

Czarne Dziury w Laboratorium?

WIESŁAW PŁACZEK

Instytut Informatyki Uniwersytetu Jagiellońskiego

Plan:

- **Co to są czarne dziury?**
- **Problem hierarchii i dodatkowe wymiary przestrzenne.**
- **Produkcja czarnych dziur w akceleratorach cząstek.**
- **Sygnaly eksperymentalne czarnych dziur.**
- **Podsumowanie.**

„Czarne dziury to najbardziej niezwykłe obiekty w kosmosie – wieczna pułapka dla materii i światła, żarłoczna osobliwość, być może wrota do innych światów ...”

I. Nowikow, „Czarne dziury i Wszechświat”

- **1915: Schwarzschild** – rozwiązanie dla statycznego, sferycznie symetrycznego pola grawitacyjnego w pustej czasoprzestrzeni wokół obiektu o dużej masie (np. gwiazdy).

→ „Patologiczne” zachowanie dla obiektów o promieniu $r = r_h$:

$$r_h = \frac{2GM}{c^2} \quad (\text{promień Schwarzschilda})$$

(G – stała grawitacyjna, c – prędkość światła w próżni, M – masa obiektu)

Dla $r < r_h$ nic nie może się wydostać na zewnątrz (nawet światło!)

⇒ *kolaps grawitacyjny* (Oppenheimer & Snyder, 1939)

→ Powierzchnia (sfera) o promieniu r_h – *horyzont Schwarzschilda*.

Słońce: $r_h \approx 3\text{km}$,

Ziemia: $r_h \approx 1\text{cm}$,

neutron: $r_h \approx 10^{-54}\text{m}$.

?? **Prawdziwy efekt fizyczny czy tylko patologia współrzędnych Schwarzschilda?**

(załamują się dla $r \rightarrow r_h$)

- **1960: Współrzędne Kruskala–Szekeres** – opis zjawisk dla $r \leq r_h$
→ potwierdzenie istnienia horyzontu Schwarzschilda.
- **Koniec lat 60-tych: Wheeler – termin** „czarna dziura” (*ang.* black hole).
- **1974: Hawking – kwantowomechaniczna emisja promieniowania przez czarne dziury.**

Zasada nieoznaczoności Heisenberga: $\Delta E \Delta t \gtrsim \hbar$

(ΔE – niepewność energii cząstki przebywającej w stanie kwantowomechanicznym przez czas Δt ; \hbar – stała Plancka).

▷ Fluktuacja w pobliżu r_h → para cząstek, np. fotonów: jeden dostaje się pod horyzont i zostaje „wessany” przez czarną dziurę, a drugi ucieka na zewnątrz
⇒ widmo promieniowania ciała doskonale czarnego o temperaturze:

$$T_H = \frac{\hbar}{8\pi k M} \quad (k - \text{stała Boltzmanna}).$$

Np. dla $M = M_\odot$ (masa słońca): $T_H \approx 10^{-7} \text{ K}$;

czas życia: $\tau_H \approx 10^{64}$ lat.

↪ Efekt zaniedbywalny dla dużych czarnych dziur!

Ewidencja eksperymentalna

Czarną dziurą może stać się dostatecznie masywna gwiazda, $M \gtrsim 3M_{\odot}$ po wyczerpaniu paliwa jądrowego – drogą kolapsu grawitacyjnego.

→ **Silne przesłanki obserwacyjne poparte argumentami teoretycznymi:**

- **układy podwójne** – widoczna gwiazda + niewidoczny masywny obiekt
- **centra galaktyk** – czarne dziury o masach $\gtrsim 10^6 M_{\odot}$ (z pomiarów prędkości rotacji)
- **kwazary?** (aktywne jądra galaktyk prawdopodobnie zawierające czarne dziury)

Jednostki: $\hbar = c = 1$

► Stała grawitacyjna: $G = L_P^2 = 1/M_P^2$

$L_P \approx 10^{-33}$ cm – długość Plancka, $M_P \approx 10^{19}$ GeV – masa Plancka

