

Report of Amaldi10 and GR20

J. Kato

Jul. 8. 2013 - Jul. 12. 2013

Amaldi10 and GR20に参加し、光バネとスクイーミングについてにポスター発表を行った。特にスクイーミングについては多く質問を受け、私も実際にスクイーミング実験をする際有用な情報を収集できた。

以下に特に興味を持った発表について概要をまとめた。

1 Ulrich Sperhake - *Numerical relativity: The role of black holes in gravitational wave physics, astrophysics and high-energy physics*

1.1 Einstein 方程式の解

ブラックホールは相対論的な現象であり、Einstein 方程式を解くことで、ブラックホールを記述することができる。Einstein 方程式は計量の非線形な 2 階偏微分方程式であり、それを解くのは容易ではない。解くためには、いくつか方法がある。ここではそのうち 4 つを紹介する。

1.1.1 解析的な方法

解析的に解くことは難しいが、高い対称性を課すことで解が得られる場合がある。例えば、真空球対称静的な解として Schwarzschild 解が知られている。Schwarzschild 解は、Schwarzschild 半径でみかけの特異点を持っていて、この領域が事象の地平になっている。すなわちブラックホールを記述している。

Schwarzschild 解の他に、定常軸対象真空の対称性を仮定して得られる、Kerr 解などがあり、Kerr 解は現実のブラックホールをよく記述している。

1.1.2 摂動的な方法

既知の解析解を摂動展開することで、既知の解析解から少しずれた時空を計算することができる。例えば、計量の摂動展開を考える。重力波は計量の 1 次の摂動項から得られることがわかっている。2 次の摂動は重力波による反作用を表す。初期宇宙における量子ゆらぎも摂動で計算することができる。

1.1.3 数値相対論

初期値を与えてそれを Einstein 方程式に発展させることで数値シミュレーションして、時空の構造を決めることができる。QCD の lattice 計算と同じような計算を行う。

1.1.4 post-Newtonian 展開

重力場が弱い仮定するとき、運動の $\varepsilon = \beta^2 = (v/c)^2$ を展開パラメータとして展開して計算するのが post-Newtonian(PN) 展開である。.5PN というような少数がでるのは β^2 で展開しているからである。重力波の計算によく用いられているのは、2.5PN か 3.5PN である。

1.2 ブラックホールにおける重力波

ブラックホールの放出する重力波のうち、ターゲットになるのは主にブラックホール連星によるものである。その周波数はブラックホール連星の質量により、 $10^0 - 10^{-4}$ Hz 程度である。これは地上の干渉計ではなく、LISA や DECIGO などの宇宙の干渉計によって測定される帯域である。

重力波のテンプレートを作るには、total mass M 、mass ratio q 、ブラックホールのスピン s_1, s_2 、全角運動量 J など 11 個のパラメータが必要である。そのうち、全角運動量と z 軸の方向を一致させうまく座標を選ぶことで、パラメータを 9 個まで減らせる。そうすることでサーチするパラメータスペースの広さを限ることもできる。[2] テンプレートは数値相対論か PN 展開による。また Effective One Body(EOB) 近似を用いて、ringdown モデルにより作ることもできる。つまり連星をひとつのブラックホールだと近似して quasi-normal mode で展開する。ブラックホールのテンプレートを作っている組織に ninja project や NRAR などがある。

1.3 加速器におけるブラックホール

ブラックホールは LHC の加速器でも生まれる。生まれる条件は質量ではなく、エネルギーが Planck 質量を超えるかどうかで決まる。加速器で作られるなブラックホールは、素粒子的な性質を持ち、そのサイズも素粒子程度である。素粒子的なブラックホールは電荷を持つと考えられ、帯電したモデルとして Reissner-Nordstøm 解が考えられる。これは Schwarzschild 解にソースとして電磁場を考えたようなモデルである。

2 Sheila Dwyer - *Quantum noise reduction using squeezed states in LIGO*

2.1 概略

eLIGO では真空場をスクイーミングしてから、ダークポートより注入することで、ショットノイズを抑制している。注入したスクイーズ場のスクイーミングファクターは 2.1 dB である。さらに aLIGO ではスクイーミングファクターを 20% 改善することで、24% の測定体積の向上を目指している。

スクイーミングはすでに GEO で行われている。3GEO では dB のスクイーズ場を注入し、ショットノイズレベルを下げた。3 年間スクイーミングを続けていて、観測開始よりロスバジェットも下がっている。[3]

GEO のスクイーズ実験でもわかるように、スクイーミングの一番の敵はロスである。eLIGO のトータルロス は 50-60% であるが、aLIGO では 20-25% になる見積もりである。

LIGO がスクイーズをする際問題になるものに次の 3 点がある。

2.2 スクイーミングアングルゆらぎ

スクイーミングアングルは、OPO と干渉計の制御によって決まる。その制御の雑音はスクイーミングアングルのゆらぎになり実効的なスクイーミングファクターを減らしてしまう。スクイーミングアングルのゆらぎ

を測定したところ eLIGO では 20-40 mdeg. ほどであった。特にスクイーミングファクターが高いほど、大きなロスになる。これが将来スクイーミングレベルを制限すると考えられる。

2.3 スクイーミングの後方散乱

OPO の前にはファラデーアイソレーターがあり、干渉計からのアウトプットは OPO に戻らないようになっている。しかし、アイソレーターも完全ではないので、キャリア光や高次モードが OPO に戻り、OPO で反射されもう一度干渉計に入ってしまうことがある。これを後方散乱という。

後方散乱による雑音をスクイザーを揺らしながら測定したところ、後方散乱の影響は特に低周波で大きく、雑音レベルはスクイーミングを導入した量子雑音のレベルであり、今後問題になりそうである [4]。ただ今回の測定ではまだスクイザーがむき出しであった。まだスクイザーを真空層に入れる、スクイザーのベンチを懸架するなど改善の余地が残っている。改善したら後方散乱は問題にならなくなると楽観視されているようであった。

そのほかの後方散乱対策として、スクイザーのキャビティのフィネスを落とすことが挙げられていた。ただし、それはスクイーミングファクターを弱めることにつながる。また、アイソレーターを複数入れても軽減できるが、これもロスになり好ましくない。

2.4 輻射圧雑音

スクイーミングを行うとショットノイズが減る代わりに輻射圧雑音が増える。GEO の実験結果では、輻射圧雑音による感度悪化はあまり問題ではなかった。aLIGO の場合はその他の雑音レベルが低く、パワーも高いので、輻射圧による感度悪化が顕著になると思われる。aLIGO では輻射圧雑音改善のためフィルターキャビティの導入を考えている。

2.5 自身の実験へのフィードバック

アングルゆらぎ、後方散乱は私の実験でも問題になるだろう。特に、後方散乱について、そのせいでロックしないかもしれないと指摘を受けた。解決法として LIGO と同じようにスクイザーのフィネスを下げることが考えられる。ワンパスのスクイザーにするのもいいかもしれない。

参考文献

- [1] 白水徹也 “アインシュタイン方程式”
- [2] Amuradha Gupta ポスター発表 (C2.15): “*Initial dominant spin orientations for unequal mass spinning compact binaries*”
- [3] Katherine Dooley オーラル発表 (C3): “*Commissioning GEO-HF: integrating permanently a squeezed vacuum source and increasing the laser power*”
- [4] Lisa Barsotti ポスター発表 (C3.2): “*Impact of backscattered-light in squeezing-enhanced LIGO*”