこめて決まる。次にその運動を源としてアインシュタイン方程式を解いて放出される重力波が決定される。例えば連星パルサーで観測された軌道周期の減少は、こうして計算された重力波放出による軌道周期の減少率とびたりと一致し、間接的に重力波は発見されているといつてよい。しかしこのような処方箋がよい近似となるのは残念ながら運動が光の速度に比べて十分小さな場合に限られる。連星パルサーの軌道速度は光速の千分の1程度であり、

四重極公式は十分よい近似になっている。より複雑な系、例えば合体直前の連星系のような対象に対して反作用入りの運動方程式を解くのは、反作用項の時間の5階微分のため数値計算上困難である。そのためより低次の微分しか含まないように反作用力を書き直す必要がある。これは Blanchet, Damour, Schafer によって行なわれ、それを用いて中村、大原は連星中性子星の合体と、それによって放出される重力波の数値計算を行なった。重力波の放出をもたらず運動の速度が光速に比べて十分遅ければ、たとえ強い内部重力がある場合でも、それが問題にしている運動を支配していない限り(強い重力が運動を支配すれば必然的に速度は速くなる。), 上の処方箋で重力波放出の問題は解決される。

問題は遅い速度の近似がきかない場合である。例えばブラックホールのまわりの粒子からの重力波や宇宙ひもからの重力波の計算は、現在までどれも輻射の反作用を取り入れていない。電磁気学の場合、粒子の運動が相対論的な場合でも、ディラックによって点粒子の極限で反作用力が導かれている。しかし一般相対論ではブラックホールが存在するため単純な点粒子の概念が破綻する。質量は見かけ上、一点には縮まらず、その質量(と角運動量)で決まる有限の大きさをもつ。特に相対論的な運動では、この広がりを見捨てできなくなる。なぜなら対象のある点の運動は他の点の過去にあからさまに依存するからである。これは宇宙ひもの場合も同様である。このような遅延の効果のため物体の運動をある一時刻での物体の自由度だけで記述するという運動方程式の概念が適用できなくなる。この場合の一つの手段は何の近似もせずにアインシュタイン方程式をスーパーコンピュータで数値的に解くことである。中村を中心として、この方向は過去10年間に着実に進歩しており、今後の発展が大いに期待される。しかしそれと同時に何らかの有用な近似方法が開発されることが、数値計算の検証にもまた運動の法則の新しい概念の形成のためにも必要になるだろう。

より詳しい重力波放出の解説は、「一般相対論における運動方程式」(物理学会誌, 43巻, 292-294, 1987), 「重力波放出の問題」(数理科学, No. 329, 40-43, 1990)を参照して下さい。

\* 弘前大理 Toshifumi Futamase: Emission of Gravitational Waves