裸の特異点形成と宇宙検閲官仮説の破れ

山田祐太（大阪工業大学・宇宙物理研究室） M1

我々は宇宙検閲官仮説の真偽を数値解析によって検証するため，重力崩壊をシミュレーションするコードの作成に取り組んでいる．今回は，研究の概要を歴史的にレビューすると共に，現在の研究の進行状況を報告する．

宇宙検閲官仮説とは？

・「事象の地平線は事象の地平線によって必ず隠され，裸の特異点は自然界には発生しない」という仮説．ペンローズが1969年に提唱した．

※Penrose R., 1969, Riv. Nuovo Cimento 1 (Numero Special), 252

・1992年にシャピーロ，トイコルスキーが行った軸対称に分布したテスト粒子の崩壊シミュレーションでは，見かけの地平線を持たない裸の特異点が形成された．

※Shapiro S. L., Teukolsky S. A., 1991, Phys. Rev. Lett. 66, 994

・仮説の一般性については現在でも不明である．

・仮説が破られた例として，他に，ブラックホール形成の臨界現象がある．

フープ仮説とは？

・「事象の地平線は，物質形状が，ある半径（フープ）以内に分布しているときに形成される」という仮説．キップ・ソーンによって1972年に提唱された．

※K. S. Thorne, Nonspherical gravitational collapse: A short review, in J. R. Klauder, Magic Without Magic, San Francisco 1972, 231-258

・フープの円周は，次のように決まる．

円周 ＝ 2π(2M)　　M：質量

・物質が，このフープを越えて重力崩壊した場合，裸の特異点が形成される．

・どの質量の定義を用いるか，仮説とするには漠然としている．

研究の目的

1　宇宙検閲官仮説の一般性の検証．

2　フープ仮説の妥当性の検証．

3　高次元での宇宙検閲官仮説，フープ仮説の検証．

これらを，数値計算によって検証したい．

軸対称な時空でのフープ仮説の妥当性

※Nakamura T., Shapiro S. L., Teukolsky S. A., 1988, Phys. Rev. D. 38, 2972

・非回転，軸対称を仮定したときの空間計量

$$ds^2 = \psi^4\left(e^q(dR^2+dz^2)+R^2d\phi^2\right)$$

・共形平坦を仮定．

$$ds^2 = \psi^4\delta_{ij}dx^idx^j$$

・ハミルトニアン拘束方程式を，時間反転対称を仮定して解く．

$$\triangle\psi = -2\pi\psi^5\rho \qquad \psi = 1-\phi_N$$

・フープ仮説のテストとして，apparent horizonと，リーマン曲率のスカラー積（Kretchmann invariant）

$$I \equiv^{(3)} R^{ijkl(3)}R_{ijkl}$$

を調べる．

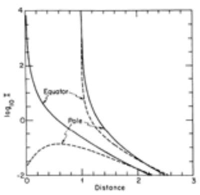
結果

・楕円体の場合，minimum circumferenceが大きいとき，apparent horizonが形成されなかった．

TABLE I. Properties of prolate configurations in Fig. 1.

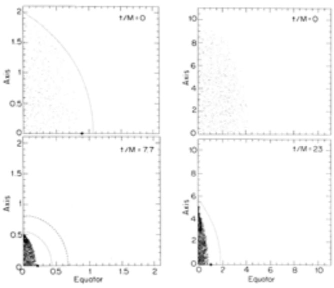
No.	e	c/M	M/M_0	Apparent horizon?	$C_{eq}^{AH}/4\pi M$	$C_{pole}^{AH}/4\pi M$	$\mathcal{A}/16\pi M^2$	$C_{eq}^{surf}/4\pi M$	$C_{pole}^{surf}/4\pi M$	$C_{eq}^{min}/4\pi M$	$C_{pole}^{min}/4\pi M$
1	0.01	0.40	0.40	Yes	1.00	0.99	1.00	1.01	1.01	1.00	1.00
2	0.99	0.40	0.20	Yes	0.94	1.03	0.99	0.74	2.49	0.74	1.03
3	0.99	0.65	0.29	Yes	0.86	1.10	0.96	0.57	2.00	0.57	1.07
4	0.99	0.70	0.30	No				0.55	1.95	0.55	1.08
5	0.999	0.40	0.15	Yes	0.94	1.03	0.99	0.46	4.44	0.46	1.03
6	0.999	0.70	0.24	No				0.32	3.21	0.32	1.08

