

Schwarze Löcher im Teilchenbeschleuniger LHC ?

S. Bethke

Max-Planck-Institut für Physik

Themen:

- Makrokosmos: *Struktur und Aufbau des Universums*
- Mikrokosmos: *Teilchen und Kräfte*
- Gravitation: *schwach aber unwiderstehlich*
- schwarze Löcher: *Theorie und Praxis ...
kosmische Ungeheuer oder Keimzellen?
wie klein kann eins sein ?*
- LHC: *Suche nach neuer Physik*
- mini schw. Loch: *wie gefährlich ist es - ehrlich ?
weder „schwarz“ noch „Loch“...*



Dimensionen und Struktur der Materie



Universum 10^{26} m

Galaxie 10^{21} m

Sonnensystem 10^{13} m

Erde 10^7 m

Mensch 10^0 m

Atom 10^{-10} m

Atomkern 10^{-14} m

Nukleon 10^{-15} m

Quark; Lepton $< 10^{-18}$ m

?????

???

Das Weltbild der Teilchenphysik (2009):

Elementare Teilchen			
	Generation		
	1	2	3
Quarks	u	c	t
	d	s	b
Leptonen	ν_e	ν_μ	ν_τ
	e	μ	τ

Elementare Kräfte		relative Stärke	Reichweite
	Austauschboson		
Stark	g	1	subatomar
El.-magn.	γ	1/137	∞
Schwach	W^\pm, Z^0	10^{-14}	subatomar
<i>Gravitation</i>	<i>G</i>	10^{-40}	∞

... sowie deren Antiteilchen

- Gravitation:**
- (fast) unendlich schwach
 - unendliche Reichweite ($\sim 1/r^2$)
 - immer anziehend



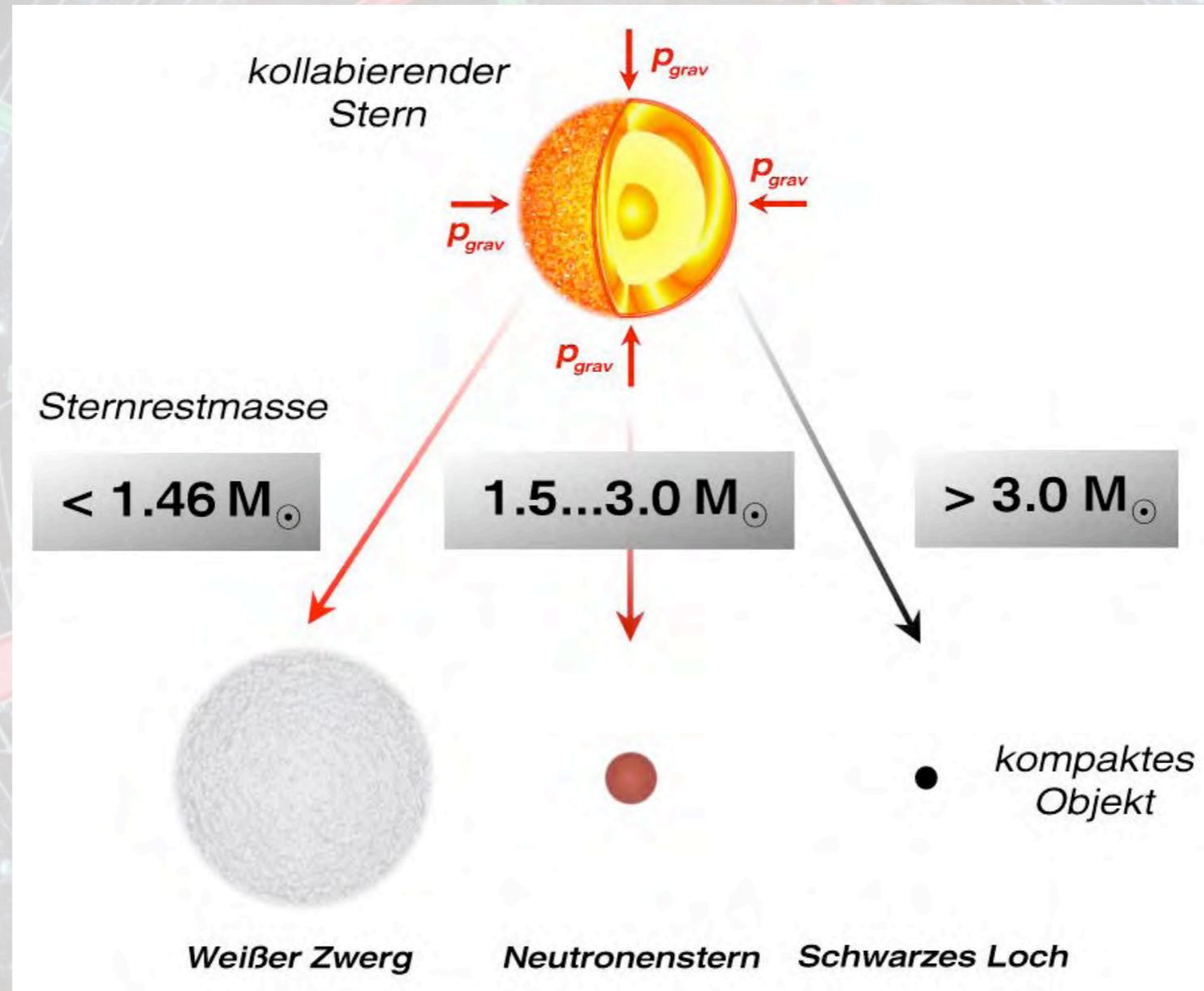
Gravitation: - (fast) unendlich schwach
- unendliche Reichweite ($\sim 1/r^2$)
- immer anziehend

-> Gravitationskraft kann für grosse Massen
(fast) beliebig groß werden.

so groß, dass ein Stern, am Ende seiner Lebensdauer, wenn
der Gravitationsdruck nicht mehr durch den Gas- und
Strahlungsdruck kompensiert wird, kollabiert.



so groß, dass ein Stern, am Ende seiner Lebensdauer, wenn der Gravitationsdruck nicht mehr durch den Gas- und Strahlungsdruck kompensiert wird, kollabiert.



-> schwarzes Loch wenn Masse > 3 Sonnenmassen !



Was ist ein „schwarzes Loch“ ?

astronomisches Objekt, dessen Gravitation so gross ist, dass seine **Fluchtgeschwindigkeit** ab einer gewissen Grenze (dem Ereignishorizont) **größer als die Lichtgeschwindigkeit (c)** ist.

für einen Körper der Masse m im Gravitationsfeld der Masse M :
setze Gravitationskraft = Zentripetalkraft

$$m \cdot \frac{M \cdot G}{r^2} = \frac{m \cdot v^2}{r}$$

m : Masse eines Testkörpers, der eine Masse M auf Kreisbahn umkreist

r : Abstand zwischen den beiden Massen (Radius der Kreisbahn)

G : Gravitationskonstante; $G = 6.67 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$

v : Bahngeschwindigkeit der Masse m

c : Lichtgeschwindigkeit; $c = 299\,792\,458 \text{ m/s}$; $\sim 1 \text{ Mrd km/h}$

Abstand R_s wenn $v = c$: „Schwarzschildradius“

$$R_s = \frac{M \cdot G}{c^2}$$

Schwarzes Loch allgemein:

Körper, die innerhalb ihres Schwarzschildradius liegen



Schwarzes Loch allgemein:

Körper, die innerhalb ihres Schwarzschildradius liegen

selbst Licht kann nicht von einem Schwarzen Loch entweichen!

