

図1 正面衝突によるパルス状重力波の放出

ルの近くに発生した波に対応している。時間  $t$  が十分経過すると、ピークの位置は光速で伝播するようになる。しかも、図に示しているように、その伝播方向は各々のブラックホールの衝突運動とはちょうど逆の方向になっている。重力波パルスの放出にこのような方向性が現わ

れることが、正面衝突の場合の顕著な特徴である。今後、この結果の正当性は数値計算によっても確かめられるべきであるが、重力波放出過程の1つの側面を示すものとして興味深い。また、Kerr ブラックホールの場合への拡張なども今後の検討課題として残されている。

参考文献

- 1) Smarr, L. (1979), In Sources of Gravitational Radiation, L. Smarr, ed. (Cambridge University Press, Cambridge).
- 2) Tomimatsu, A. (1989), *Gen. Rel. Grav.* **21**, 1233.
- 3) D'Eath, P. D. (1975), *Phys. Rev.* **D12**, 2183.
- 4) Davis, M., Ruffini, R., Press, W. H. and Price, R. H. (1971), *Phys. Rev. Lett.* **27**, 1466.
- 5) Alekseev, G. A. and Belinsky, V. A. (1980), *Sov. Phys.—JETP* **51**, 655.

## 宇宙背景重力波

前田 恵 一\*

重力波源として考えられるものに2種類ある。一つがバースト的なものであり、もう一つがバックグラウンドとして存在するものである。いま、重力波放出の典型的な時間とそのイベントの間隔をそれぞれ  $\tau$ ,  $\Delta\tau$  としたとき、バースト的なものは  $\tau/\Delta\tau < 1$  で定義され、一方、バックグラウンドとして存在するものは、宇宙の初期から存在したか、その後つくられたものでも  $\tau/\Delta\tau > 1$  という条件を満たしているものである。その特徴は、スペクトルが連続で、位相がランダムで stochastic なことである。ここでは後者の場合の主な源と考えられる宇宙背景重力波とその起源について簡単にふれる。

宇宙論的な重力波はその起源が一般に赤方偏移  $z \geq 1$  のものをさす。重力波のエネルギー密度は、宇宙論では他のエネルギー密度同様臨界密度  $\rho_{cr}$  を基準に測るが、全重力波エネルギー密度  $\rho_g$  の  $\rho_{cr}$  に対する比、つまり  $\Omega_g \equiv \rho_g/\rho_{cr}$  だけでなく、スペクトルが連続であるので、各振動数ごとに定義されるエネルギー密度の比  $\Omega_g(\omega) \equiv \omega\rho(\omega)/\rho_{cr}$  を考える場合が多い。ここで  $\rho_g = \int d\omega \rho(\omega)$  である。この  $\Omega_g(\omega)$  は、角振動数  $\omega$  ぐらいの波が  $\omega$  程度の巾で存在するとき、その波のエネルギー密度に対する寄与を与える。

$\Omega_g$  と重力波の振幅  $h$  の関係は、 $h \ll 1$  かつ波長が地平線サイズより十分小さいとすれば、Isaacson による公式  $\rho_g \sim \omega^3 h^2 / 8G_N$  から、

$$h \sim \Omega_g^{1/2} \frac{\lambda_0}{ct_0} \sim 10^{-17} \Omega_g^{1/2} \frac{\lambda_0}{R_0} \quad (1)$$

となる。ここで  $\lambda_0$  は重力波の典型的な波長、 $t_0$  は宇宙年齢である。

### 1. 観測からの制限

宇宙論的な重力波は勿論まだ観測されていないが、そのことからエネルギー密度に制限が与えられる。

- (1) 減速パラメーター  $q_0$  の制限  $\rightarrow \Omega_g < O(1)$
- (2) 銀河や銀河団の形成

重力波は宇宙膨張には輻射と同じように振舞うが、密度揺らぎは輻射優勢の時代では成長しないので、銀河や銀河団の形成のためには  $\Omega_g$  が物質密度より小さくなくてはならない。これから 10 kpc や 10 Mpc のスケールで  $\Omega_g < \Omega_{matter} < O(1)$

- (3) 元素合成

重力波が輻射密度以上存在すると、宇宙密度の増加に伴う膨張率の変化があまりに大きくなり、宇宙初期の軽元素を説明できない。よって、 $\Omega_g < \Omega_{rad} < 10^{-4}$  また、重力波は波長が地平線サイズより大きいと非等方性が無視出来なくなるが、元素合成時にこのようなスケールの重力波が存在すると観測と矛盾することが示されている。

(J. D. Barrow)

- (4) ミリ秒パルサー

ミリ秒パルサーからの timing residual がすべて重力波によるものだと考えると重力波のエネルギー密度に制限がつく。Taylor によると PSR 1937+21 からの制限

\* 早大理工 Keiichi Maeda: Background Gravitational Radiation

は角振動数  $\omega \sim (1-3) \times 10^{-8}$  Hz の範囲で  $\Omega_g \leq (1.5-50) \times 10^{-6}$  である (1987).

