

大規模実行 XC-S の報告書

報告者：木内建太（京都大学基礎物理学研究所）

報告日：2015/2/9

申請課題名：傾斜したスピンを持つブラックホールと磁場中性子星連星合体の数値相対論シミュレーション

実行日：2015/1/5-1/6（経過時間 2,823 分）

使用ノード：1,728MPI プロセス（20,736 コア）

学術的背景：地上型大型重力波干渉計 KAGRA、advanced LIGO、advanced VIRGO は 2018 年頃を目途に本格的観測を開始する予定である。ブラックホールと中性子星からなる連星の合体はこれら観測器の有望なターゲットであり、例えば advanced LIGO では年間 10 回程度の頻度で観測されると見積もられている。

ブラックホール-中性子星連星合体からの重力波が観測されれば、

(い) 強重力場中における一般相対性理論の妥当性の検証

(ろ) 中性子星物質の真の状態方程式の決定

(は) ショートガンマ線バーストの駆動源の解明

(に) R 過程元素の起源の解明

が可能になるため、この天体現象が観測された結果得られる知見は計り知れない。

連星合体を重力波のみならず電磁波で観測することは、重力波源の位置決定精度の向上、重力波観測の信頼性の向上という 2 点から非常に重要な研究課題であると考えられている。この点を精査する為には、磁気流体/ニュートリノ輻射輸送の効果を取り入れた連星合体のより現実的なモデル化が必要であると認識されている為、数値相対論によるモデルの構築が世界中で試みられている。本研究課題では磁気流体効果に焦点を絞り、ブラックホール-磁場中性子星連星合体の数値相対論シミュレーションを XC30 上で行った。

計算設定：ブラックホールが持つスピンの軌道角運動量と平行でない場合を考える（図 1 参照）。この場合、軌道面を中心にした歳差運動が励起され、潮汐破壊の結果形成される降着円盤内で強いポロイダル磁場（回転軸と平行な面内の成分）が生成される可能性がある。磁場によるブラックホール回転エネルギーの引き抜き（Blandford-Znajek 過程）は相対論的ジェット駆動の有望な機構のひとつであるが、ポロイダル方向に揃った磁場の存在が必要不可欠である。

この様な動機のもと、多層格子法を実装した数値相対論-磁気流体シミュレーションを実行した。階層が変わる毎に格子サイズが 2 倍になる実装法を採用し、各層の総格子点数を $1,118^3$ 点、最細解像度を 120 メートルと設定した。なお、カーテシアン座標を用いた差分法を採用している。参考までに、先行研究における典型的な設定は、格子点

数 100^3 点、最細解像度 150 メートルである。降着円盤内で発現する磁気流体不安定性を数値的に捕獲するには、高解像度-広領域シミュレーションが必要不可欠であり、本シミュレーションにおける設定は世界最先端のものとなっている。