$$R_s = \frac{2GM}{c^2} \sim 2.95 \frac{M}{M_{\text{sun}}} \text{ [km]}$$

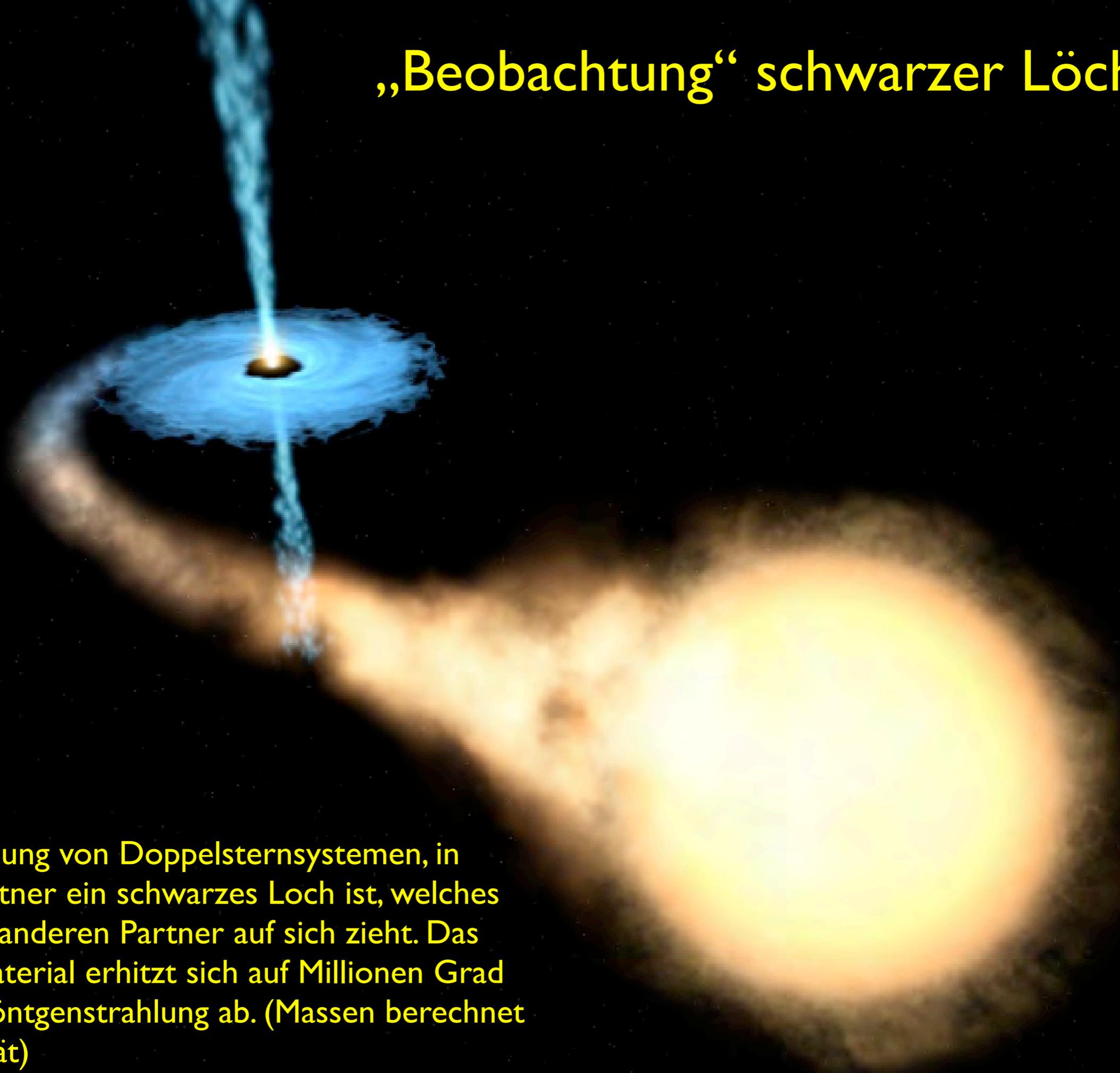
hypothetisch
beobachtet

Körper	Masse	R_s
Mensch	???	$1.5 \cdot 10^{-25} \text{ m}$
Erde	$6 \cdot 10^{24} \text{ kg}$	0.9 cm
Sonne	$2 \cdot 10^{30} \text{ kg}$	3 km
stellares SL	$10 M_{\text{sun}}$	30 km
supermassives SL	$10^5 \dots 10^9 M_{\text{sun}}$	0.001 ... 10 AU

(IAU ~150 Millionen km)



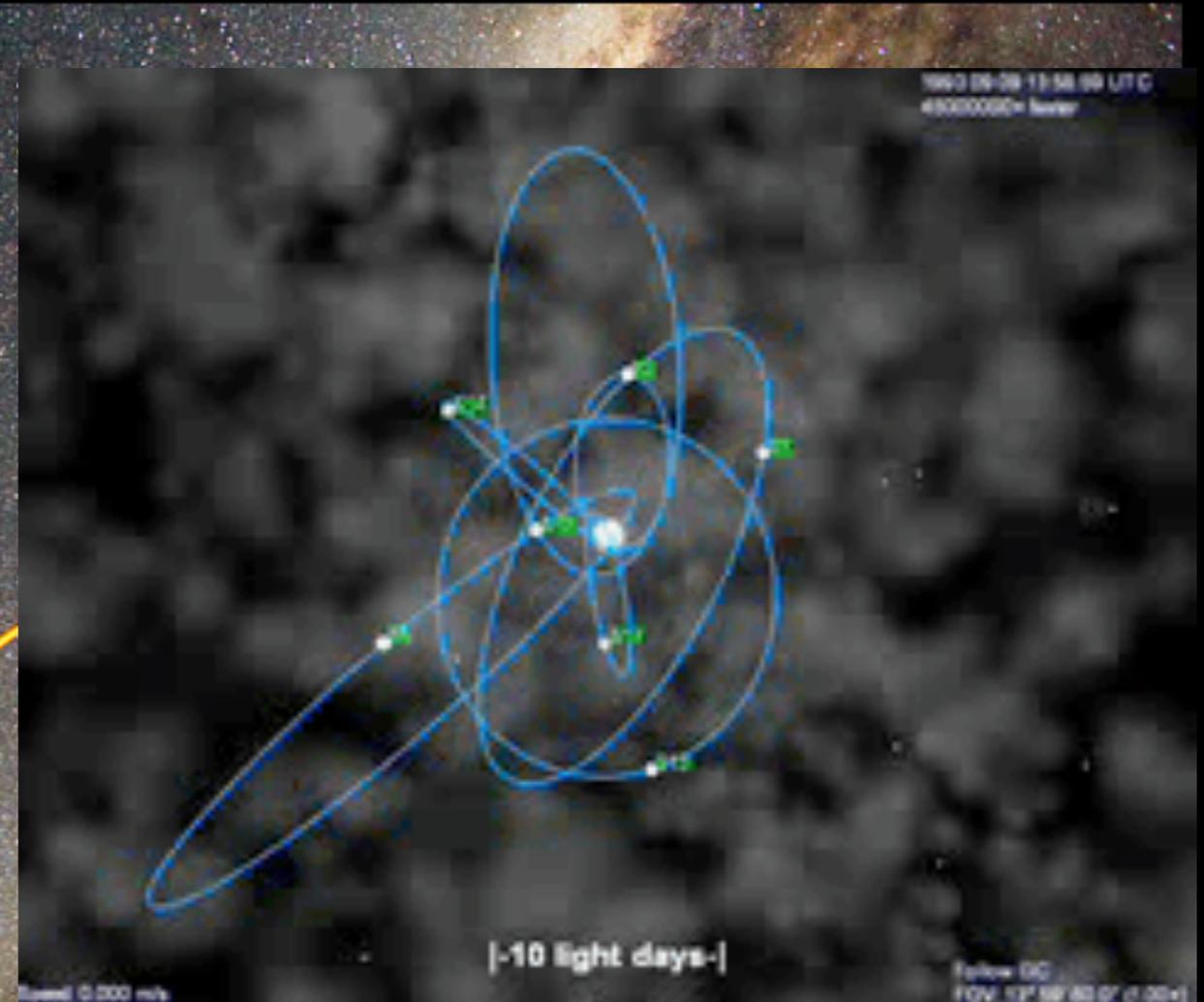
„Beobachtung“ schwarzer Löcher:



Röntgenstrahlung von Doppelsternsystemen, in denen ein Partner ein schwarzes Loch ist, welches Material vom anderen Partner auf sich zieht. Das einfallende Material erhitzt sich auf Millionen Grad und strahlt Röntgenstrahlung ab. (Massen berechnet aus Periodizität)

supermassives Schwarzes Loch im Zentrum der Milchstrasse:

Beobachtung und Analyse der Bahnen zentrumsnaher Sterne, die offenbar ein supermassives SL mit ca. 3-4 Millionen Sonnenmassen umrunden.
Entfernung: 24.000 LY



credit: Yuri Beletsky (ESO)

supermassive Schwarze Löcher im Zentrum aller Galaxien ...?

Population von supermassiven
SL in weit entfernten, „aktiven“
Galaxien („Quasare“) mit
NASA's Spitzer und Chandra
Teleskopen.
Entfernung: ca. 9-11 Mrd LY !!

man vermutet, dass SL eine
zentrale Rolle bei der Strukturbildung
im frühen Universums spielen.

Zusammenfassung bisher:

- die Existenz stellarer bis supermassiver SL im Kosmos ist experimentell gesichert („beobachtet“)
- stellare SL sind die Endstadien von Sternen mit $M > 3 M_{\text{sun}}$
- supermassive BH sind im Zentrum (aller) Galaxien zu finden; im frühen Stadium sind sie „aktiv“ (-> Quasare). Sie spielen eine zentrale Rolle bei der Strukturbildung im frühen Universum.
- Objekte mit $M < 3 M_{\text{sun}}$ gehen alleine nicht in SL über (sondern in Neutronensterne, Weiße Zwerge, Brown Dwarfs, kalte Materiebrocken)

-> Gibt es SL mit kleineren (irdischen, subatomaren...) Massen?