また連星パルサーに対しては軌道周期もその変化まで含め良い精度で観測されている。これから異なる周波数域 ( $\omega \sim 10^{-8} \sim 10^{-13}$  Hz) で同様の制限が与えられる。現在の制限は  $\Omega_g \leq 2$  程度であるが、軌道周期変化率の精度が現在の  $(5 \times 10^9 \text{ yrs})^{-1}$  から  $(10^{12} \text{ yrs})^{-1}$  になれば  $\Omega_g \leq 10^{-4}$  に下がる。

(5) 3K 背景放射の非等方性

宇宙背景重力波が存在すれば、Sachs-Wolfe effect を通して 3K 背景放射の等方性に影響を与える。非等方性の観測上限からその対応するスケール (波長  $\sim 100 \text{ kpc} - 1000 \text{ Mpc}$ ) のエネルギー密度が  $\Omega_g \leq 10^{-8}$  に制限される。ただし、赤方偏移が  $z \sim 2-3$  のあたりで生成された重力波に関しては  $\Omega_g \leq 10^{-3}$  である。

以上をまとめると図 1 になる。参考のため、LIGO と Doppler tracking による観測可能域 (目標) を示した。

2. 理論的予想

(1) Primordial gravitational waves

(i) Plank time  $t_{PL}$  に熱平衡を仮定  $\rightarrow T_g \sim 1K$  つまり  $\Omega_g \sim 10^{-8}$  at  $\lambda \sim 1 \text{ cm}$

(ii) 重力子の量子生成. 状態方程式が stiff だと非常に efficient で  $\lambda \sim 1 \text{ cm}$  程度の重力波が  $\Omega_g \sim 1$  程度生成される。一方、状態方程式が soft だと、 $\lambda \sim 1 \text{ cm} - 10^{19} \text{ cm}$  の範囲で重力子の生成が起こることが期待されるが、 $\Omega_g$  は小さい。(Grishchuk)

(2) 天体 (主にブラックホール) 形成時に生成される重力波 (M. J. Rees)

(i) pre-galactic (図 2 A, B, C & D)

