Universality and wave absorption in high-energy collisions of spinning black holes

U. Sperhake

DAMTP, University of Cambridge

7<sup>th</sup> Gulf Coast Gravity Meeting, Oxford, MS 19<sup>th</sup> April 2013

U. Spenhake (DAMTP, University of Cambri Universality and wave absorption in high-energy collisions of spinning black holes

< ロ > < 同 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ >

- Motivation
- Setup
- Results
- Conclusions and outlook

#### ・ロ・・西・・ヨ・ ・ヨ・ うへの

C. Speniake (DAMTP, University of Cambrid Universality and wave absorption in high-energy collisions of spinning black holes

#### The Hierarchy Problem of Physics

- Gravity  $\approx 10^{-39} \times$  other forces
- Higgs field  $\approx \mu_{obs} \approx 250 \text{ GeV} = \sqrt{\mu^2 \Lambda^2}$ where  $\Lambda \approx 10^{16} \text{ GeV}$  is the grand unification energy
- Requires enormous finetuning!!!
- Finetuning exist: <u>987654321</u> = 8.0000000729
- Or *E<sub>Planck</sub>* much lower? Gravity strong at small *r*?
  ⇒ BH formation in high-energy collisions at LHC
- Gravity not measured below 0.16 mm! Diluted due to...
  - Large extra dimensions Arkani-Hamed, Dimopoulos & Dvali '98

<ロ> < 同 > < 同 > < 三 > < 三 > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > <

• Extra dimension with warp factor Randall & Sundrum '99

D Specially (DAMTR University of Cambr Universality and wave absorption in high-energy collisions of spinning black holes

# Motivation (High-energy physics)

#### **Black Holes on Demand**

Scientists are exploring the possibility of producing miniature black holes on demand by smashing particles together. Their plans hinge on the theory that the universe contains more than the three dimensions of everyday life. Here's the idea:



As the particles approach in a particle accelerator, their gravitational attraction increases steadily. When the particles are extremely close, they may enter space with more dimensions, shown above as a cube. The extra dimensions would allow gravity to increase more rapidly so a black hole can form.

Such a black hole would immediately evaporate, sending out a unique pattern of radiation.

・ロッ ・ 一 ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・

Matter does not matter at energies well above the Planck scale
 ⇒ Model particle collisions by black-hole collisions
 Banks & Fischler '99; Giddings & Thomas '01

Dispensive (DAMTP, University of Cambrid Universality and wave absorption in high-energy collisions of spinning black holes

## Experimental signature at the LHC

Black hole formation at the LHC could be detected by the properties of the jets resulting from Hawking radiation.

- Multiplicity of partons: Number of jets and leptons
- Large transverse energy
- Black-hole mass and spin are important for this!



・ロト ・ 同ト ・ ヨト ・ ヨト

#### ToDo:

- Exact cross section for BH formation
- Determine loss of energy in gravitational waves
- Determine spin of merged black hole

D Spechake (DAMTP, University of Cambr Universality and wave absorption in high-energy collisions of spinning black holes

#### Does matter "matter"?

- Banks & Fischler '99; Giddings & Thomas '01
- Einstein plus minimally coupled, massive, complex scalar filed

"Boson or fluid stars" Pretorius & Choptuik '09, East & Pretorius '12



- BH formation threshold:  $\gamma_{thr} = 2.9 \pm 10 \% \sim 1/3 \gamma_{hoop}$
- Model particle collisions by BH collisions

U. Spechake (DAMTP, University of Cambridge Universality and wave absorption in high-energy collisions of spinning black holes

### BH collisions: Computational framework

- Focus here: *D* = 4 dimensions
- "Moving puncture" technique Goddard '05, Brownsville-RIT '05
- BSSN formulation; Shibata & Nakamura '95, Baumgarte & Shapiro '98
- 1 + log slicing, Γ-driver shift condition
- Puncture ini-data; Bowen-York '80; Brandt & Brügmann '97; Ansorg et al. '04
- Mesh refinement Cactus, Carpet
- Wave extraction using Newman-Penrose scalar
- Apparent Horizon finder; e.g. Thornburg '96

U. Spentake (DAMTP, University of Cambe Universality and wave absorption in high-energy collisions of spinning black holes

<ロ> < 同 > < 同 > < 三 > < 三 > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > <

#### Initial setup: 1) Aligned spins

- Orbital hang-up Campanelli et al. '06
- 2 BHs: Total rest mass:  $M_0 = M_{A, 0} + M_{B, 0}$ Boost:  $\gamma = 1/\sqrt{1 - v^2}$ ,  $M = \gamma M_0$
- Impact parameter:  $b \equiv \frac{L}{P}$



U. Spendate (DAUTE: University of Cemby Universality and wave absorption in high-energy collisions of spinning black holes

◆□ > ◆□ > ◆豆 > ◆豆 > 「豆 - 釣へ(?)