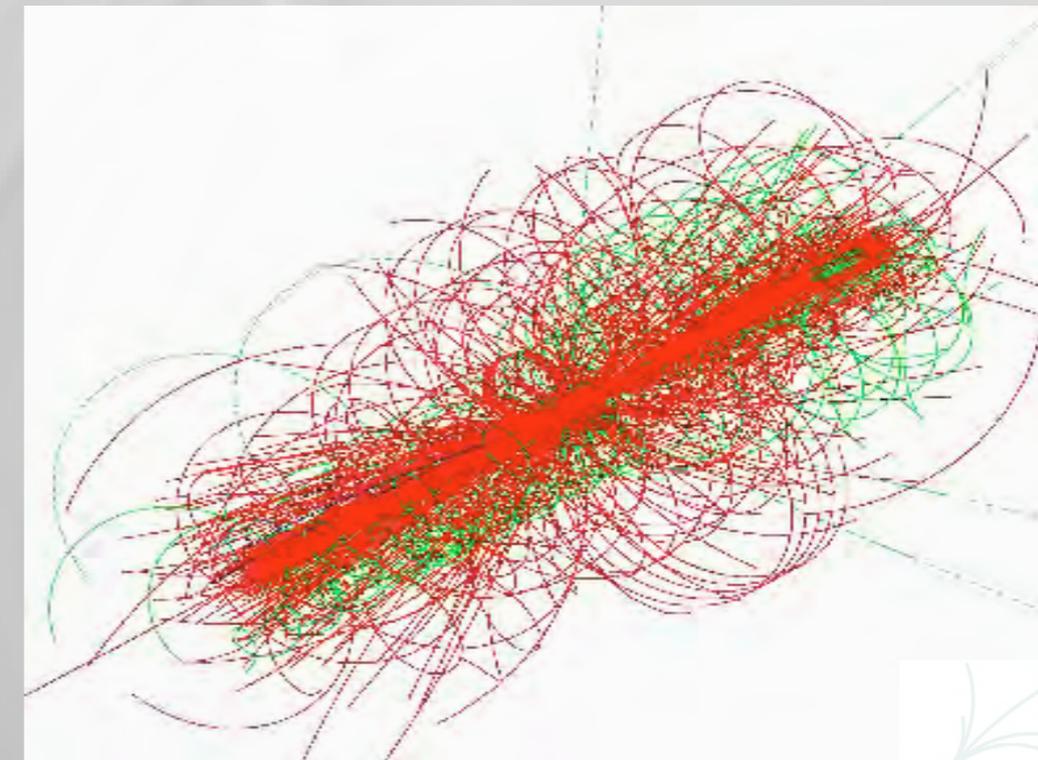
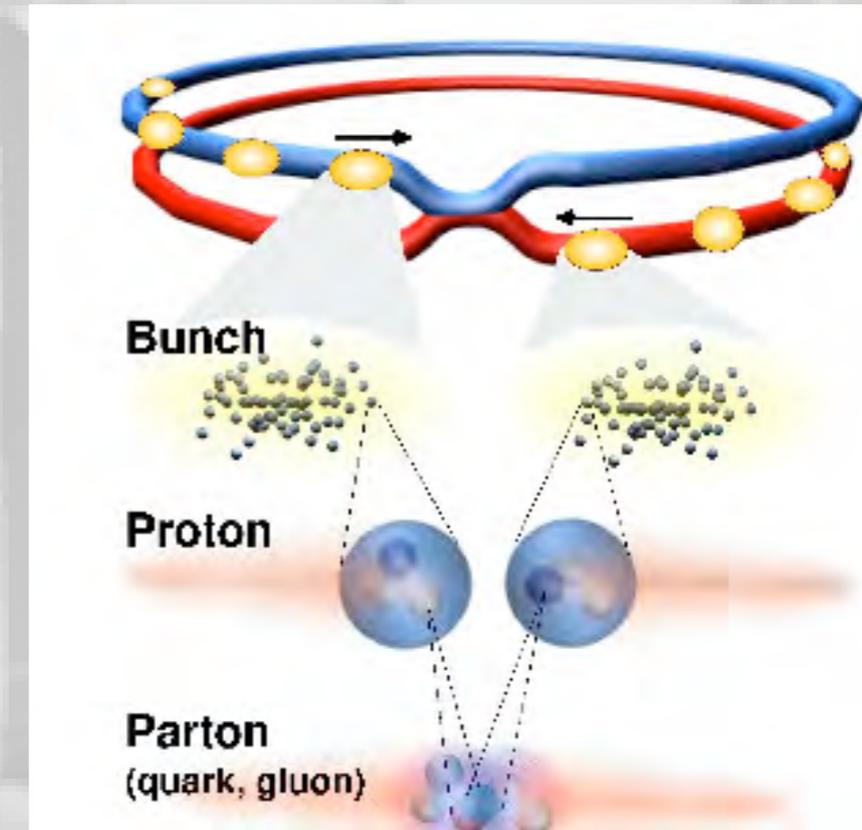
wenn ja, dann müssen sie:

- „primordial“, d.h. beim Urknall (Big Bang) erzeugt sein
- in sehr hochenergetischen (Teilchen-) Reaktionen erzeugt worden sein (oder werden)

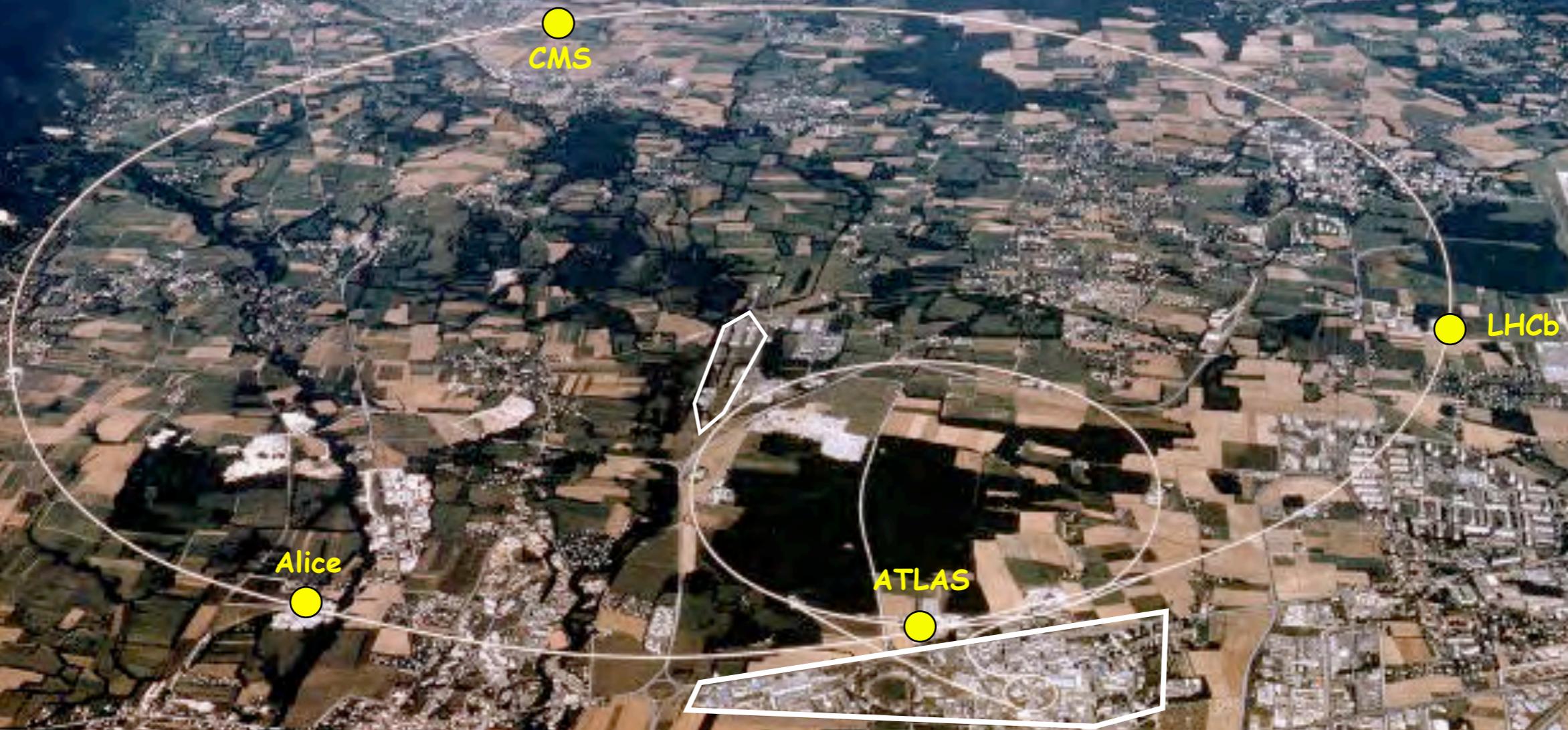


das Large Hadron Collider Projekt ein Projekt der Superlative:

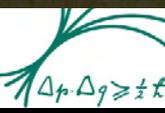
- Teilchenbeschleuniger, 27 km Umfang, 100m unter Tage
- Suche nach Neuer Physik jenseits des Standardmodells (Higgs-Teilchen; Supersymmetrie, Dunkle Materie...)
- höchste derzeit technisch mögliche Kollisionsenergien (14 TeV = 14.000.000.000.000 eV)
- das weltweit größte und komplexeste Unternehmen der naturwissenschaftlichen Grundlagenforschung
- „the coolest place in the universe“: mehr als 50.000 t supraleitender Magnete, mit 90 Tonnen flüssigen Heliums gekühlt auf 1.9 Kelvin (-271 °C)
- 40 MHz Kollisionsrate $\rightarrow \sim 10^{14}$ B/s Rohdatenfluss in den Teilchendetektoren; ~ 1 TB/s „on disk“, 7 PB/a „on tape“; world-wide GRID computing