(określają charakterystyczną skalę dla grawitacji)

⇒ Grawitacja bardzo słaba! (np. przyciąganie grawitacyjne między dwoma elektronami jest ok. 42 rzędy wielkości słabsze od ich odpychania elektrostatycznego)

► Dla oddziaływań elektroślabych:

$L_{EW} \approx 10^{-17}$ cm, $M_{EW} = 1$ TeV (10^3 GeV)

Problem hierarchii:

Skala elektroślaba ← 16 rzędów wielkości → **Skala Plancka (grawitacji)**

→ **Model Standardowy** – aby był prawdziwy do skali Plancka – wymaga subtelnego dostrojenia parametrów!

Dopiero dla energii $E \approx 10^{19}$ GeV siła grawitacji staje się porównywalna z siłą pozostałych oddziaływań → nieosiągalne dla akceleratorów cząstek!

Dlaczego grawitacja taka słaba?

• Arkani-Hamed, Dimopoulos, Dvali (1998): „Dodatkowe duże wymiary”

Może grawitacja „czuje” więcej wymiarów przestrzennych, normalnie niewidocznych bo zwiniętych w pętle o bardzo małym promieniu?

► Załóżmy istnienie n dodatkowych wymiarów o promieniu R :

→ Potencjał grawitacyjny:
$$V(r) = G_n \frac{m_1 m_2}{r^{n+1}} \quad \text{dla } r \ll R,$$

$$V(r) = \frac{G_n}{R^n} \frac{m_1 m_2}{r} \quad \text{dla } r \gg R,$$

(G_n – stała grawitacyjna w $(4 + n)$ wymiarowej czasoprzestrzeni)

⇒ Stała grawitacyjna w 4 wymiarach: $G = \frac{G_n}{R^n}$

► Przypuśćmy, że w $(4 + n)$ wymiarach: Skala grawitacji = Skala elektroslaba

tzn. $G_n = L_{EW}^{n+2} \Rightarrow R = L_{EW} \left(\frac{L_{EW}}{L_P} \right)^{\frac{2}{n}} \approx 10^{\frac{32}{n}-17} \text{cm}$

n	1	2	3	4	5	6
$R \approx$	10^{10}km	1mm	10nm	10pm	0.1pm	10fm

$n = 1$ – wykluczone (np. dynamika Układu Słonecznego)

$n = 2$ – obecnie sprawdzane w eksperymentach typu Cavendisha, Eötvösha, etc.

$n \geq 2$ – może być badane w eksperymentach fizyki cząstek!

► Co z pozostałymi oddziaływaniami?

→ Nie „czują” dodatkowych wymiarów! – **Dlaczego?**

Wyjaśnienia może dostarczyć teoria strun:

cząstki \longleftrightarrow struny (zamknięte lub otwarte)

dodatkowe struktury – brany (tzn. wielowymiarowe membrany)



gravitony \longleftrightarrow zamknięte struny – mogą poruszać się w całej przestrzeni

pozostałe cząstki \longleftrightarrow otwarte struny – o końcach „przytwierdzonych” do
4-wymiarowej brany

→ Tylko grawitacja czuje wszystkie wymiary, pozostałe oddziaływania, cząstki (również my) „uwięzione” na 4-wymiarowej (czasoprzestrzennej) branie.

► Pytania:

– **Dlaczego dodatkowe wymiary takie duże, co je stabilizuje?**

→ W teorii strun „naturalne” rozmiary dodatkowych wymiarów, to $R \approx 10^{-33}$ cm.

- Randal & Sundrum (1999): „Spaczone geometrie”

Rozwiązanie równań Einsteina w 5-wymiarowej czasoprzestrzeni wokół 4-wymiarowej brany → przestrzeń anty-de Sittera (AdS), tzn. przestrzeń o ujemnej energii próżni (stałej kosmologicznej)

- ▶ Geometria czasoprzestrzeni silnie zakrzywiona („spaczona”; *ang.* „warped”)

- 4-wymiarowa grawitacja słabnie eksponencjalnie z odległością od brany

- grawitacja skoncentrowana blisko brany (tzw. brany Plancka)

- dodatkowy wymiar może być duży (nawet nieskończony).