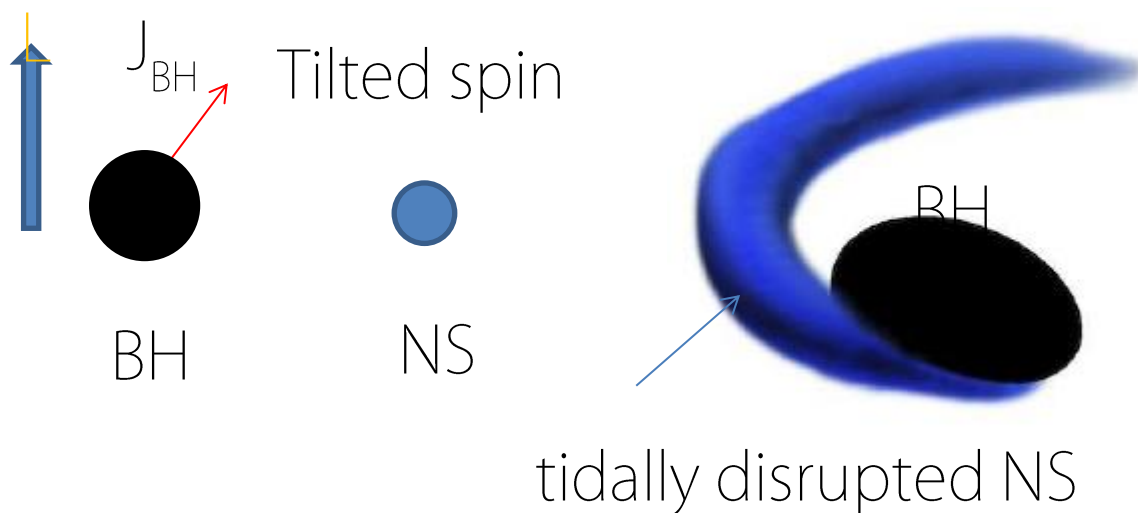


図 1 : ブラックホールのスピン(J_{BH})と軌道角運動量(L)が傾斜角を持つ場合に、引き起こされる歳差運動 (中央図) と降着円盤の構造 (右)。

計算結果 : XC30 にて 2,823 分シミュレーションを実行したところ、物理時間にして約 9 ミリ秒の計算が完了した。これは連星がお互いの周りを回るインスパイラルから、ブラックホールの潮汐力により降着円盤が形成される相への遷移に相当する。最後に要望するように科学的な結果を導くにはこの時間では不十分であり、今回は計測した各サブルーチンの性能評価を行う。本コードは、アインシュタイン方程式を解くソルバー、一般相対論的磁気流体を解くソルバー、プリミティブリカバリーソルバー、隣接間および格子間通信に大別される。プリミティブリカバリーソルバーとは、保存量からローレンツ因子と単位質量当たりのエンタルピーを求めるルーチンであり、相対論的流体を保存形式スキームで解く場合には必要なルーチンである。

表 1 に 1 ステップアップデートするのに通信を除く各ルーチンにかかった経過時間を示す。参考までに 512MPI プロセスを用いた場合を示す。

N	node	Einstein part (sec. / factor)	MHD part (sec. / factor)	Recovery part (sec. / factor)	Total (sec. / factor)	理論値 (単 ノード)
92	1,728	0.089(1.08)	0.081(1.25)	0.064(1.31)	214.17(1.04)	2.12 (Haswell)
82	512	0.063(1.52)	0.058(1.7)	0.045(1.85)	143.26(1.56)	3(Haswell)

82	512	0.096(1)	0.102(1)	0.084(1)	223.23(1)	1(Xeon)
----	-----	----------	----------	----------	-----------	---------

表1 N:各ノードが持つ1方向のグリッド数、3-6 コラム:経過時間と XEON、512 ノード使用の場合を1としたときの加速因子、7 コラム:単一ノードの加速因子。

1,728 ノードを用いた場合の実効性能を計測することは出来なかったため、昨年度行った512 ノード(Xeon)使用時に得られた実効性能を基準にする。1 ノードが持つグリッド数が同じで512 ノード(Haswell)を使用した場合の結果を2行目に示す。1 ノードの理論性能がXeonに比べ3倍になっているが、実際の加速因子は、アインシュタインソルバー1.52、MHDソルバー1.7、リカバリーソルバー1.85であるため主要ルーチンで性能がXeon使用時に比べ、38-49%劣化していることが分かる。これは 数値相対論はB/F値が大きい計算であるのに対し、Xeon->HaswellではB/F値が0.3->0.136に下がっている事に起因している。また全体では加速因子は1.56となっている。

次に、1,728 ノード(Haswell)を使用した場合では、1 ノード1方向の持つグリッド数が1.12倍になっているため、512 ノード(Xeon)の経過時間を基準にした場合、空間3次元のシミュレーションなので単ノードでは $3/1.12^3 \approx 2.12$ 倍の加速が理想値として見積もられる。それに対し各ルーチンの加速因子は、アインシュタインソルバー1.08、MHDソルバー1.25、リカバリーソルバー1.31、全体1.04であるため、やはり512 ノード(Xeon)に比べ性能が38%-49%劣化している。理由は上述の通りである。しかしCPUをHaswellに固定し、512 ノードと1,728 ノードで比較した場合、全体の性能は2%程度の劣化で済んでいるため本コードは良くスケールするコードになっていることが示されている。

まとめに、512 ノード(Xeon)を使用した場合の実行性能は12-13%であったので、1,728 ノード(Haswell)使用の場合、実行性能は6-7%程度であると見積もられる。

要望:今回の計算設定でブラックホール-磁気中性子星合体の数値相対論シミュレーションから科学的な結果を導き出すためには、物理時間にして少なくとも約60-70ミリ秒の計算が必要である。仮に60ミリ秒実行できた場合、放出重力波、質量放出、相対論的ジェット駆動の有無などを議論することが可能であり、得られた結果を学術誌に投稿する内容まで昇華させることができる、

XC-Sのクラスを2日間限定とせずに、10日から14日間使用可能とすることをご検討願います。