A: 非等方宇宙などでの原始ブラックホールの形成

B: 冷たい (又は温かい) 宇宙モデルでの原始ブラックホールの形成

C: Direct collapse of the objects which bind after decoupling

D: Collapse of the pregalactic stars into which ob-

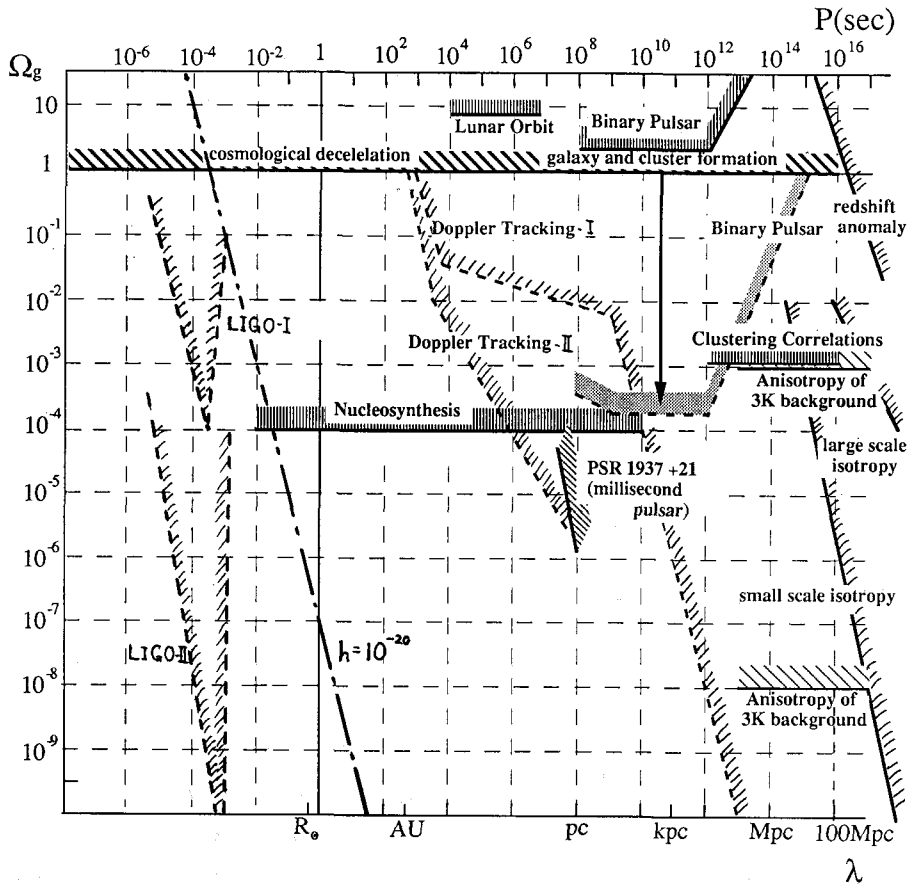


図 1

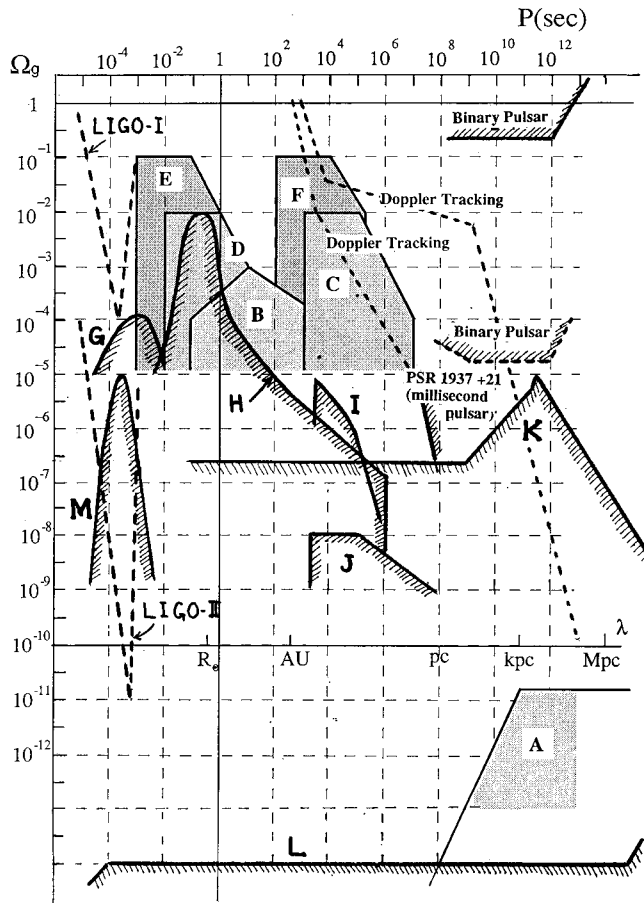


図 2

jects binding at decoupling fragment

(ii) post-galactic (図 2 E, F, G, H, I & J)

E: Black hole formation associated with a first generation of galactic stars

F: Black hole formation associated with the collapse of dwarf galaxies

Others (G: Pulsars, H: Dying Binaries, I: Binaries & J: Accretion onto large black holes)

(3) その他

(i) Cosmic String (図 2 K)

銀河形成シナリオの一つに宇宙の相転移に伴う宇宙ひもを使ったものがある。宇宙ひもは銀河の種を集めたあと重力波を放出して消滅するが、その重力波は上述のミリ秒パルサーの timing residual の観測で確認可能なところにくる。

(ii) Inflation

一般にインフレーションが存在するとそれ以前に存在

したバックグラウンド重力波は大幅に減少する (図 2 L)。一方, extended inflation (Brans-Dicke 理論を基礎にした old inflation) によると, 相転移終了時に多くの泡が衝突するので, 大量の重力波がそのとき生成される可能性がある。Turner と Wilczek によると, 次世代の LIGO で観測可能になる。(図 2 M)

参 考 文 献

- 1) B. J. Carr, *A & Ap.* **89** (1980) 6.
- 2) M. J. Rees, in *Gravitational Radiation* ed. by N. Deruelle and T. Piran (1983).
- 3) R. W. Romani and J. H. Taylor, *Ap. J.* **265** (1983) L35. J. H. Taylor, in *13th Texas Symposium* (1987).
- 4) E. V. Linder, *Ap. J.* **326** (1988) 517, **328** (1988) 77.
- 5) C. J. Hogan and M. J. Rees, *Nature* **311** (1984) 109.
- 6) R. H. Bandenberger, A. Albrecht and N. Turok, *Nucl. Phys.* **B277** (1986) 605.
- 7) M. S. Turner and F. Wilczek, *Phys. Rev. Lett.* **65** (1991) 3080.