- ▶ Przypuśćmy, że są dwie 4-brany w 5-ciu wymiarach:

- 1) **Brana Plancka** – niedostępna dla nas pułapkująca grawitację

- 2) **Brana TeV** – na której my żyjemy, w pewnej odległości (y) od brany Plancka;

grawitacja na tej branie jest osłabiona eksponencjalnie przez tzw.

„czynnik spaczenia” $\sim e^{-y/R}$ (R – tzw. długość krzywizny).

- Wyjaśnienie dla problemu hierarchii!

- ▶ Teoria bardzo intensywnie rozwijana w ostatnich latach

- Wiele odmian próbujących rozwiązać różne problemy fizyki cząstek, kosmologii, etc.

▶ **Skala grawitacji** $\sim \text{TeV}$ \Rightarrow mikro czarne dziury o masie $M_{\bullet} \gtrsim 1 \text{TeV}$

→ **Możliwość produkcji w przyszłych akceleratorach cząstek!**

● **Large Hadron Collider (LHC)** w CERN, Genewa; planowany start: 2007 (?)

→ zderzenia proton-proton przy energiach w środku masy $\sqrt{s} = 14 \text{TeV}$.

● **Produkcja czarnych dziur w zderzeniach cząstek**

→ Problem mało dotąd zbadany, zwłaszcza w odniesieniu do grawitacji w $(4 + n)$ wymiarach – dopiero ostatnio zaczęto go dokładniej studiować.

▶ **Podejście semiklasyczne** pozwala oszacować przekrój czynny na produkcję czarnych dziur w zderzeniach wysokich energii i opisać ich główne sygnały eksperymentalne – ale przy pewnych założeniach!

→ **Przybliżenia semiklasyczne** wymaga odpowiednio masywnych czarnych dziur:

$$M_{\bullet} \gtrsim 5M_P, \quad \text{tzn. dla } M_P = 1 \text{TeV: } M_{\bullet} \gtrsim 5 \text{TeV}$$

– wtedy można zaniedbać efekty kwantowej grawitacji (całkowicie nieznane!)

→ **Dodatkowo:**

$$r_h \ll R \quad (R - \text{rozmiar dodatkowych wymiarów})$$

– rozwiązanie dla płaskiej czasoprzestrzeni

► **Przekrój czynny na produkcję czarnych dziur w zderzeniach proton-proton:**

$$\sigma_{pp \rightarrow \bullet + X}(M_{min}, s) = \sum_{ij} \int_{\tau_m}^1 d\tau \int_{\tau}^1 \frac{dx}{x} f_i(x) f_j(\tau/x) \sigma_{ij \rightarrow \bullet}(\tau s)$$

gdzie: $\tau = x_i x_j$, $f_i(x)$ – funkcje struktury (gęstości partonowe),

M_{min} – minimalna masa czarnej dziury, dla której ten opis się stosuje;

$\sigma_{ij \rightarrow \bullet}$ – partonowy przekrój czynny.

→ Z argumentów geometrycznych (hipoteza Thorne'a):

$$\sigma_{ij \rightarrow \bullet} \approx \pi r_h^2(\sqrt{s})$$

gdzie r_h – promień Schwarzschilda dla $(4 + n)$ wymiarów:

$$r_h(M_{\bullet}) = \frac{1}{\sqrt{\pi} M_P} \left[\frac{M_{\bullet}}{M_P} \left(\frac{8\Gamma(\frac{n+3}{8})}{n+2} \right) \right]^{\frac{1}{n+1}}$$

tzn. jeżeli parametr zderzenia partonów $b \leq r_h \rightarrow$ czarna dziura o masie M_{\bullet} .

→ Przekrój czynny rośnie z energią: $\sigma \sim s^{\frac{1}{n+1}}$.

