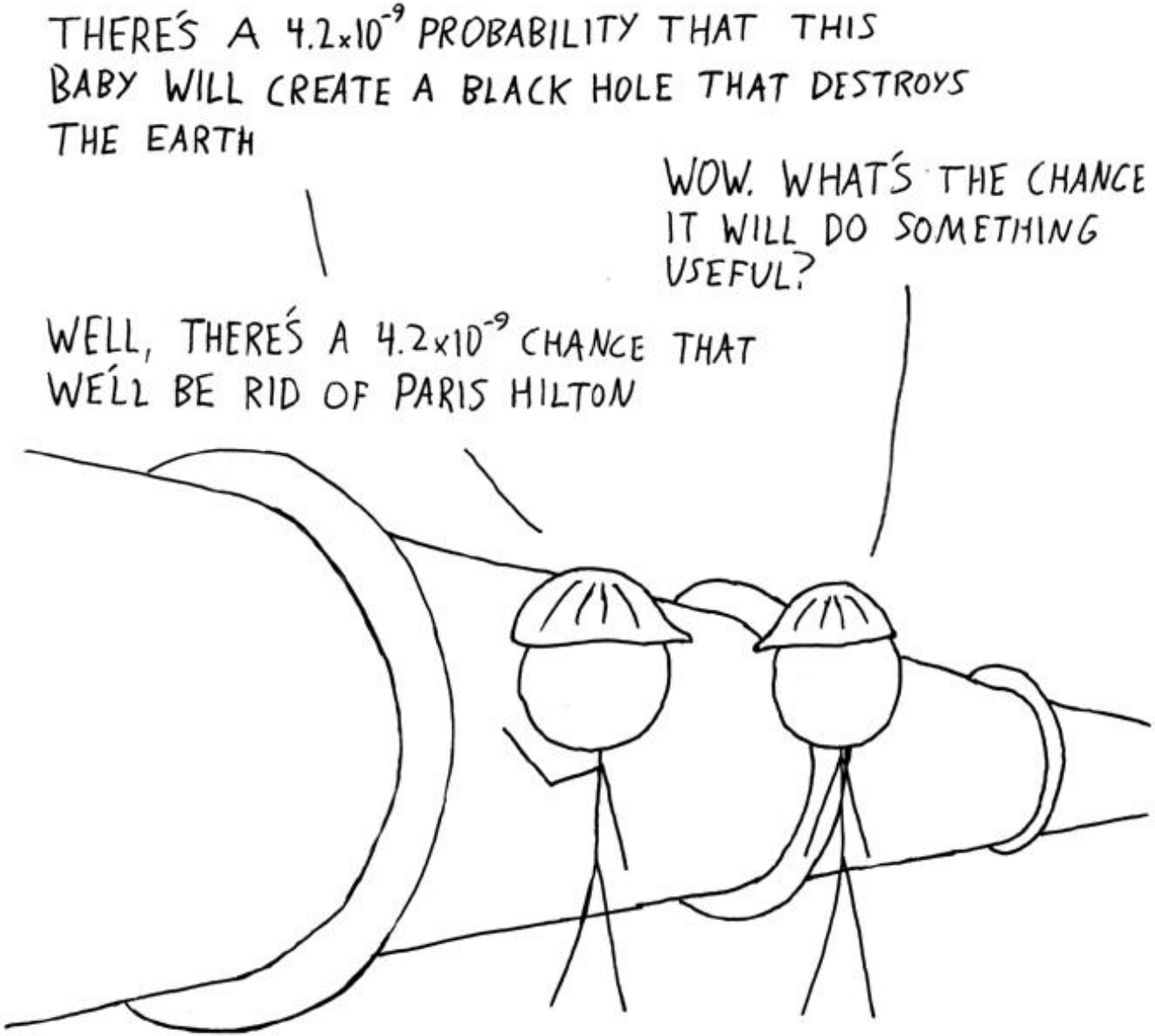
„Physics at LHC“
Mini Schwarze Löcher am ATLAS-Detektor

Matthias Kilgenstein

Seminar am
21.01.2009


THERE'S A 4.2×10^{-9} PROBABILITY THAT THIS BABY WILL CREATE A BLACK HOLE THAT DESTROYS THE EARTH
WOW. WHAT'S THE CHANCE IT WILL DO SOMETHING USEFUL?
WELL, THERE'S A 4.2×10^{-9} CHANCE THAT WE'LL BE RID OF PARIS HILTON

Was sind Schwarze Löcher?

Schwarze Löcher an Beschleunigern

Nachweis am Atlas-Detektor

Zusammenfassung

- Allgemeine Relativitätstheorie $\Rightarrow$ jede Form von Energie erzeugt eine Raumzeitkrümmung
- Bei einem Schwarzen Loch nimmt die Krümmung von außen nach innen immer mehr zu und wird schließlich im Zentrum des Loches unendlich. Dieser Ort nennt man Singularität.
  $\Rightarrow$ Schwarzschildradius (Ereignishorizontradius)

$$R_S = 2GM/c^2$$

- Ein Objekt wird als Schwarzes Loch bezeichnet, wenn seine gesamte Masse innerhalb des R_S liegt.
- Ein Schwarzes Loch verliert bei der Entstehung sämtliche Information darüber, aus was es entstanden ist

  $\Rightarrow$ nur noch durch Masse und Spin charakterisiert.

- z.B.: Größe des R_S für ein schwarzes Loch von einer Sonnenmasse $M_\odot$:
  $G = 6,67 \cdot 10^{-11} m^3 kg^{-1} s^{-2}$
  $M_\odot = 1,9891 \cdot 10^{30}\,\mathrm{kg}$

  $R_S = 2GM/c^2 = 2,9km$

- Dichte:

$$\rho = \frac{M}{V} = \frac{M}{\frac{3}{4}\pi R_S^3} \propto \frac{1}{M^2}$$

  - Je kleiner die Masse, desto höher die Dichte.

Stephen Hawking postulierte 1974, dass Schwarze Löcher strahlen:

- der Ereignishorizont eines Schwarzen Lochs wird durch Lichtstrahlen gebildet, die dem Schwarzen Loch weder entkommen noch hineinstürzen.
- die Lichtstrahlen können sich einander nicht nähern
  $\Rightarrow$ Fläche des Ereignishorizonts muss gleichbleiben oder wachsen
- Errinnert an Entropie $\Rightarrow$ 2. Hauptsatz der Thermodynamik
  - Schwarzes Loch muss Entropie besitzen
    $\Rightarrow$ es muss eine Temperatur haben

$\Rightarrow$ Schwarze Löcher müssen strahlen

Virtuelle Teilchen

- Im Vakuum entstehen durch Quantenfluktuationen ständig virtuelle Teilchen-Antiteilchen-Paare - eines negativer, das andere positiver Energie
- Diese Paare können auch am Ereignishorizont entstehen, wobei eines den Ereignishorizont überschreiten kann.

Reale Teilchen

- reale Teilchen besitzen positive Energie
  - Abschwächen der Energie durch Gravitationsfeld
    $\longrightarrow$ im SL wird die Energie realer Teilchen sogar negativ

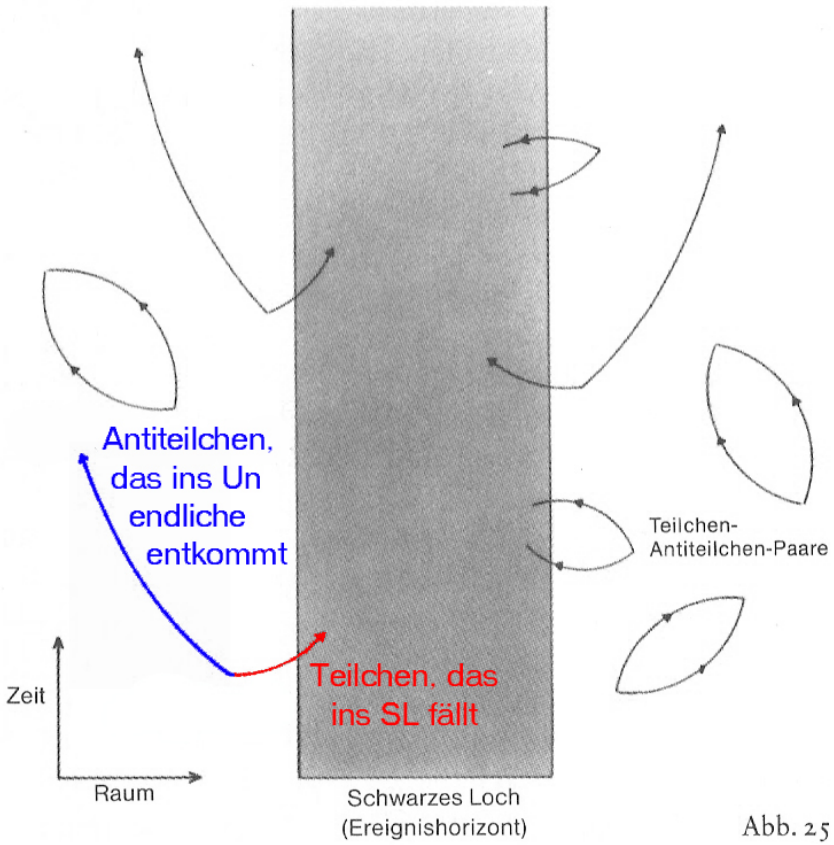


Abb. 25

- Virtuelles Teilchen negativer Energie wird im SL real
  $\longrightarrow$ Verringerung der Masse
- Virtuelles Teilchen positiver Energie entkommt
  $\longrightarrow$ Strahlung
- je kleiner das SL desto Unwahrscheinlicher ist es, dass das 2. Teilchen auch hineinfällt $\Rightarrow$ desto höhere Emissionsrate

Verlust von Masse

- Fläche des Ereignishorizonts wird kleiner
  $\longrightarrow$ Entropieeinbuße $\longrightarrow$ Ausgleich durch Entropie der Strahlung
- Erhöhung der Temperatur und Emissionstätigkeit

$$T = \frac{\hbar c^3}{8\pi k_B G M}$$

z.B. $T_{M_\odot} = 62nK \ll 2,7K$

z.B. $T_{Mini} = 1,5 \cdot 10^{29} K$

$\Rightarrow$ verstärkte Abnahme von Masse

Lebensdauer

$$\Delta t = \frac{M^3}{3\Lambda_t} \text{ mit } \Lambda_t = 3,968 \cdot 10^{15} \frac{kg^3}{s}$$

z.B. $\Delta t_{M_\odot} = 2,1 \cdot 10^{67} Jahre$

z.B. $\Delta t_{Mini} \approx 10^{-27} s$

Einteilung nach Masse und Art der Entstehung:

- **Primordiales SL** kann beim Urknall entstanden sein
  - M bis zu M_{Mond}
- **Stellares SL** entsteht durch Supernovä
  - M $10M_{\odot}$
- **Supermassives SL** im Zentrum von Galaxien entsteht durch Akkretion
  - M $10.000–10^{9}M_{\odot}$
- **Mini SL** kann an Beschleunigern entstehen
  - M $TeV - Bereich$

Quantenmechanische Einschränkungen:

- Mindestmasse: Planck-Masse
  Sollte ein einziges Teilchen diese Masse haben, werden sowohl Effekte der Quantentheorie als auch der ART wichtig
  $\Rightarrow$ Quantengravitation

$$m_p = \sqrt{\frac{\hbar c}{G}} = 1.2 \cdot 10^{19} GeV$$

- Heisenberg'sche Unschärferelation:

$$\Delta x \Delta p \geq \frac{\hbar}{2} \Rightarrow \Delta x \geq \frac{\hbar}{2mc}$$

- Unschärfe bei SL:

$$\Delta x < R_S \Rightarrow \Delta x < \frac{2GM}{c^2} \Rightarrow m \geq \sqrt{\frac{\hbar c}{4G}} \sim m_p$$

- Masse eines SLs kann nicht kleiner sein als $m_p \sim 10^{19} GeV$
- Beschleuniger erreichen eine Schwerpunktsenergie von $E \sim 10^4 GeV$
  $\longrightarrow$ Fehlen von 15 Größenordnungen (Hierarchieproblem)

Lösung:

- Der für die Planck-Masse angegebene Wert beruht auf der Annahme, dass sich an der Gravitation bis zu dieser Skala nichts ändert.
- Hypothese: Es gibt mehr als die uns bekannten 3 Raum-Dimensionen.

Newton'sches Gravitationsgesetz in Orts-Dimensionen:

- in 3 Dimensionen:

$$F = G\frac{m_1 \times m_2}{r^2}$$

- in 2 Dimensionen:

$$F \sim \frac{m_1 \times m_2}{r}$$

- in 1 Dimension:

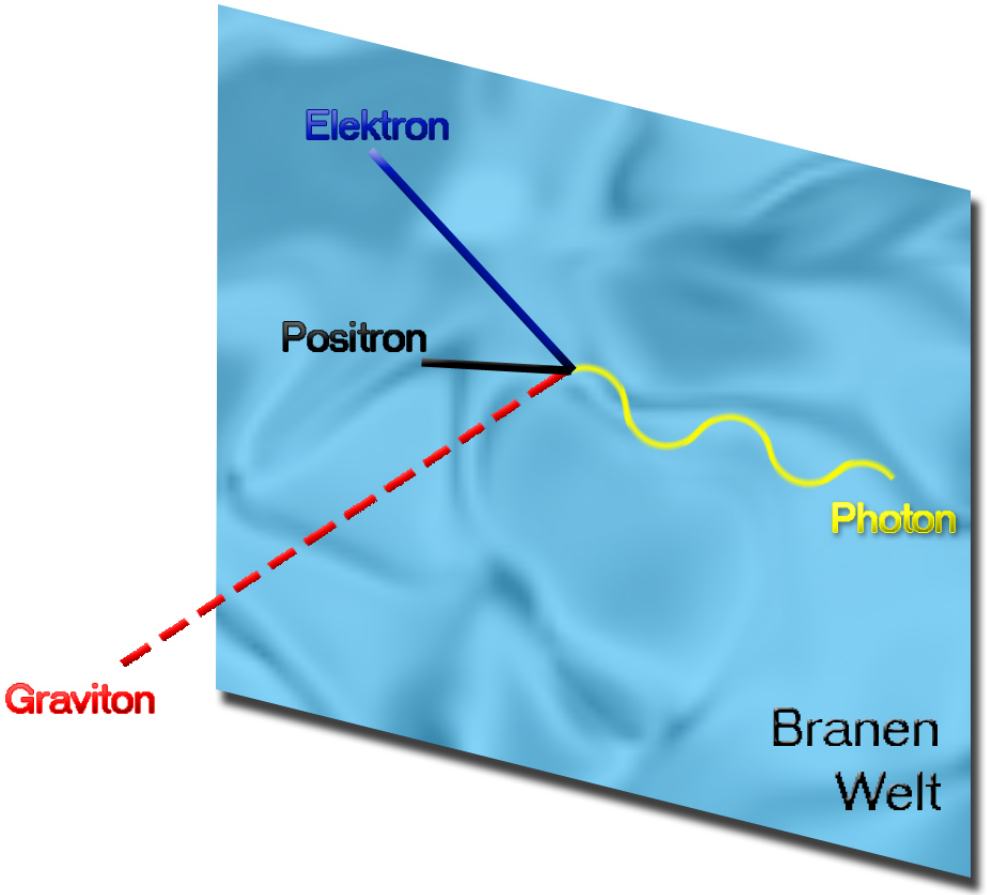
$$F \sim m_1 \times m_2$$

$\Rightarrow$Abhängigkeit von Anzahl der Dimensionen

- in n-Dimensionen:

$$F = G\frac{m_1 \times m_2}{r^{n-1}}$$

- Die EM-Felder des Standard Modells sind auf die 3 Dimensionen („Brane“) begrenzt.



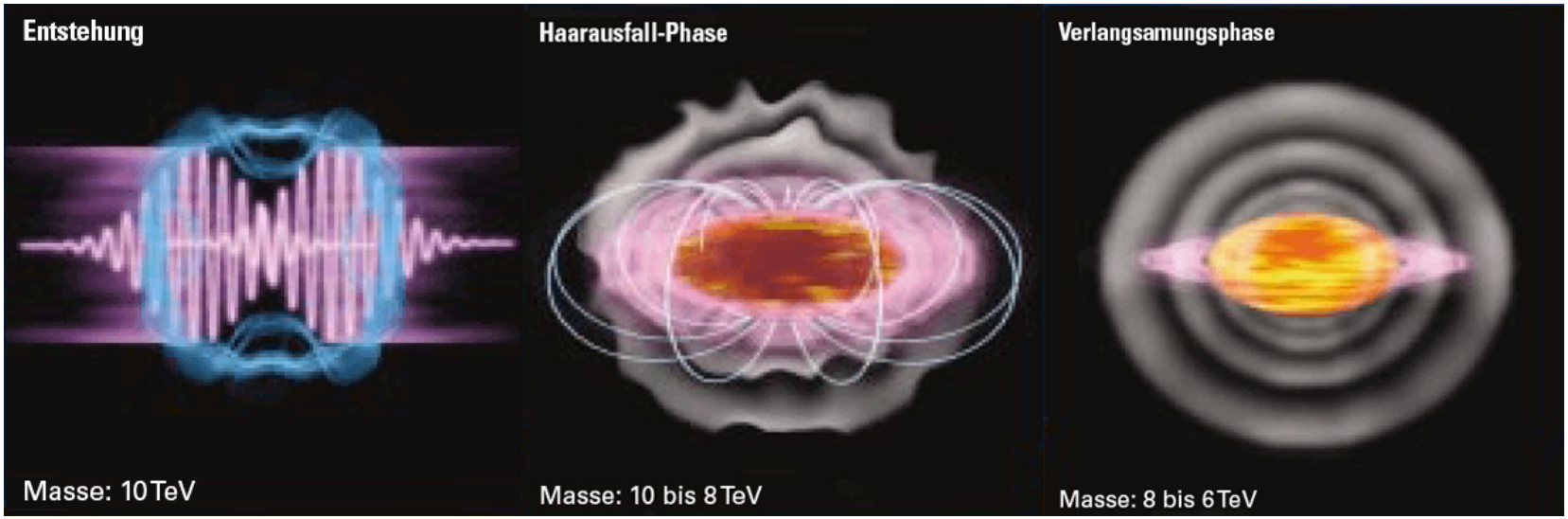
- Die Brane sind in eine höherdimensionale Welt inklusive Extradimensionen („Bulk“) eingebettet.
- Gravitationsfeld kann in alle Dimensionen vordringen

Die Extradimensionen unterscheiden sich stark von den bekannten 3:

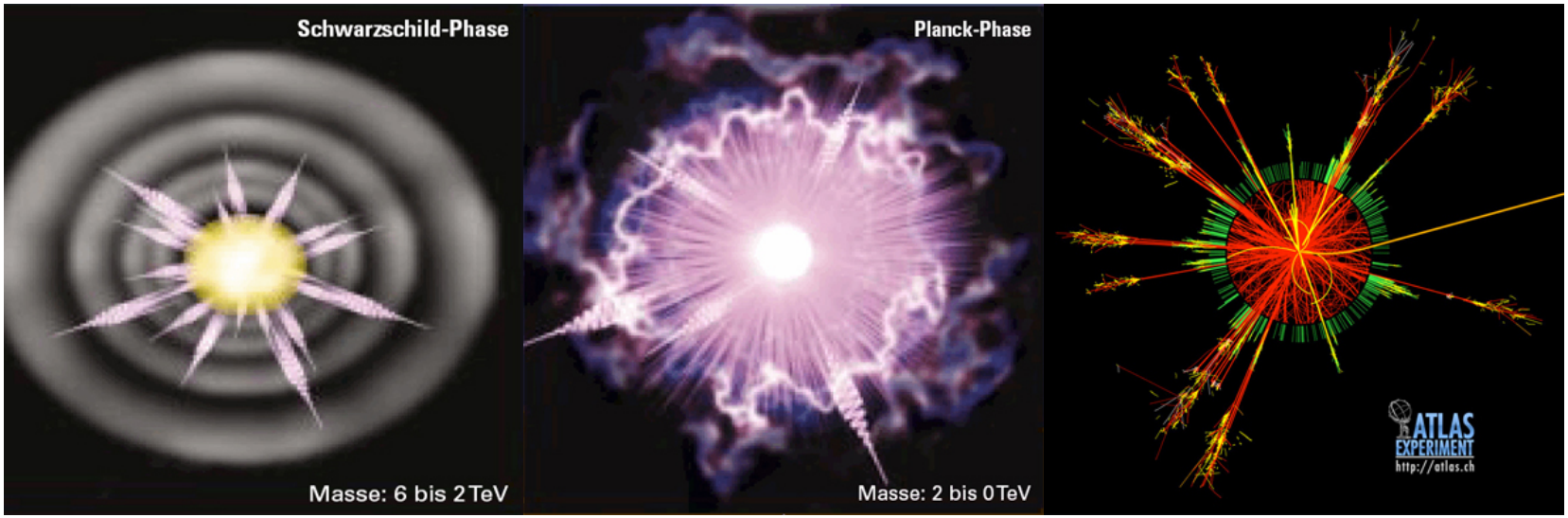
- Newton'sches Gravitationsgesetz ist für Längen $> 100\mu m$ bestätigt
  $\longrightarrow$ Extradimensionen können nur bei sehr kleinen Abständen relevant werden.
- Extradimensionen sind aufgerollt („kompatifiziert")
- Durch die zusätzlichen Dimensionen d ändert sich m_P

$$m_P'^{2+d} \propto \frac{m_P^2}{R^d}$$

Entstehung und Vernichtung Schwarzer Löcher



0 s	0-$10^{-27}s$	$1-3\times10^{-27}s$
Entstehung durch Quarkkollision	Emission von Gravitationswellen, Photonen und geladener Teilchen, Ladung verschwindet schnell	Abbau des Drehimpulses durch Strahlung



$3 - 20 \times 10^{-27} s$

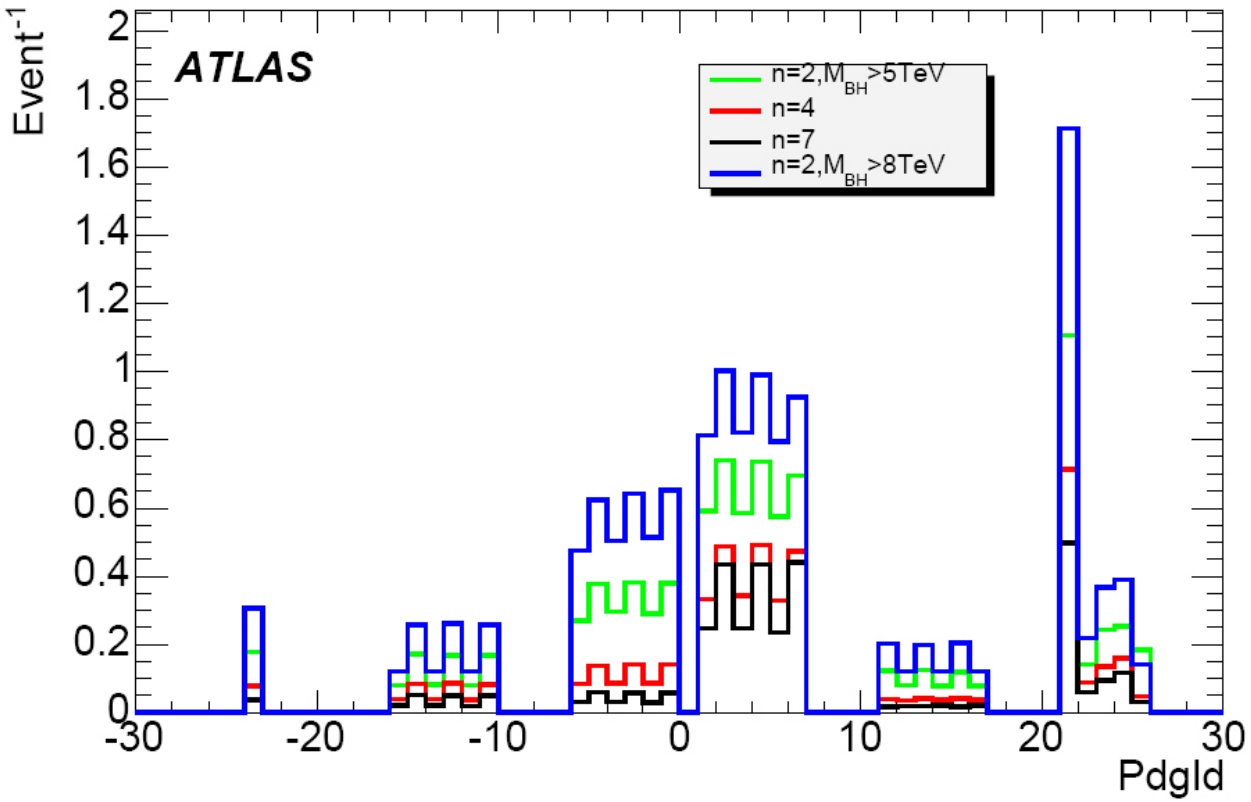
Masseverlust durch Hawkingstrahlung

$20 - 22 \times 10^{-27} s$

Erreichen der Planck-Masse, Zerfall des Lochs

Nachweis im Detektor

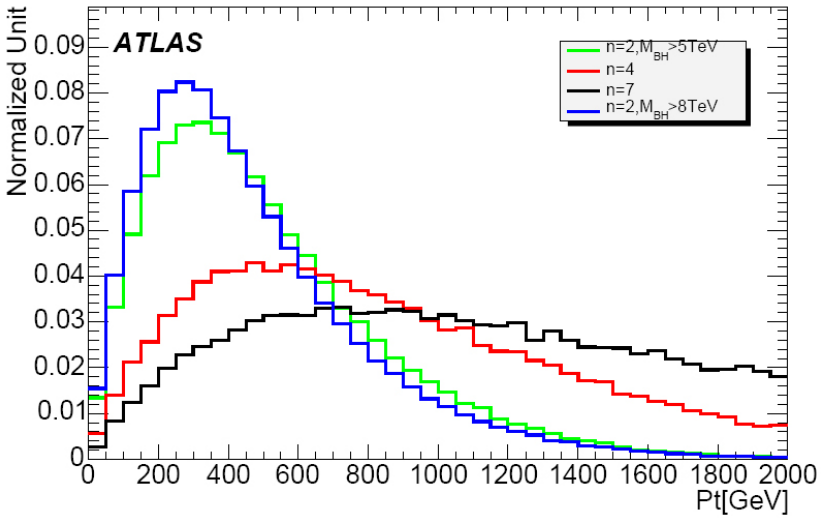
Particle Data Group ID



Quarks:	d	1
	u	2
	s	3
	c	4
	b	5
	t	6
Leptonen:	e^-	11
	ν_e	12
	μ^-	13
	ν_μ	14
	τ^-	15
	ν_τ	16
Bosonen:	g	21
	γ	22
	Z^0	23
	W^+	24
	h^0 / H_1^0	25

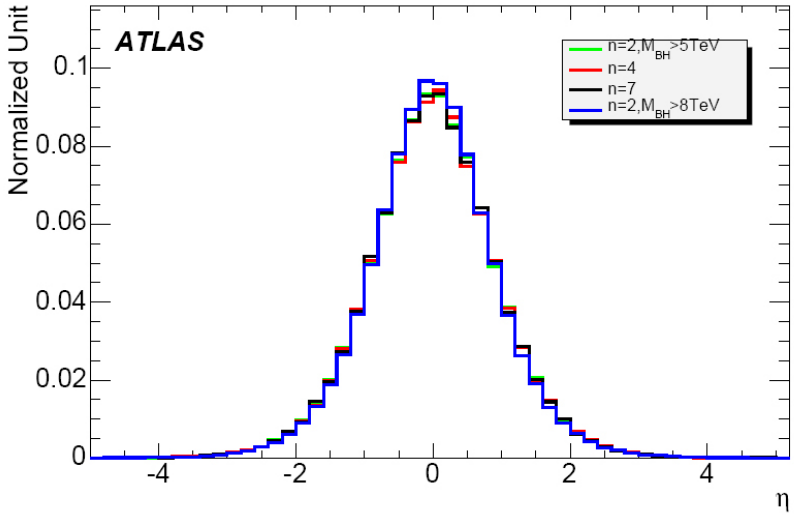
- zeigt die entstandenen Teilchen beim Zerfall eines Schwarzen Lochs

Transversalimpuls



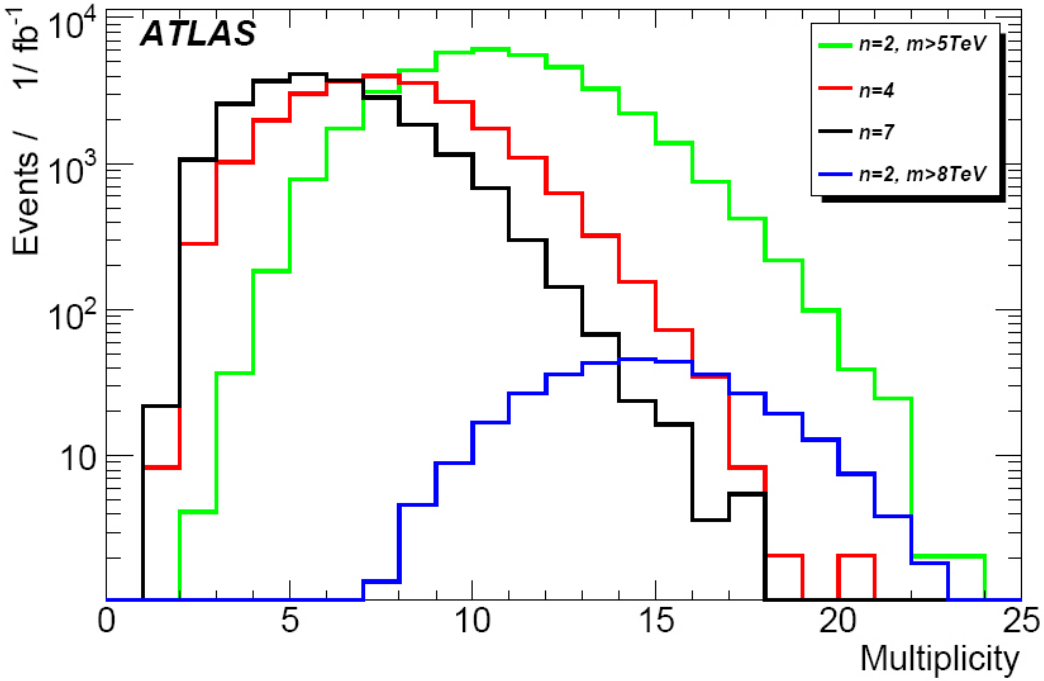
- Es werden Teilchen mit hohem P_t emittiert
- Mehr extra Dimensionen n sorgen für höheres P_t

Pseudorapidität



- $\eta = -ln tan(\frac{\theta}{2})$
- die Verteilung η hängt kaum von n ab

Multiplizität



- Multiplizität gibt an, wie viel Teilchen pro Event entstehen
- bei höherem n sinkt die Multiplizität
  - Hawking-Temperatur ist höher
  - einzelne Teilchen tragen mehr Energie

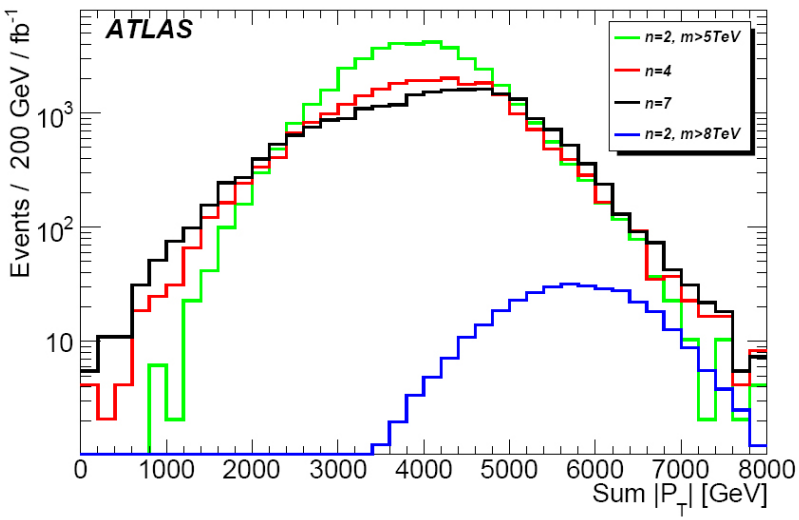
Trigger

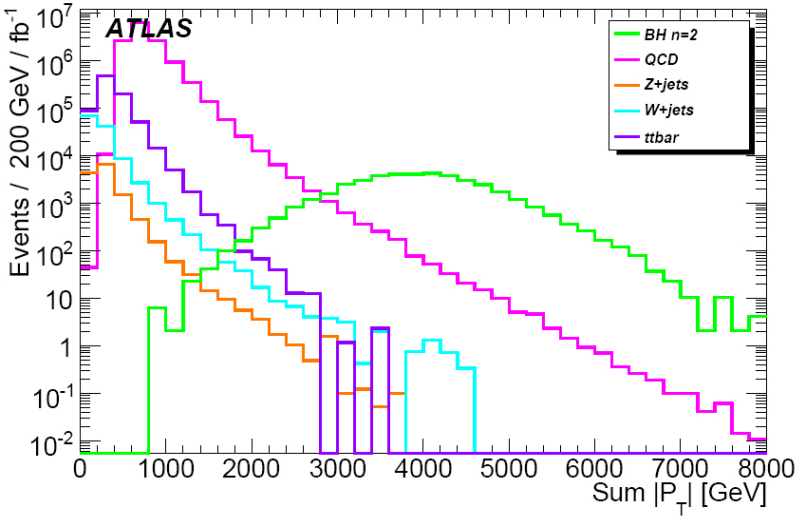
- Der Ein-Jet-Trigger hat die größte Effizienz um auf Schwarze Löcher zu triggern
- Aus der Vielzahl von hohen p_T-Jets pro Event resultiert eine hohe totale Effizienz. Bei einer Trigger-Treshold von 400 GeV von 99%.
- Die Eventrate Schwarzer Löcher ist niedrig genug, sodass kein Prescaling nötig ist

Fehlende Transverselle Energie

- Ein Schwarzes Loch emittiert auch Neutrinos und Gravitons, die man in Form von fehlender transverseller Energie registriert.

Summe des Transversalimpulses

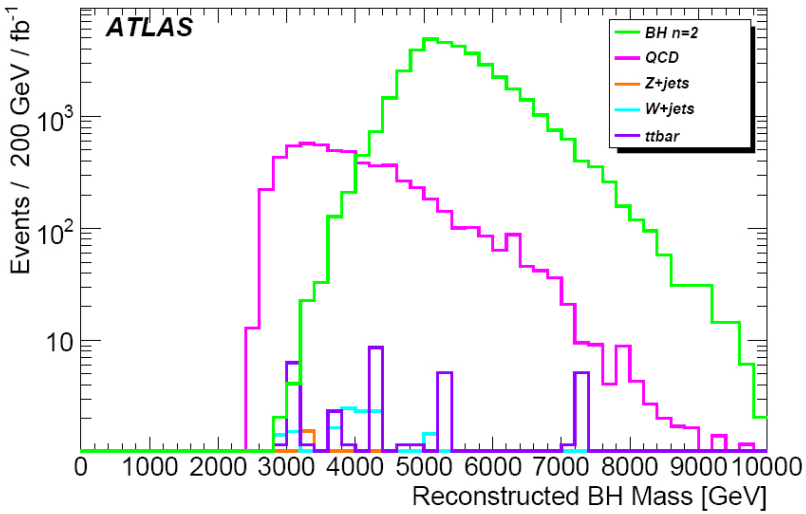


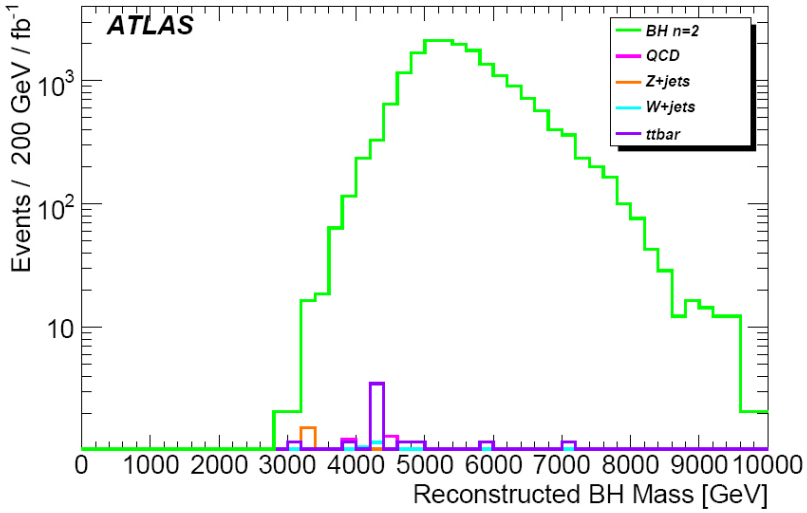


um den Hintergrund zu reduzieren führt man cuts durch:

- $\Sigma \mid p_T \mid > 2,5 TeV$
- bei der Anwesenheit eines Lepton mit $p_T > 50 Gev$

Masse Schwarzer Löcher

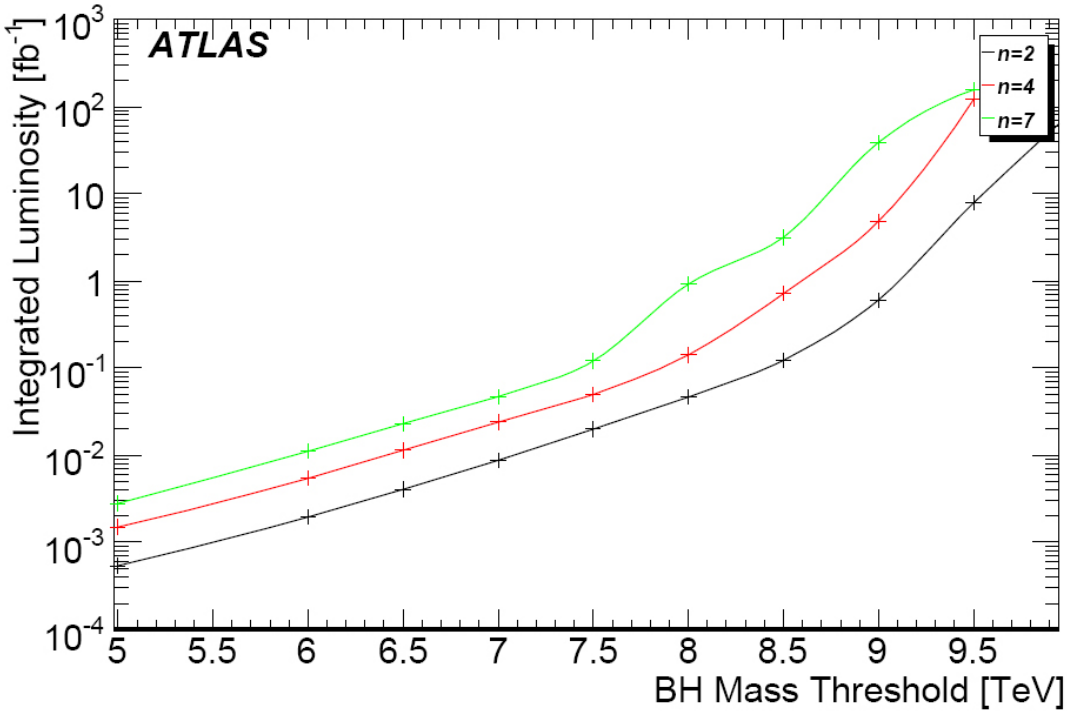




Die Masse von Schwarzen Löchern vor (links) und nach (rechts) den cuts

- Hintergrund wird sehr stark reduziert

Entdeckungspotenzial



- Schwarze Löcher können bei einer Luminosität von wenigen pb^{-1} im Bereich von 5 Tev bei $1 fb^{-1}$ im Bereich von 8 TeV entdeckt werden

Zusammenfassung

- Der LHC ist das erste Experiment, das Objekte im TeV-Bereich erzeugen kann
  - LHC hat das Potenzial, Mini(TeV)-Schwarze-Löcher zu erzeugen
- Atlas hat die Möglichkeit, die Signatur von Schwarzen Löchern zu detektieren
  - Für eine Entdeckung im 5 TeV-Bereich braucht man nur wenige pb^{-1}

$\Rightarrow$ Schwarze Löcher sollten in wenigen Tagen entdeckt werden