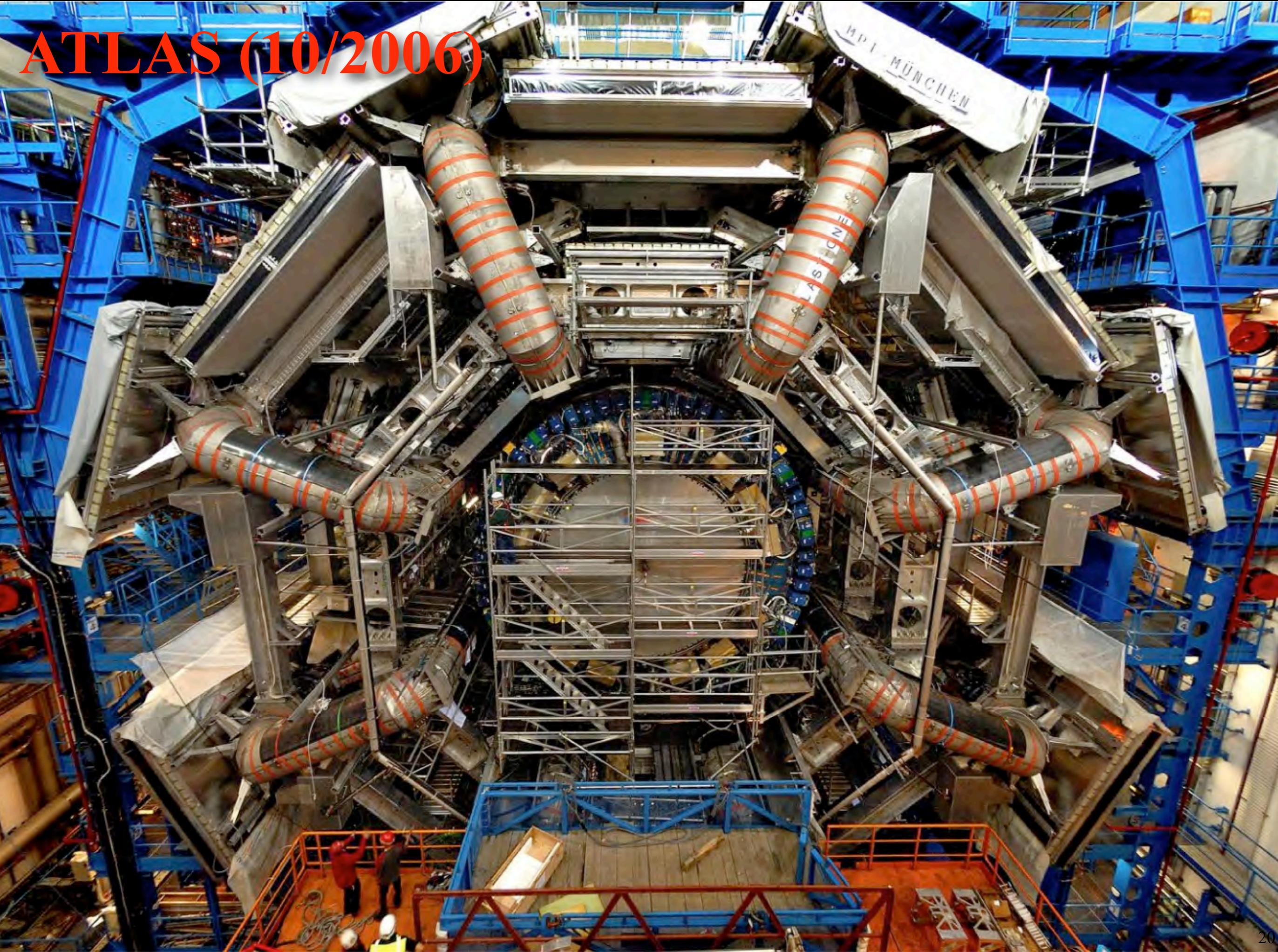
Der Large Hadron Collider am Europäischen Zentrum für Teilchenphysik CERN / Genf



LHC Tunnel



ATLAS (10/2006)



erfolgreicher Start des LHC am 10.9.2008:

Bildschirmfoto Ablage Bearbeiten Foto Fenster Hilfe (97%) Mi 10:40:43 Siggie Bethke

Untitled Document

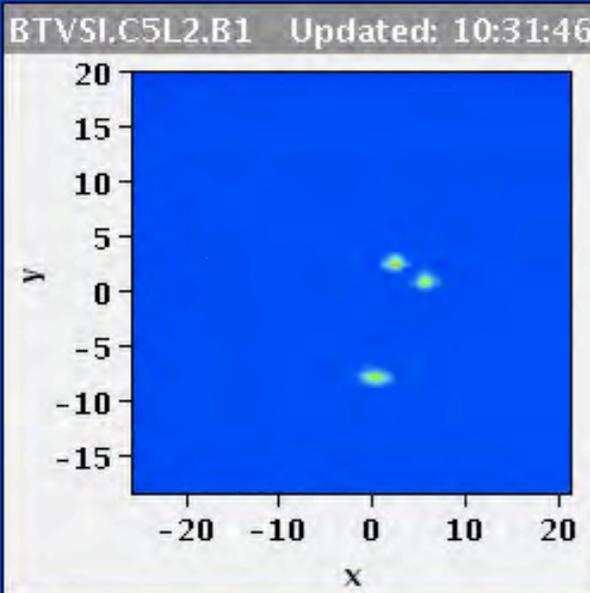
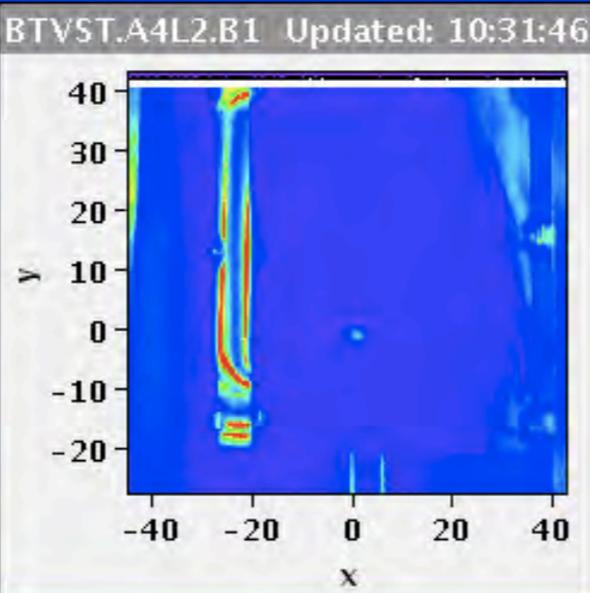
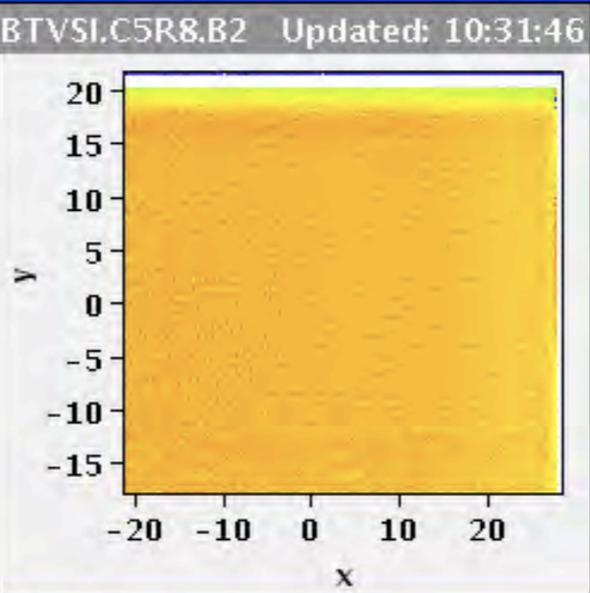
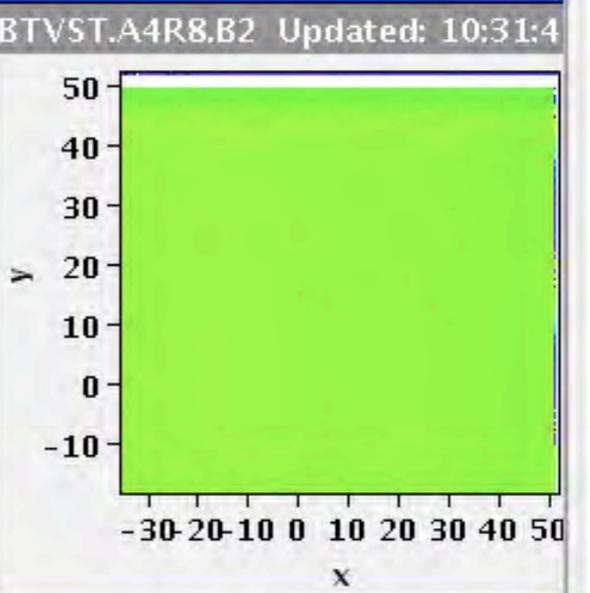
http://ab-dep-op.web.cern.ch/ab-dep-op/vistar.php?usr=LHC

Deutsche Welle LH EVO Google Maps TV Today Google Maps Apple ATLAS DB ExClu MPI SZ Siggie's Home 11880.com SPIRES-HEP

BEAM SETUP: INJECT AND DUMP

TED T12 position:	BEAM	TED T18 position:	DUMP
TDI P2 gaps/mm	upstream: 29.82	downstream: 30.14	
TDI P8 gaps/mm	upstream: 3.32	downstream: 3.28	

BCT T12:	0.00e+00	BCT T18:	0.00e+00
----------	----------	----------	----------

BTVSI.C5L2.B1 Updated: 10:31:46	BTVST.A4L2.B1 Updated: 10:31:46	BTVSI.C5R8.B2 Updated: 10:31:46	BTVST.A4R8.B2 Updated: 10:31:46
			

Comments 10-09-2008 10:31:29 :

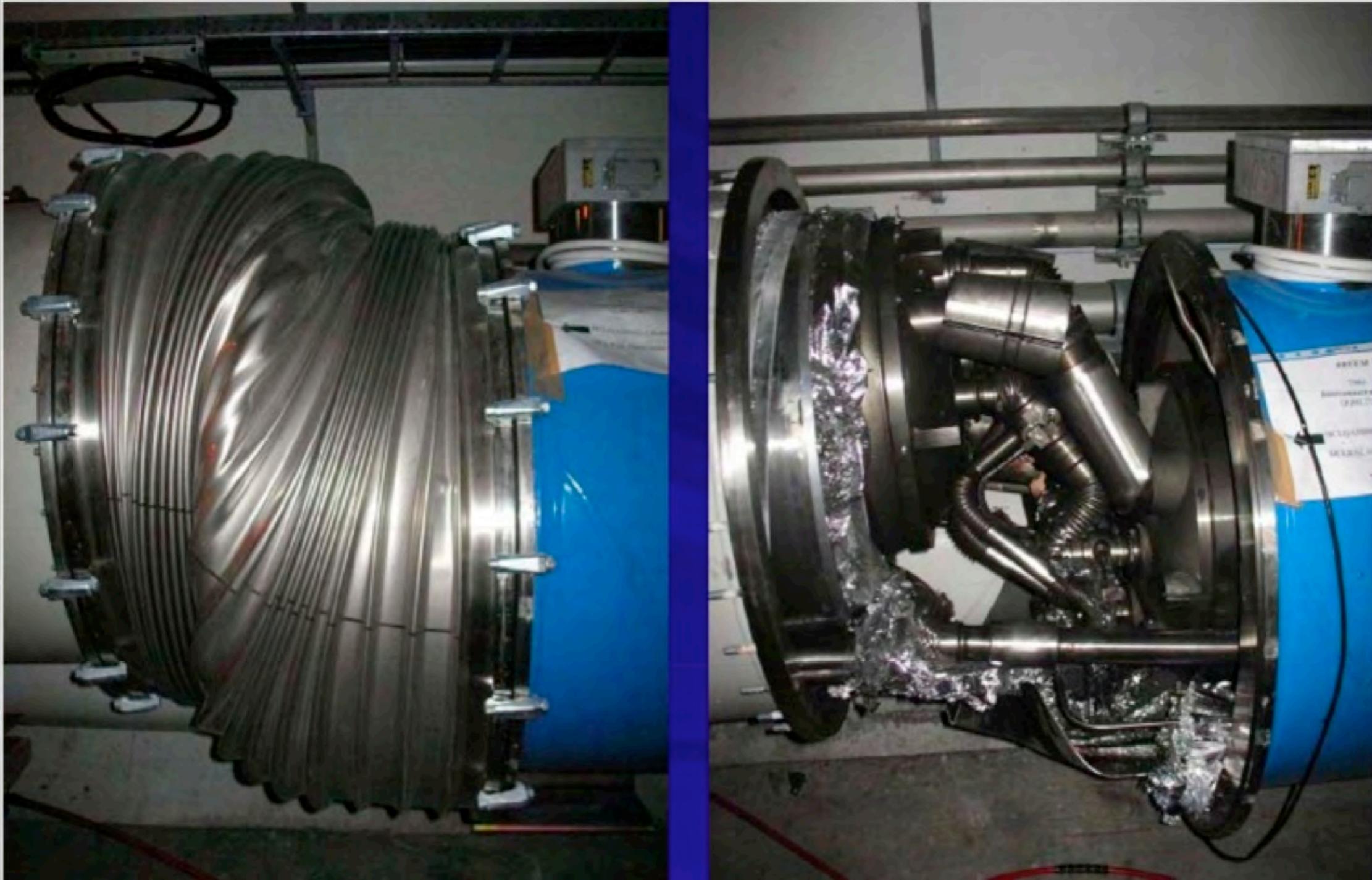
B1 extraction only
Beam1: correcting the orbit.
We did three turns!



großer Erfolg - große Freude !
... aber noch keine Kollisionen, keine „Physik“ ...



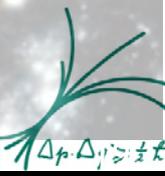
19. September 2008: technischer Defekt in Stromverbindung führt zu signifikanten Materialschäden



→ Reparatur und Wiederanlauf
bis ca. September 2009

mini Schwarze Löcher am LHC ?

1. Nach unseren derzeit **gültigen Theorien** (QM & RT im 4-dimensionalen Raum-Zeit-Kontinuum) ist die Erzeugung von mini Schwarzen Löchern am LHC **absolut unmöglich !**
(man bräuchte eine Million Milliarden mal soviel Energie)
2. es gibt jedoch darüber hinausgehende, **spekulative Theorien**, die solche Objekte am LHC ermöglichen würden; dies setzt die Existenz „**höherer**“ **Raumdimensionen** voraus!
3. selbst wenn es genügend „höhere“ Raumdimensionen gäbe, wären diese „mini-black-holes“ **weder „black“ noch** wären sie „holes“:
 - a) sie wären extrem **heiss**, so dass sie nach Sekundenbruchteilen **zerstrahlen** würden
 - b) sie hätten so **geringe Massen**, dass sie - im Gegensatz zu kosmischen black holes - gravitativ keine andere Materie anziehen und „auffressen“ könnten
4. auch wenn man 3a) spekulativ negiert (es gibt keine konsistente Theorie dazu!), und man stabile black holes postuliert, benötigte ein solches sich langsam in der Erde bewegendes Objekt Jahrtausende, um durch Stöße genügend Materie aufzusammeln, bis es ein makroskopisches Objekt würde.
5. solche stabilen Objekte hätten kosmologische Konsequenzen, die man schon beobachtet hätte, wenn sie denn existierten.



1. Nach unseren derzeit **gültigen Theorien** (QM & RT im 4-dimensionalen Raum-Zeit-Kontinuum) ist die Erzeugung von mini Schwarzen Löchern am LHC **absolut unmöglich!** (man bräuchte eine Million Milliarden mal soviel Energie)

SL - wie klein kann es sein?

nochmals: Formeln zu SL

Schwarzschild-Radius: $R_s = 2GM/c^2$

Dichte:

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

Planck Masse:

$$m_p = \sqrt{\frac{\hbar c}{G}} = 1.2 \times 10^{19} \text{ GeV} = 2 \times 10^{-8} \text{ kg}$$

(4-dimensionale
Raum-Zeit)

QM Argumente:

$$m_{bh} > m_p$$

$$R_s > r_p \sim 10^{-35} \text{ m}$$

LHC Energie:

$$\sim 10^4 \text{ GeV}$$

die Energie des LHC ist um 10^{15} zu klein (1 Million Mrd)!



2. es gibt jedoch darüber hinausgehende, **spekulative Theorien**, die solche Objekte am LHC ermöglichen würden; dies setzt die Existenz „**höherer**“ **Raumdimensionen** voraus!

Gravitationskraft bei 3 Raumdimensionen:

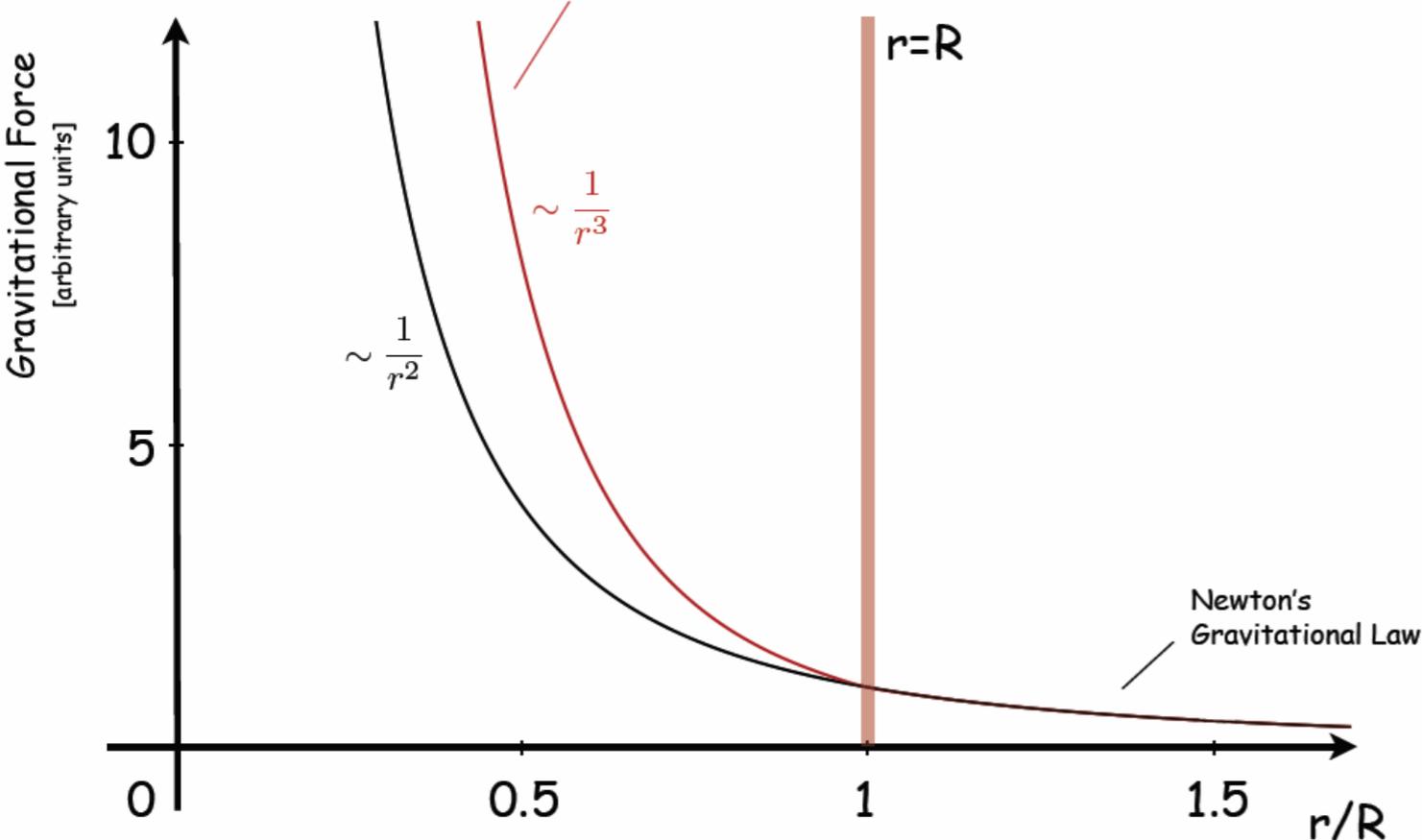
$$F = G \cdot \frac{m \cdot M}{r^2}$$

Gravitationskraft bei n Raumdimensionen:

$$F = G \cdot \frac{m \cdot M}{r^{n-1}}$$

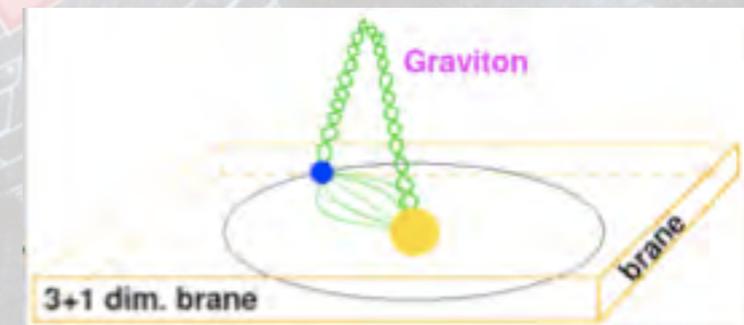
Hypothese: es könnte $d = n - 3$ zusätzliche Raumdimensionen geben, die aber nur bei kleinen Abständen $r < R$ wirken.

Gravitation in 4 Raumdimensionen



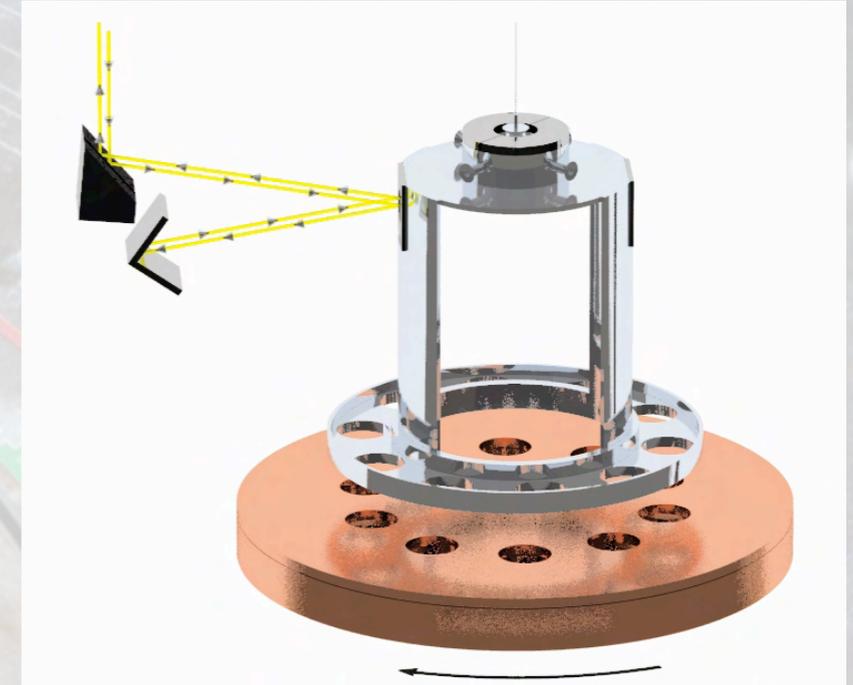
• Extra Raum-Dimensionen:

- + inspiriert durch String-Theorien
- + aufregende Konsequenzen; jedoch grosse Modell-Abhängigkeiten
- + könnte elegant erklären, warum Gravitation (in 3-dim Raum) so schwach ist:



2. es gibt jedoch darüber hinausgehende, **spekulative Theorien**, die solche Objekte am LHC ermöglichen würden; dies setzt die Existenz „**höherer**“ **Raumdimensionen** voraus!

Die Gültigkeit des Newton'schen Kraftgesetzes ($F \sim 1/r^2$) ist experimentell bis hinunter zu $r > R \sim 0.1 \text{ mm}$ bewiesen!



- Extra Dimensionen können für eine kleine neue Planck-Skala sorgen, z.B.:
 - für $d = 2$, $m'_p \sim 1 \text{ TeV}$: $R \sim 1 \text{ mm}$
 - für $d = 3$, $m'_p \sim 1 \text{ TeV}$: $R \sim 1 \text{ nm}$

Zwischenbilanz:

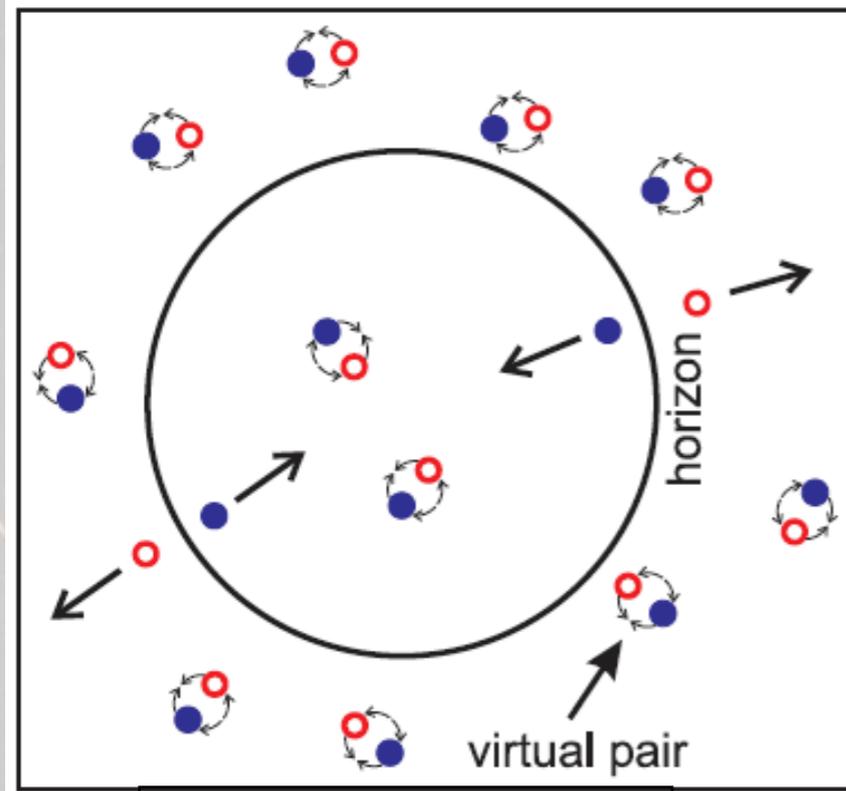
- extra Dimensionen sind hoch-spekulativ!
- bisher existiert kein Anzeichen ihrer Existenz
- sie würden jedoch, falls existent, Planck-(und SL-) Massen bis hinunter zu LHC-Energien möglich machen



3. selbst wenn es genügend „höhere“ Raumdimensionen gäbe, wären diese „mini-black-holes“ weder „black“ noch wären sie „holes“:

a) sie wären extrem heiss, so dass sie nach Sekundenbruchteilen zerstrahlen würden

• Stephen Hawking (1974): Schwarze Löcher strahlen! → Hawking-Strahlung



S. Hossenfelder, hep-ph/0412265

- Im Vakuum entstehen durch Quantenfluktuationen ständig Teilchen-Antiteilchen-Paare
 - Direkt am Ereignishorizontes des Schwarzen Lochs kann eines der beiden „hineinfallen“
 - ▶ Das andere muss dann reell werden
 - ▶ Die Energie dazu kommt aus dem Schwarzen Loch
 - ▶ Das Schwarze Loch verliert dadurch an Masse

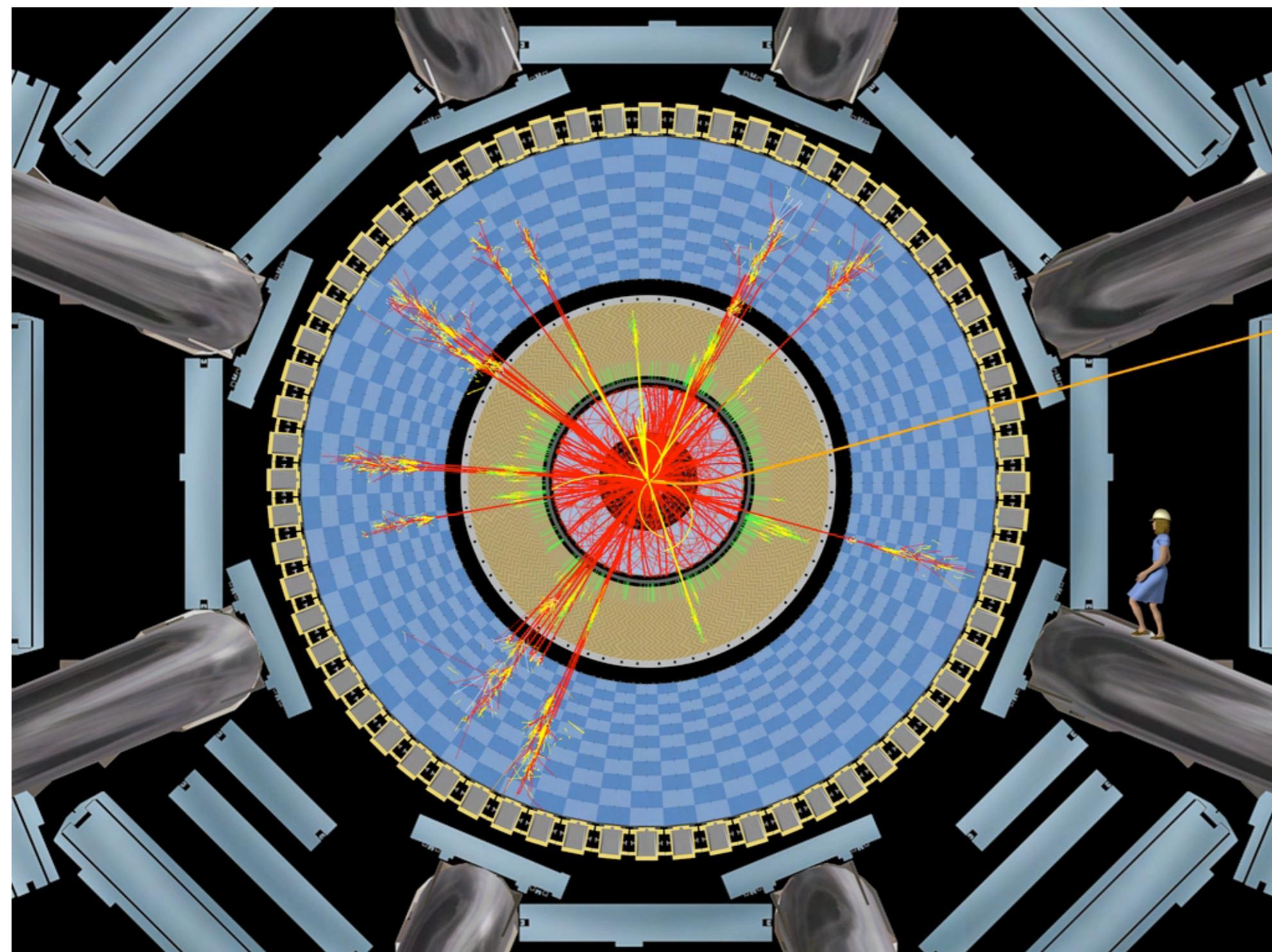
Hawking Temperatur:

$$T = \frac{\hbar c^3}{8\pi k_B G M} \sim 6 \times 10^{-8} K \left(\frac{M_{Sun}}{M} \right) \sim 8 \times 10^{29} K \left(\frac{1 TeV}{M} \right)$$

mini SL strahlen innerhalb $\sim 10^{-26}$ s ihre Energie ab und zerfallen in bekannte elementare Teilchen



Zerfallssignatur eines SL im ATLAS Detektor:



- “Demokratischer”
Zerfall in uns
bekannte Teilchen:
 - 72% q, g
 - 11% l
 - 8% W, Z
 - 6% ν , Gravitonen
 - 1% γ
- Sphärische
Ereignisse !



3. selbst wenn es genügend „höhere“ Raumdimensionen gäbe, wären diese „mini-black-holes“ **weder „black“ noch** wären sie „holes“:

b) sie hätten so **geringe Massen**, dass sie - im Gegensatz zu kosmischen black holes - gravitativ keine andere Materie anziehen und „auffressen“ könnten

- Am LHC produzierte Objekte können Massen von maximal ~ 10 TeV oder $\sim 10^{-19}$ g haben .

- mini SL wechselwirken nur gravitativ \rightarrow extrem schwach!

- daher können sie keine anderen Teilchen durch Anziehung in sich hineinziehen

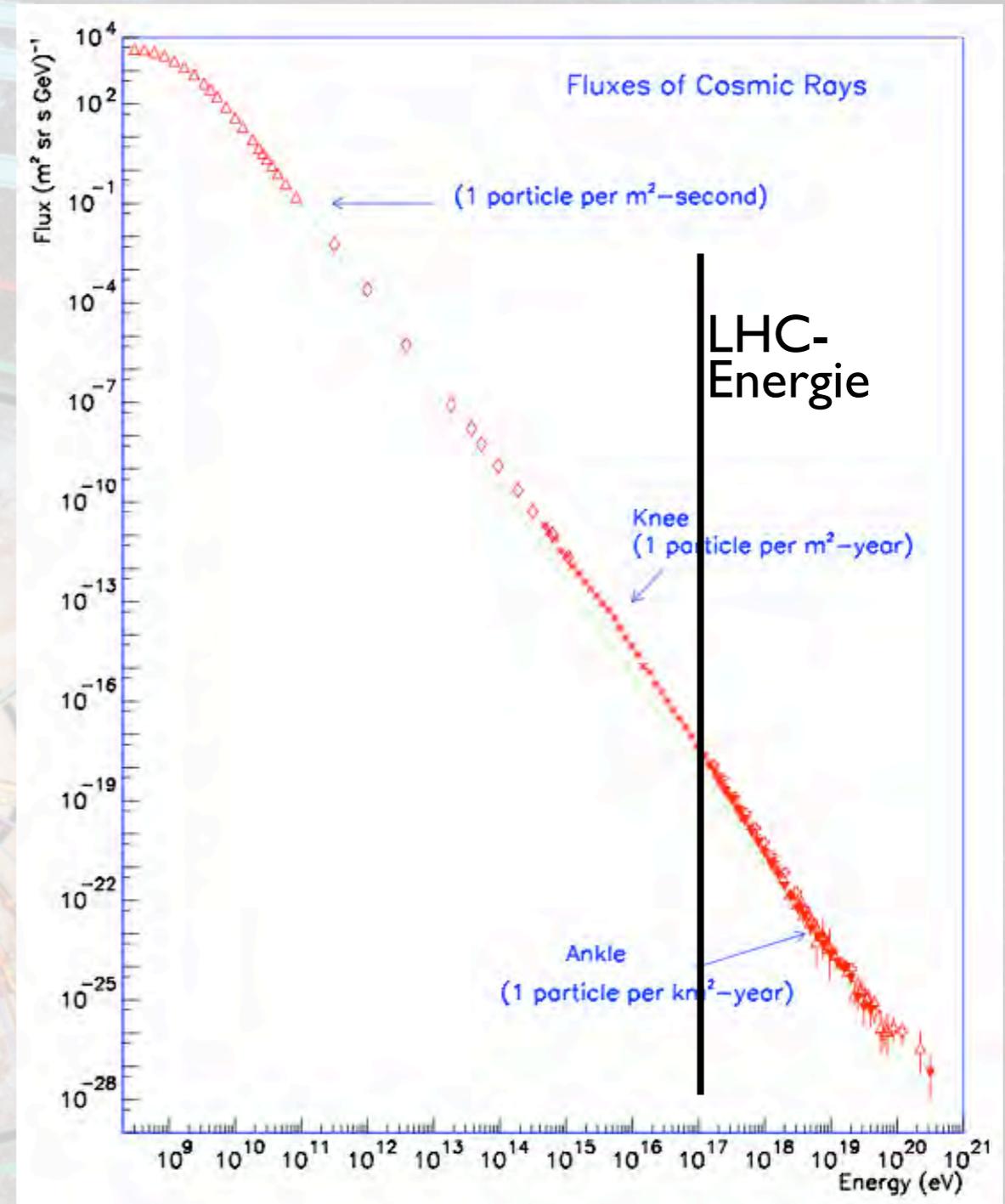
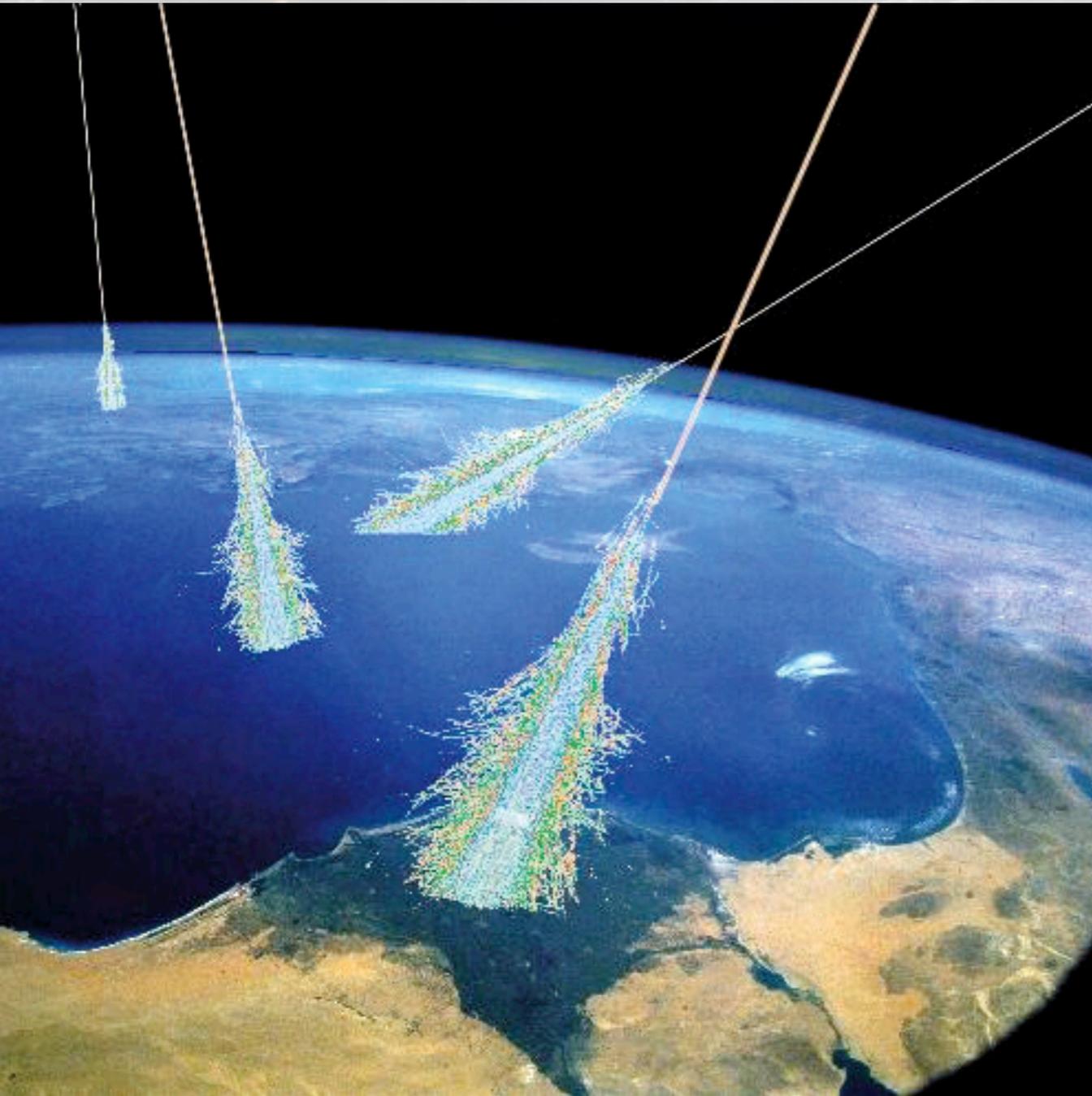
\rightarrow „Auffressen“ anderer Materieteilchen nur durch **direkte Stöße** mit diesen, innerhalb einer Querschnittsfläche mit Radius R_s

4. auch wenn man 3a) spekulativ negiert (es gibt keine konsistente Theorie dazu!), und man stabile black holes postuliert, benötigte ein solches sich langsam in der Erde bewegendes Objekt Jahrtausende, um durch Stöße genügend Materie aufzusammeln, bis es ein makroskopisches Objekt würde.

\rightarrow Ansammlung makroskopischer Massen sehr langsam bei terrestrischen Materiedichten ($t \sim$ Alter der Sonne); *nicht* jedoch bei Neutronensternen



5. solche stabilen Objekte hätten kosmologische Konsequenzen, die man schon beobachtet hätte, wenn sie denn existierten.



- kosmische Höhenstrahlung mit höheren Energien als am LHC trifft unsere Erde: mehr als 500.000 „LHC“-Ereignisse pro Sekunde !

- LHC: ~ 1 Mrd Ereignisse/s \rightarrow LHC muss mehr als 2 Millionen Jahre Dauerbetrieb leisten, um 4.5 Mrd Jahre. Höhenstrahlung aufzuwiegen.



5. solche stabilen Objekte hätten kosmologische Konsequenzen, die man schon beobachtet hätte, wenn sie denn existierten.

- allerdings: das Argument, daß die Existenz unserer Erde trotz des andauernden Beschusses durch hochenergetische kosmische Strahlung die Produktion stabiler (!) SL ausschliesst, ist nicht ganz wasserdicht:
- SL erzeugt durch die Höhenstrahlung hätten sehr hohe Geschwindigkeiten und würden deshalb ohne große Wirkung durch die Erde hindurchfliegen.
- SL am LHC hingegen könnten oft „in Ruhe“ erzeugt werden und somit in der Erde bleiben und langsam wachsen (falls sie stabil sind).

→ Neutronensterne

- sehr hohe Materiedichte (1 cm^3 wiegt ca. 500.000 Tonnen) ist groß genug, um SL, die durch kosm. Höhenstrahlung erzeugt würden, abzustoppen und sehr schnell (~ 1000 Jahre) makroskopisch wachsen zu lassen.
- die Existenz und Beobachtung von stabilen Neutronensternen schließt die Möglichkeit von stabilen mini SL aus.

S. Giddings, M. Mangano: <http://arXiv.org/abs/0806.3381>



mini Schwarze Löcher am LHC ?...

1. Nach unseren derzeit **gültigen Theorien** (QM & RT im 4-dimensionalen Raum-Zeit-Kontinuum) ist die Erzeugung von mini Schwarzen Löchern am LHC **absolut unmöglich** !
(man bräuchte eine Million Milliarden mal soviel Energie)

2. es gibt jedoch darüber hinausgehende, **spekulative Theorien**, die solche Objekte am LHC ermöglichen würden; dies setzt die Existenz „**höherer**“ **Raumdimensionen** voraus!

3. selbst wenn es genügend „höhere“ Raumdimensionen gäbe, wären diese „mini-black-holes“ **weder „black“ noch wären sie „holes“**:

a) sie wären extrem **heiss**, so dass sie nach Sekundenbruchteilen **zerstrahlen** würden

b) sie hätten so **geringe Massen**, dass sie - im Gegensatz zu kosmischen black holes - gravitativ keine andere Materie anziehen und „auffressen“ könnten

4. auch wenn man 3a) spekulativ negiert (es gibt keine konsistente Theorie dazu!), und man stabile black holes postuliert, benötigte ein solches sich langsam in der Erde bewegendes Objekt Jahrtausende, um durch Stöße genügend Materie aufzusammeln, bis es ein makroskopisches Objekt würde.

5. solche stabilen Objekte hätten kosmologische Konsequenzen, die man schon beobachtet hätte, wenn sie denn existierten.

... wären sehr aufregend, aber ungefährlich !

Literatur:

M. Mangano, J. Ellis et al (LHC Safety Assessment Group report):
<http://arXiv.org/abs/0806.3414>

S. Giddings, M. Mangano (astrophysical implications of ...):
<http://arXiv.org/abs/0806.3381>

B. Carr, S. Giddings: Spektrum der Wissenschaft 9/2005



quantenmechanische Argumente für $M_{\text{BH}} > M_{\text{Pl}}$:

Heisenberg's Unschärfe-Relation: $\Delta p \Delta x > \frac{\hbar}{2}$

$$\Delta x > \frac{\hbar}{2\Delta p} > \frac{\hbar}{2mc}$$

$$m > \frac{\hbar}{2c\Delta x}$$

$$\Delta x < R_s \quad m > \frac{\hbar}{2cR_s} = \frac{\hbar}{2c \frac{2Gm}{c^2}} = \frac{\hbar c}{4Gm} = \frac{M_{\text{PL}}^2}{4m}$$

$$m > \frac{M_{\text{PL}}}{2}$$