► **LHC:** → dla $M_{\bullet} \geq 5\text{TeV}$: ~ 1 czarna dziura na sekundę,

→ dla $M_{\bullet} \geq 10\text{TeV}$: ~ 3 czarne dziury na dzień.

LHC – fabryka czarnych dziur!

Co dzieje się z mikro czarną dziurą po wyprodukowaniu?

→ **Zaczyna się rozpadać!**

- Rozpad czarnej dziury można podzielić na 3 etapy:

I etap: „Łysienie”

Formowanie czarnej dziury – gwałtowny proces → „włochata” czarna dziura, tzn. obdarzona „fryzurą” momentów multipolowych

– Czarna dziura traci „włosy” (momenty multipolowe) emitując głównie promieniowanie grawitacyjne (ewentualnie kilka gluonów)

→ Na tym etapie czarna dziura traci ok. 15% masy.

Końcowy efekt: rotująca czarna dziura, tzw. dziura Kerra.

▶ **Sygnaly eksperymentalne: praktycznie niewidoczne!**

II etap: „Parowanie” – przez promieniowanie Hawkinga

▶ Dwie fazy:

a) **Wyhamowywanie rotacji** – czarna dziura **pozbywa się krętu** emitując kwanty promieniowania o kręcie $l = m \sim 1$ i energii $E \sim 1/r_h$.

Końcowy efekt: czarna dziura **Schwarzschilda**

b) Faza Schwarzschilda – strata ok. 75% energii

→ Emisja głównie cząstek Modelu Standardowego: kwarków i gluonów ($\approx 70\%$)
leptonów ($\approx 10\%$), fotonów ($\approx 1\%$) – rozkład izotropowy.

→ Temperatura Hawkinga:

$$T_H \approx \frac{n+1}{4\pi r_h} \quad (\text{np. dla } M_\bullet = 10 \text{ TeV}, n = 6: T_H \approx 150 \text{ GeV})$$

► Sygnaly eksperymentalne:

Przypadki o dużych krotnościach (10–100) twardych ($E \sim 100\text{--}200 \text{ GeV}$)
strumieni hadronowych i leptonów.

III etap: Faza Plancka – całkowity rozpad czarnej dziury

Kiedy masa czarnej dziury spada do $M_\bullet \approx M_P$ opis Hawkinga załamuje się

– istotne stają się efekty kwantowej grawitacji!

→ Prawdopodobnie rozpad na kilka kwantów o energiach $\mathcal{O}(M_P)$.

► Sygnaly eksperymentalne: Kilka najbardziej energetycznych kwantów.

→ Informacja o naturze kwantowej grawitacji!

Rozpady czarnych dziur powinny być dość spektakularne!

- W obecności dodatkowych dużych wymiarów przestrzennych skala Plancka może być równa skali oddziaływań elektroslabych, tzn. $\approx 1 \text{ TeV}$.
- Jedną z konsekwencji skali Plancka $\approx 1 \text{ TeV}$ jest możliwość produkcji mikro czarnych dziur w przyszłych akceleratorach cząstek.
→ Np. **LHC** może być prawdziwą fabryką czarnych dziur!
- Mikro czarne dziury powinny rozpadać się (wyparowywać) głównie przez promieniowanie Hawkinga
→ Sygnały eksperymentalne w postaci przypadków o dużej krotności (10–100) strumieni hadronowych i leptonów (z małym tłem).
- Produkty rozpadu czarnych dziur mogą dostarczyć ważnych informacji nt. natury czarnych dziur, kwantowej grawitacji, etc.
- ▶ **Czy grozi nam jakieś niebezpieczeństwo?** (np. jeżeli Hawking się myli?!)
Jeżeli powyższe teorie są prawdziwe, to czarne dziury produkowane są w naszej atmosferze przez promienie kosmiczne, np. dla $M_{\bullet} \geq 10 \text{ TeV}$: $\approx 100/\text{rok}$,
(dotychczasowe eksperymenty zbyt mało czułe, przyszłe mają szansę).