・楕円体の外側で，リーマン曲率のスカラー積の値が発散．（実線が離心率e=0.9999の扁長楕円体のケース）



非衝突粒子の崩壊シミュレーション（非回転）

※Shapiro S. L., Teukolsky S. A., 1991, Phys. Rev. Lett. 66, 994

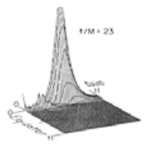


・軸対称dust崩壊のシミュレーション．

・minimum circumferenceが大きいとき，apparent horizonは形成されなかった．

・リーマン曲率のスカラー積の値が，物質の外側で発散した．

・シミュレーション結果は，フープ仮説に無矛盾であった．



非衝突粒子の崩壊シミュレーション（回転あり）

※Shapiro S. L., Teukolsky S. A., 1992, Phys. Rev. D. 45, 2006

・扁長楕円体に分布した粒子を回転させる．（順回転，反回転している粒子の数は同じ，且つ，全回転角速度0）

・粒子の四元速度成分（ξの値を変える）

$$u_r = 0, u_\theta = 0, u_\phi = \pm\xi r^2\sin^2\theta$$

・回転が十分小さい場合，非回転な重力崩壊の結果と区別が付かない．

・回転が大きいとき，apparent horizonが形成され，裸の特異点は形成されなかった．

・非回転な重力崩壊と同様，物質の外側でリーマン曲率のスカラー積が最大値になった．

ξ	polar radius	eccentricity	apparent horizon	time evolution
1.2	20M	0.9	Yes	*prolate* → *oblate* → *prolate* → point singularity
0.9	10M	0.9	Yes	*prolate* → point singularity
0.1	10M	0.9	No	*prolate* → spindle singularity
0.0	10M	0.9	No	*prolate* → spindle singularity

研究の進行状況

① 一般相対論の弱い重力場での近似であるポスト・ニュートン近似で計量を求める．

・2次のポスト・ニュートン近似

$$g_{00} = -1-2\phi-2\phi^2$$
$$g_{ij} = (1-2\phi)\delta_{ij}$$

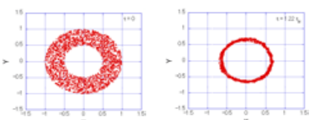
重力ポテンシャルφは，Poisson方程式

$$\triangle\phi = 4\pi G\rho$$

を各時間で解いて求める．

②与えられた計量を使って，測地線方程式を解く．

例：ドーナツ型に分布した粒子の崩壊シミュレーション

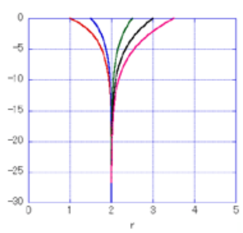


③ event horizonの位置を特定するHorizon Finderを作成．

・シュワルツシルド時空でのテスト計算

backward photon method

※Anninos P., et al, 1995, Phys. Rev. Lett. 74, 630



現在，フル相対論で時空を解くコードを作成中．

Future Works

問題点

・共形平坦を仮定している．

・裸の特異点の形成を，apparent horizonの形成判定でのみ議論している．

・回転楕円体の崩壊シミュレーションにおいて，粒子の正味の角運動量が0のような状況を設定している．

今後の課題

・重力波があるような初期条件を時間発展させる．

・重力波の放出量をきちんと計算する．

・裸の特異点の形成を，event horizonの形成判定によって議論する．

・高次元での宇宙検閲官仮説，フープ仮説の検証．

※Nakao K., et al, 2005, Phys. Rev. D. 71, 104014

m1m08a26@info.oit.ac.jp

２００８/７/２７ 天文・天体物理若手の会夏の学校