#### Initial setup: 2) No spins

- Orbital hang-up Campanelli et al. '06
- 2 BHs: Total rest mass:  $M_0 = M_{A, 0} + M_{B, 0}$ Boost:  $\gamma = 1/\sqrt{1 - v^2}$ ,  $M = \gamma M_0$
- Impact parameter:  $b \equiv \frac{L}{P}$



U. Spentake (DAMTP, University of Cambr Universality and wave absorption in high-energy collisions of spinning black holes

◆□ ▶ ◆□ ▶ ◆ 三 ▶ ◆ 三 ● ● ● ●

#### Initial setup: 3) Anti-aligned spins

- Orbital hang-up Campanelli et al. '06
- 2 BHs: Total rest mass:  $M_0 = M_{A, 0} + M_{B, 0}$ Boost:  $\gamma = 1/\sqrt{1 - v^2}$ ,  $M = \gamma M_0$
- Impact parameter:  $b \equiv \frac{L}{P}$



#### U. Scenake (DANTP: University of Cambri Universality and wave absorption in high-energy collisions of spinning black holes

◆□ ▶ ◆□ ▶ ◆ 三 ▶ ◆ 三 ● ● ● ●

# Head-on: b = 0, $\vec{S} = 0$

• Total radiated energy:  $14 \pm 3$  % for  $\nu \rightarrow 1$  US *et al.* '08

About half of Penrose '74



Agreement with approximative methods

Flat spectrum, multipolar GW structure

Berti et al. '10

U. Spentake (DAMTP, University of Cambr Universality and wave absorption in high-energy collisions of spinning black holes

# Grazing: $b \neq 0$ , $\vec{S} = 0$ , $\gamma = 1.52$

- Radiated energy up to at least 35 % M
- Immediate vs. Delayed vs. No merger

US, Cardoso, Pretorius, Berti, Hinderer & Yunes '09



U. Speritake (DAMTP, University of Cambrid Universality and wave absorption in high-energy collisions of spinning black holes

# Scattering threshold $b_{scat}$ for D = 4, $\vec{S} = 0$

- $b < b_{scat} \Rightarrow Merger$ 
  - $b > b_{scat} \Rightarrow Scattering$
- Numerical study:  $b_{\text{scat}} = \frac{2.5 \pm 0.05}{v} M$ Shibata. Okawa & Yamamoto '08
- Independent study by US, Pretorius, Cardoso, Berti *et al.* '09, '12  $\gamma = 1.23...2.93$ :
  - $\chi = -0.6, 0, +0.6$  (anti-aligned, nonspinning, aligned)
- Limit from Penrose construction: b<sub>crit</sub> = 1.685 M
  Yoshino & Rychkov '05

U. Spenhake (DAMTP, University of Cambr Universality and wave absorption in high-energy collisions of spinning black holes

◆□ ▶ ◆□ ▶ ◆ □ ▶ ◆ □ ▶ ● ● ● ● ●

### Scattering threshold and radiated energy





- At speeds  $v \gtrsim 0.9$  spin effects washed out
- $E_{rad}$  always below  $\lesssim 50 \% M$

U. Spechake (DAMTP, University of Cambridge black holes)

#### Absorption

- For large  $\gamma$ :  $E_{kin} \approx M$
- If Ekin is not radiated, where does it go?
- Answer:  $\sim$  50 % into  $E_{rad}$ ,  $\sim$  50 % is absorbed

US, Berti, Cardoso & Pretorius '12



U. Spendake (DAMTP, University of Cambe Universality and wave absorption in high-energy collisions of spinning black holes

### Conclusions and outlook

- Strong gravity ⇒ particle collisions well modeled by BH collisions
- Numerical simulations of BH collisions with spins in D = 4
- Spin effects washed out at large boosts
- E<sub>rad</sub> saturates near ~ 50 % M
- Rest of *E<sub>kin</sub>* absorbed
- Structure of colliding particles negligible
- Assumption  $M_{BH} = \mathcal{O}(1)M$  is good!
- TODO: *D* > 4, electric charge

<ロ> < 同 > < 同 > < 三 > < 三 > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > <