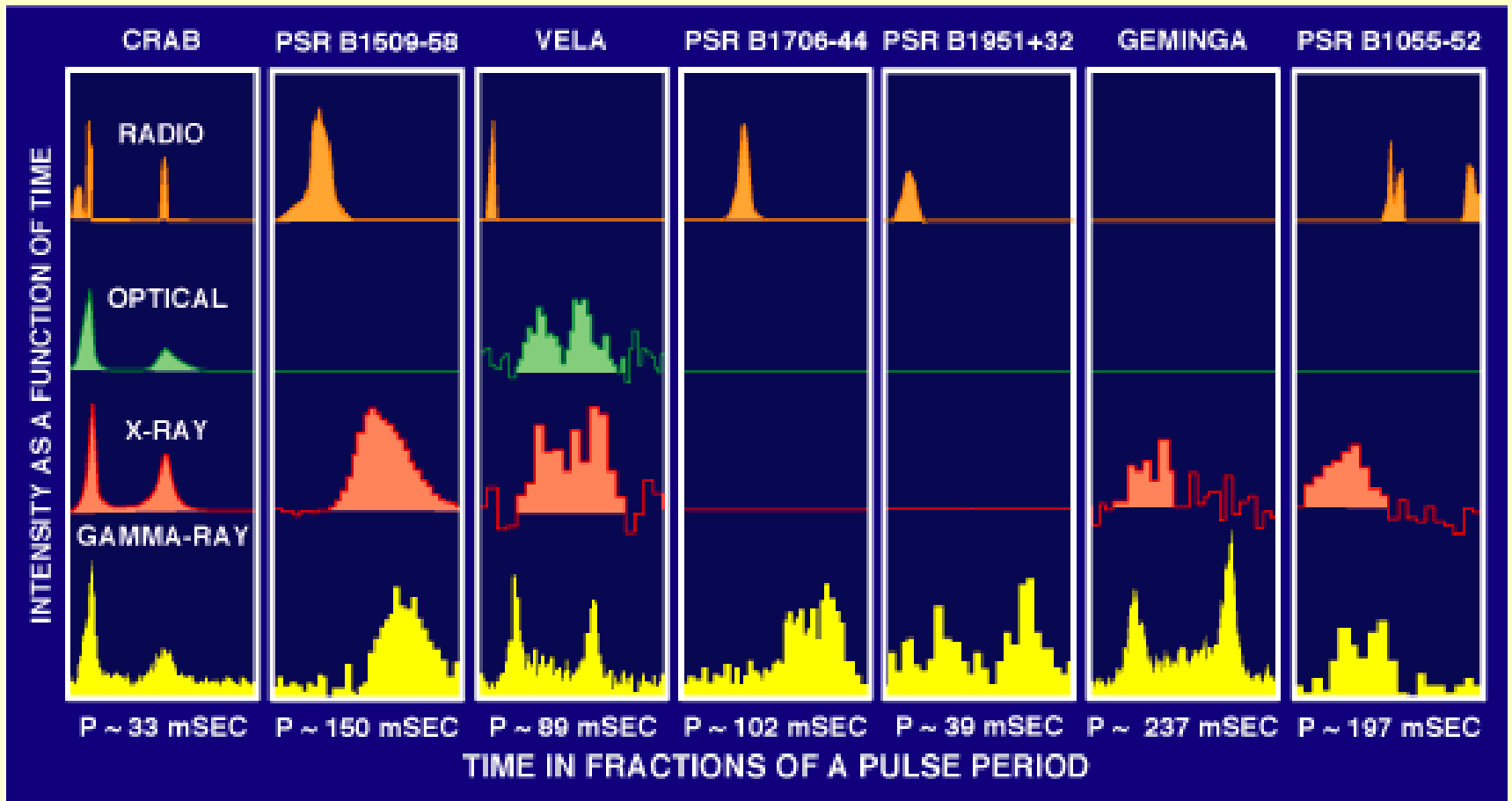




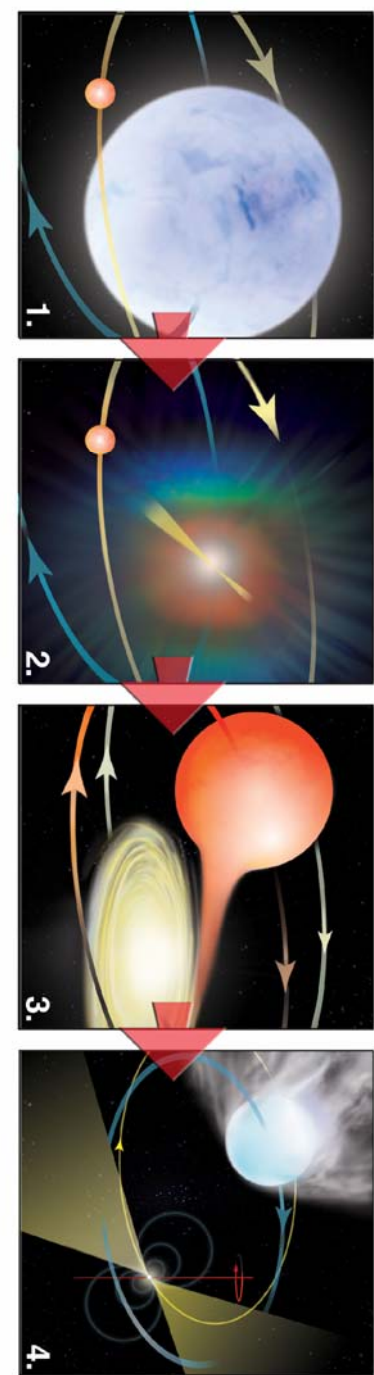
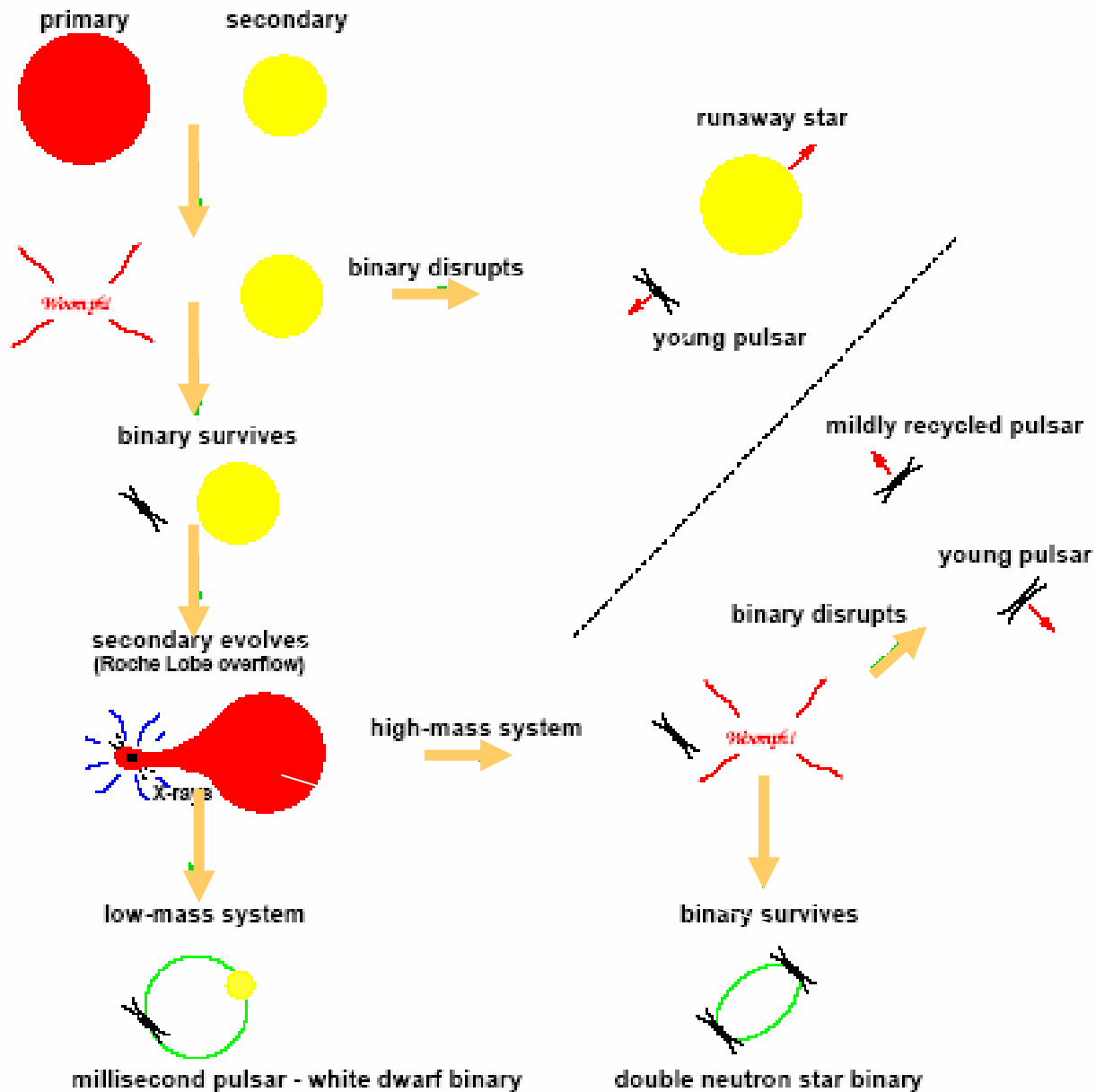
Pulsare:

Nachtrag

# Pulsar-Strahlung



# Wie Millisekunden-Pulsare entstehen



# Unterschiedliche Röntgen-Pulsare

- **Magnetosphärische Emission:** hoch-energetische Elektronen ww mit dem magnetischen Feld oberhalb der Pole des Neutronensterns (spin-powered pulsars)
- **Kühlende Neutronensterne:** wenn Neutronenstern sich aus Supernova gebildet hat, ist die Oberfläche extrem heiß (1 000 000 000 Grad), ist dann im Röntgenbereich zu sehen. Sind einige Stellen heißer als andere, können diese als *hot spots* beobachtet werden; Geminga zeigt sowohl magnetosphärische, als auch thermische Pulse
- **Akkretion:** Binären Systemen, akkretierendes Material wird aufgeheizt und strahlt im Röntgen-Bereich

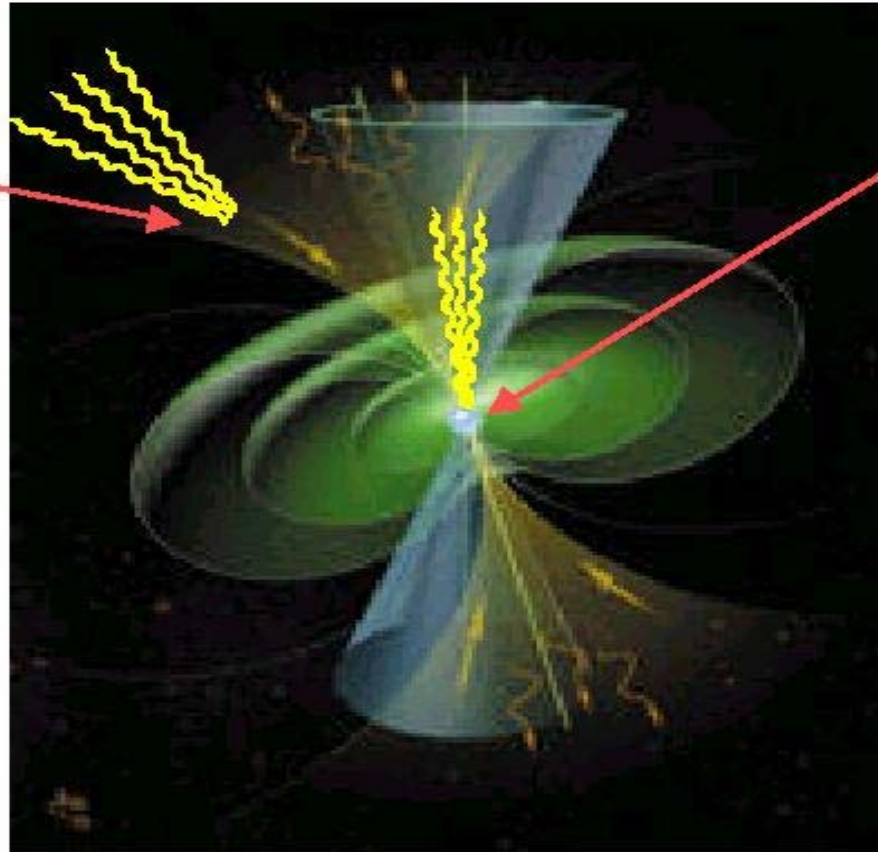
# Pulsar Modelle

## Outer Gap

Emission: multi- $\lambda$   
lightcurves

out of phase

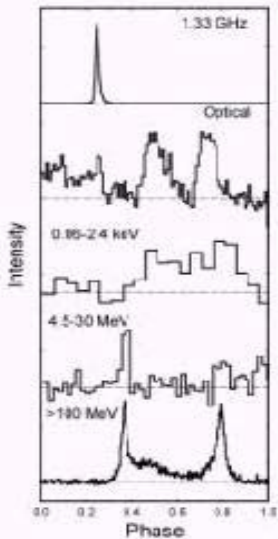
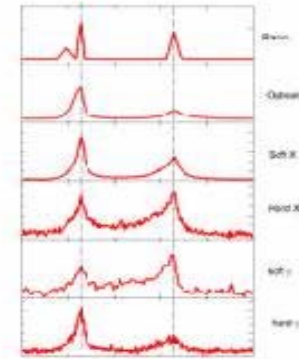
Prototype: Vela



Polar Cap Emission:  
multi- $\lambda$  lightcurves

in phase

Prototype: Crab



for  $B \sim B_{\text{crit}}$

photon splitting

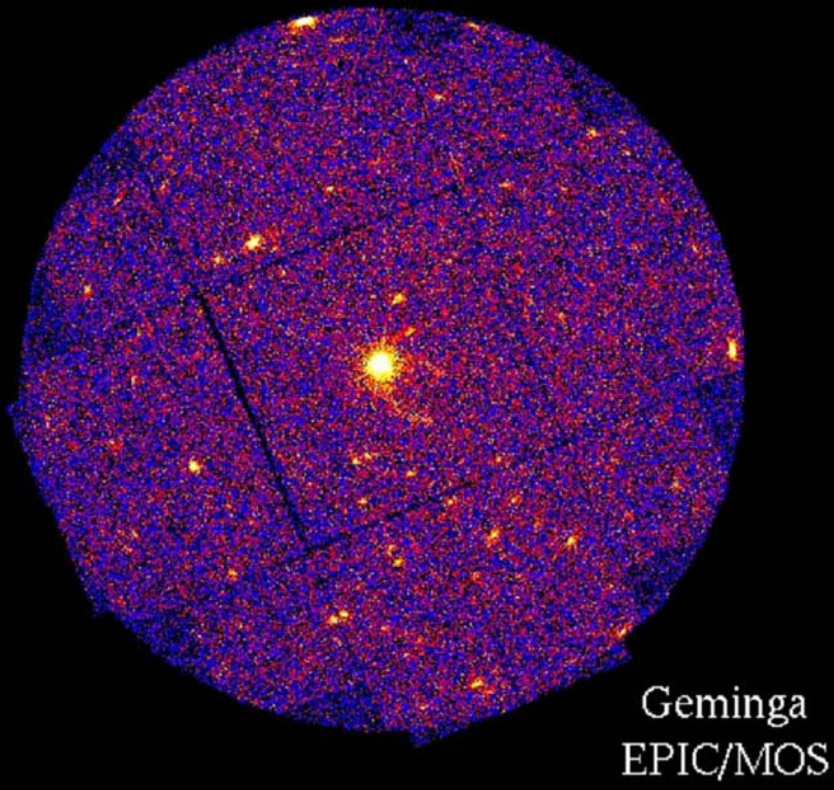
$\gamma \rightarrow \gamma\gamma$

(PSR B1509-58)

DESY Zeuthen, Juni 2001

Frequenz, Intensität und Ausdehnung d. EM- Kaskaden bestimmen Pulsprofile, Pulsspektren und Strahlbreite  
man schließt daraus auf Größe und Geometrie plasmafreier Lücken (Gaps) in verschied. Modellen

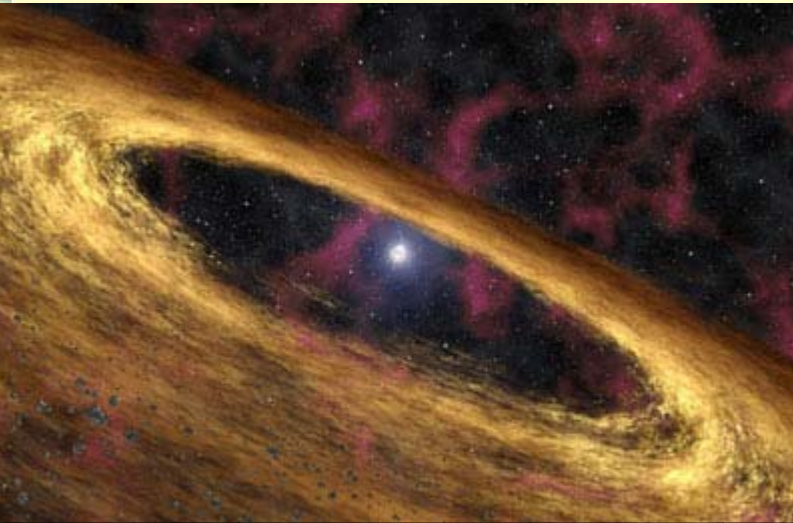
# Thermische Geographie von Neutronensternen



- XMM-Newton Beobachtungen: Röntgenflecke der Größe zwischen Fußballplatz und Golfplatz untersucht
- Hot spots: mit den Polregionen verbunden, magnetisches Feld wirkt wie Trichter und elektrisch geladene Teilchen stürzen zurück auf die Oberfläche (Vergleich zu Nordlichtern auf der Erde)
- Was ist der Grund für die unterschiedlichen Größen?



# Pulsare formen Planeten



- 1991: erstes planetarisches System gefunden – um einen Millisekunden-Pulsar
- Wie hat sich dieses Planetensystem gebildet (vor oder nach dem Pulsar)?

Host star	Distance (light-years)	Mass (Earth=1)	Semi-major axis (AU)	Period	Eccentricity
<u>PSR 1257+12</u>	1,000	0.015	0.19	25.3 d	0.0
		3.4	0.36	66.5 d	0.02
		2.8	0.47	98.2 d	0.03
		~100	~40	~170 y	-
<u>PSR B1620-26</u>	12,400	?	~38	~100 y	-

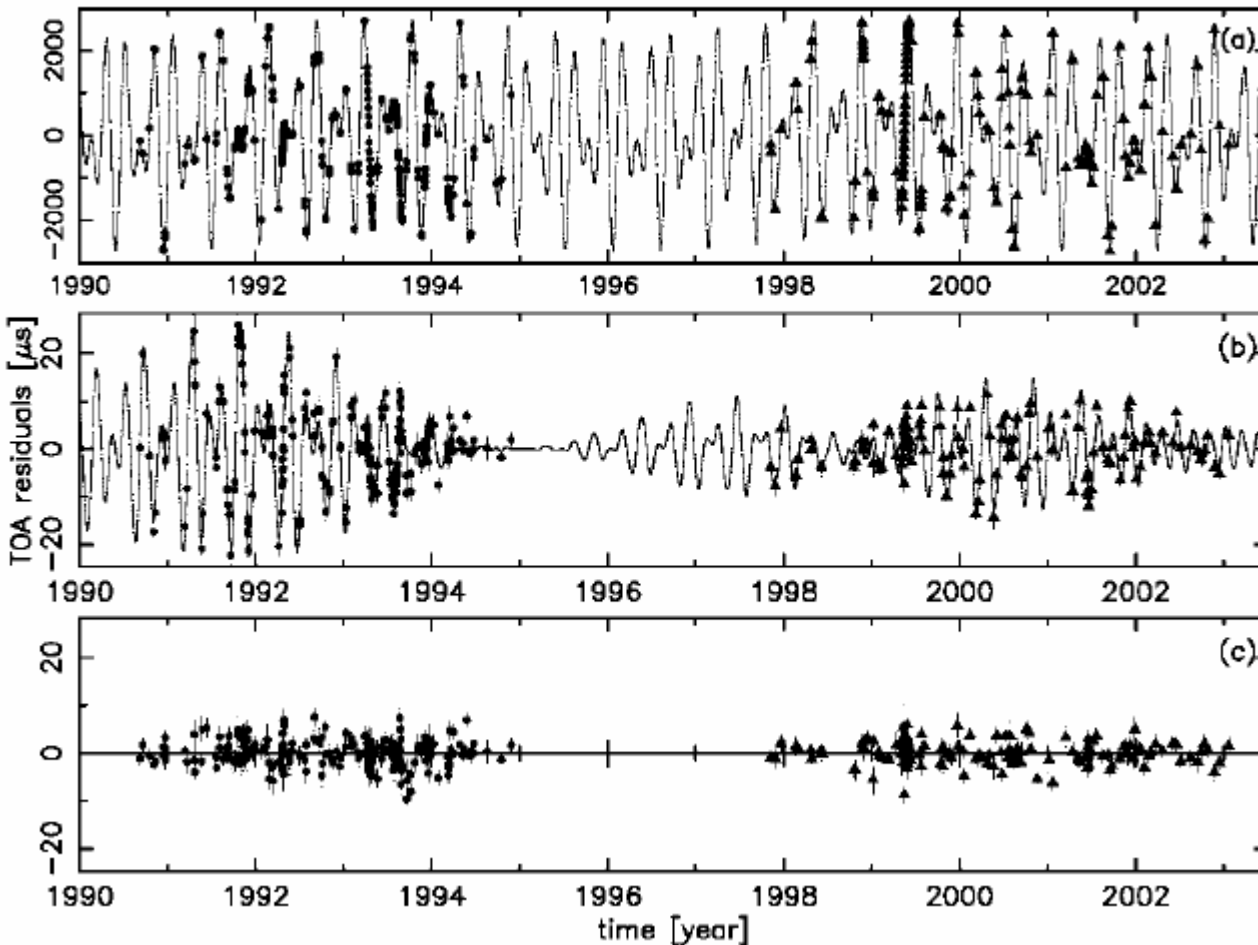
# Planeten um Pulsare finden

- Untersuchungen der zwei erdähnlichen Planeten um einen Pulsar
- Anhand von Gravitationsstörungen als Mikrosekunden-Variationen der Ankunftszeiten der Radiopulse des Pulsars
- 6.2 ms Pulsar PSR B1257+12: Pulsarmasse 1.4 Sonnenmassen, Planetenmassen: 4.3 und 3.9 Erdenmassen
- Timing model: Pulsar Spin, astrometrische Parameter, Bahnparameter, Störungen müssen parametrisiert werden, etc.



# Planeten um Pulsare finden

PSR B1257+12, Arecibo, 430 MHz



3 Zeitmodelle für  
Beobachtungen bei 430  
MHz

Gefüllte Kreise und  
Dreiecke: Messungen,  
durchgezogene Linie:  
Simulation, vorhersagen

A) Residuen nach Fit mit  
Modell ohne Planeten, es  
dominieren die Kepler-  
Bahn Effekte der Planeten  
B und C

B) Residuen für das  
Modell mit Kepler-Bahnen  
für A, B, und C; es bleiben  
Störungen zw. Planeten B  
und C.

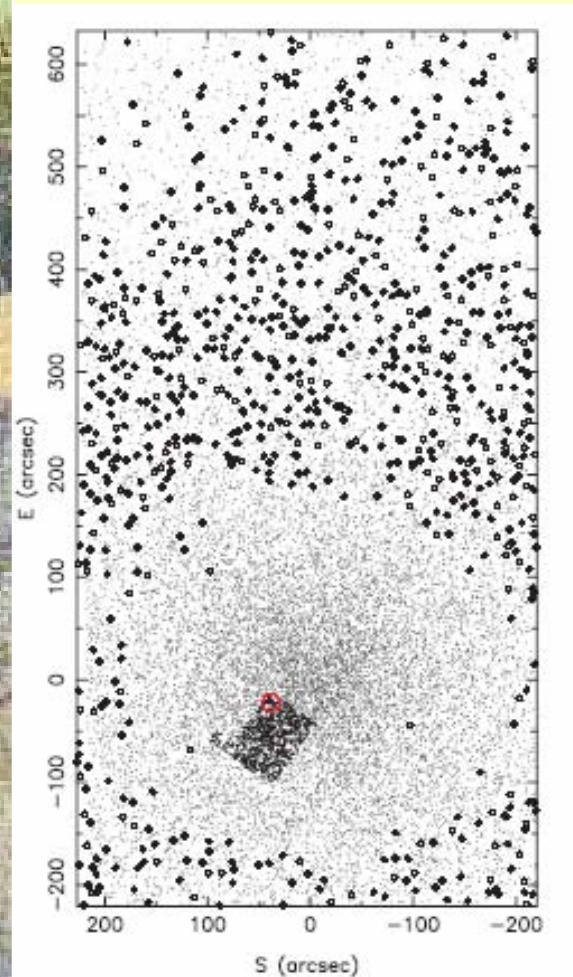
C) Residuen für ein Modell  
mit Standard-Pulsar-  
parameter, Kepler und  
nicht-Kepler-Bahn-Effekte

# Parameter in Pulsar/Planeten-Systemen bestimmen

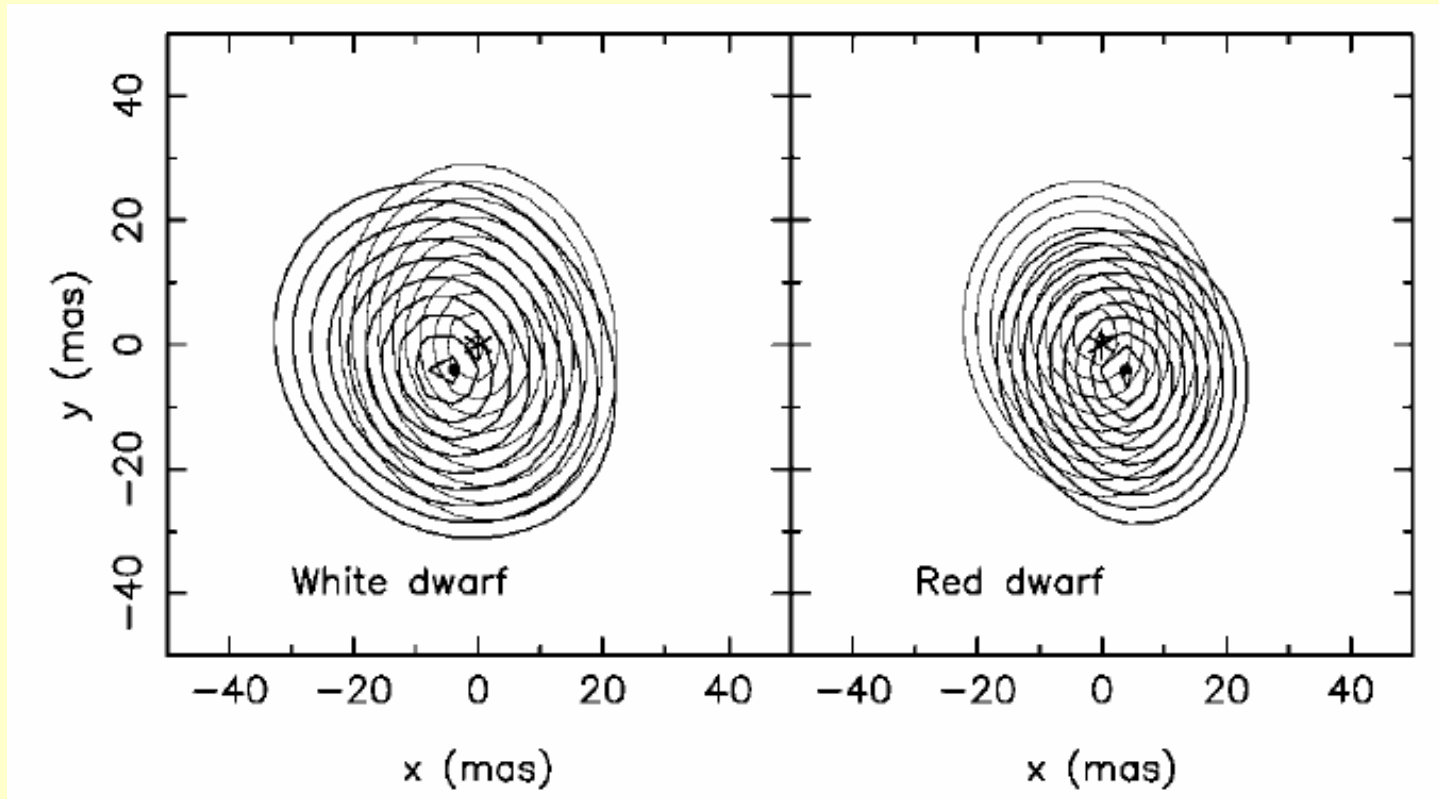
## ■ System aus:

binärer Pulsar + Weißer Zwerg + Planet

- Detektion des Planeten hängt kritisch von der Positionsgenauigkeit ab, abhängig von der Genauigkeit mit der die guide stars des HST bekannt sind
- Position und Eigenbewegungen müssen bestimmt werden
- 16240 Sterne beobachtet
- Eigenbewegung des Weißen Zwerges relativ zum Haufen ist  $0.9 \pm 1.1$  mas/Jahr, 191 Tage Bahnperiode; längere Basislinie wird benötigt (15 Jahre)



# Parameter in Pulsar/Planeten-Systemen bestimmen



- Vergleich der wahrscheinlichen Positionen (1995, 2000 Daten), Daten 1995 (dünn), Daten 2000 (dick), \* alte Daten,



Sommersemester 2006

# Die Zeit & Quanten der Raumzeit

# Heute ...

- Die Zeit im Wandel der Zeit
- Einstein / Spezielle & Allgemeine Relativitätstheorie
- Problem der Singularität
- Quantengravitation: Allgemeine Relativitätstheorie & Quantenphysik
- Nachprüfbarkeit:
  - Urknall (Big Bounce)
  - Gamma-burst
  - Kosmische Strahlung
  - Kosmologische Konstante
- Kritik
- Die innere Uhr / Zeit

# Die Zeit fließt ?





# Die Zeit im Wandel der Zeit



# Die Zeit im Wandel der Zeit

- Noch heute lebende Naturvölker lassen auf unterschiedliche Zeitvorstellungen des archaischen Homo sapiens schließen (keine abstrakten Zeiteinheiten oder Zeitmessungen aber Folge von regelmäßigen Naturereignissen)
- Nordeuropäische Steinmonumente (Megalithen), 2000-1600 v. Chr.: Schauplatz religiöser Feste und riesige astronomische Meßinstrumente; Bsp. Stonehenge



# Die Zeit im Wandel der Zeit

- Seit 3000 v. Chr. Verwandeln sich Bauernkulturen in Stadtkulturen: Zeitbestimmung nimmt jetzt zentrale Stellung für die Organisation des Staates und des öffentlichen Lebens ein (Ägypten: Sternuhren)
- Babylonier stellen genaue Tabellen für den Aufgang des Mondes her
- Heraklit (ca. 500 v. Chr.): Bild vom Fluß, der in ständiger Veränderung immer neues Wasser mit sich führt; Heraklit der Entdecker irreversibler, unwiederholbarer Prozesse und damit des „Zeitpfeils“?
- Parmenides (ca. 500 v. Chr.): nur das ist wirklich, was dauerhaft und unveränderlich ist und nicht das, von dem wir sagen, daß es in der Vergangenheit war oder in der Zukunft sein wird; Veränderung ist Einbildung und nur Dauer wirklich

# Die Zeit im Wandel der Zeit

- Zenon von Elea (ca. 460 v. Chr.): Zeitpfeil
- Pythagoras (ca. 497 v. Chr.) nicht irgendwelche Urstoffe, sondern die sie bestimmenden mathematischen Gesetze sind zeitlos und ewig
- Platon (427-347 v. Chr.) die vollkommenen geometrischen Formen sind Beispiele der zeitlosen Urbilder und Ideen der Dinge, von denen die Erscheinungen unserer Wahrnehmung nur unvollkommene Abbilder sind (Höhlengleichnis); Platon begründet im Dialog Timaios seine Lehre von Zeit und Zeitlosigkeit; Sternenhimmel ist bewegtes Bild der Ewigkeit



# Die Zeit im Wandel der Zeit

- Aristoteles (384-322 v. Chr.) kritisiert platonische Trennung eines zeitlichen Kosmos von einer zeitlosen und ewigen Ideenwelt als fiktiv und künstlich;
  - Aufgabe der Physik ist es die Prinzipien und Funktionen der Vielfalt und Veränderung in der Natur zu erklären; Bewegung wird als Veränderung bestimmt;
  - Eine Strecke ist ein Kontinuum, in dem zwar potentiell unendlich viele Schnitte vorgenommen werden können, das aber nicht aus aktuell unendlich vielen Elementen besteht (wichtig in moderner Mathematik);
  - das „Jetzt“ ist nicht Teil der Zeit; man muß sich die Gegenwart als potentiellen, nicht aktuellen Schnitt im Zeitkontinuum vorstellen, der Zukunft von Vergangenheit trennt; erster Philosoph, der den Begriff des Kontinuums präzise formuliert; Der Zeit kommt kein eigenes Dasein zu; Wirklich sind nur die Bewegungen der Natur. Das Jetzt eines Augenblicks ist ein Schnitt im Kontinuum der Bewegung; erste Logik der Zeitmodalitäten
  - „Morgen wird eine Seeschlacht stattfinden“

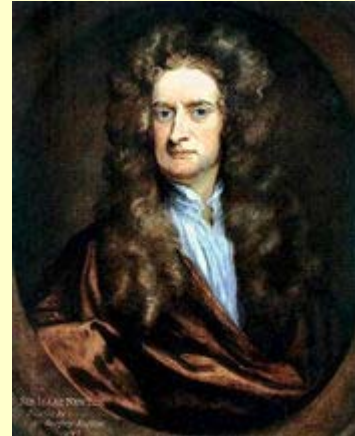
# Die Zeit im Wandel der Zeit

- Augustinus (354-430 n. Chr.): Zeit wurde mit dem All erschaffen; Bewegung setzt Zeit voraus
- Ptolemaios (ca. 150 n. Chr.): größte Genauigkeit in der antiken mittelalterlichen Astronomie
- Nikolaus Oresme: beschreibt 1377 das Universum als regelmäßige Räderuhr; Geburtsstunde eines universalen mechanisierten Zeitbegriffs
- Kepler (1571-1638): Zeit als Maß der Bewegung (Radius Sonne-Planet durchläuft in gleichen Zeiten gleiche Flächen)



# Die Zeit im Wandel der Zeit

- Galileo Galilei (1564-1642): Zeit und Bewegung als Grundbegriffe der neuzeitlichen Mechanik; gleichförmige Beschleunigung (freier Fall); Zusammenhang zw. zeitlichen Veränderungen und Kräften; Anfänge der Infinitesimalrechnung; wichtige Beiträge zur Zeitmessung (Pendeluhr)
- Newton: Unterscheidung von absoluter und relativer Zeit
- Leibniz: betrachtet nur relative Räume bzw. Bezugssysteme



# Die Zeit im Wandel der Zeit

## ■ Einstein:

- Spezielles Relativitätspostulat: Alle gleichförmig geradlinig zueinander bewegten Inertialsysteme sind physikalisch gleichwertig
- Postulat der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit: die Lichtgeschwindigkeit ist in (wenigstens) einem Inertialsystem konstant unabhängig vom Bewegungszustand der Lichtquelle

*Der zeitgerichtete und irreversible Alterungsprozeß wird durch die Spezielle Relativitätstheorie nicht erklärt.*

- Um auch die Gravitationsgleichung der Newtonschen Physik zu erfassen: Erweiterung der Speziellen zur Allgemeinen Relativitätstheorie

*Auch hier keine Zeitrichtung („Älterwerden“) ausgezeichnet, sondern als bisher unerklärte Erfahrungstatsache angenommen.*

# Relativität



# Physik im Zug (klassisch)

- Im gleichmäßig fahrenden Zug (Geschwindigkeit  $v$ ) kann man nach vorne oder hinten gehen mit der Geschwindigkeit  $w$ . Gegenüber dem Bahndamm geht man dann mit Geschwindigkeit  $v \pm w$ .
- Im gleichmäßig fahrenden Zug läßt sich genauso Tischtennis spielen wie auf der Wiese am Bahndamm
- Gesetze der klassischen Mechanik gelten in jedem Inertialsystem gleichermaßen
- Transformationen zw. den Bezugssystemen heißen Galilei-Transformationen
- **Galilei-Invarianz:** Gesetze ändern sich nicht bei einer Galileitansformation



# Physik im Zug (klassisch)

- Genauso läuft eine Welle in einem Wasserbecken ( $w$ ) im Zug ( $v$ ) mit  $v \pm w$  gegenüber dem Bahndamm
- Eine Lichtwelle (Geschwindigkeit  $c$ ) hat dann die Geschwindigkeit  $c' = v \pm c$  gegenüber dem Bahndamm
- Die Erde ist ein „Zug“:  $v \approx 30 \text{ km/sec}$

# Eine einfache Uhr

- Zeit zwischen Ereignissen

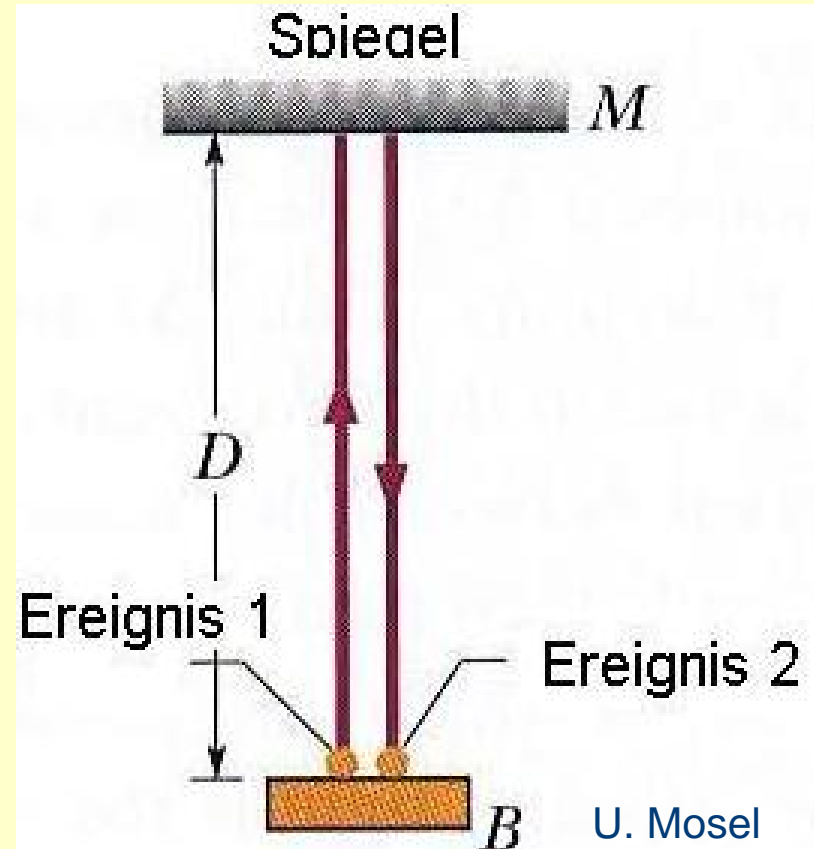
- Im Zug:

$$\Delta t_z = 2 D/c$$

- Einstein:

*„Zeit ist, was man  
auf der Uhr abliest“*

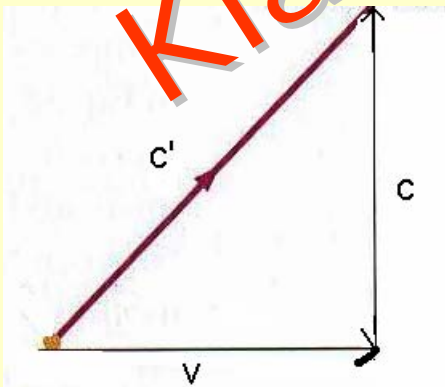
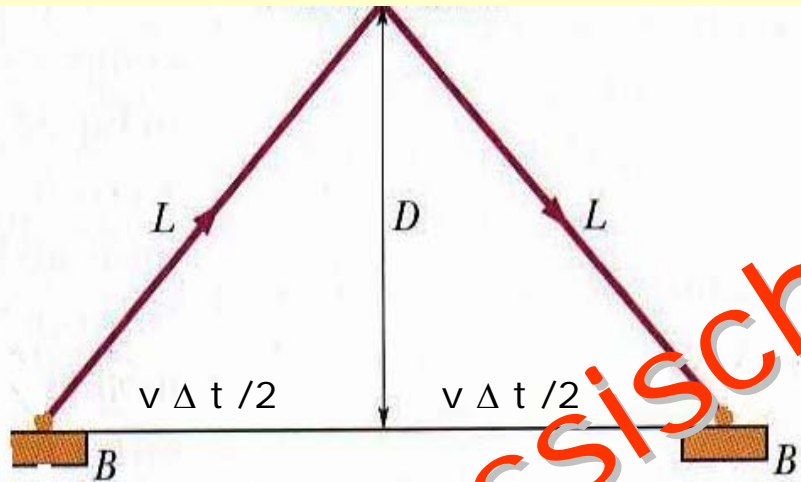
Lichtuhr: Zeitintervall wird durch die Zeit festgelegt,  
die das Licht benötigt, nach oben und wieder  
zurück zu laufen





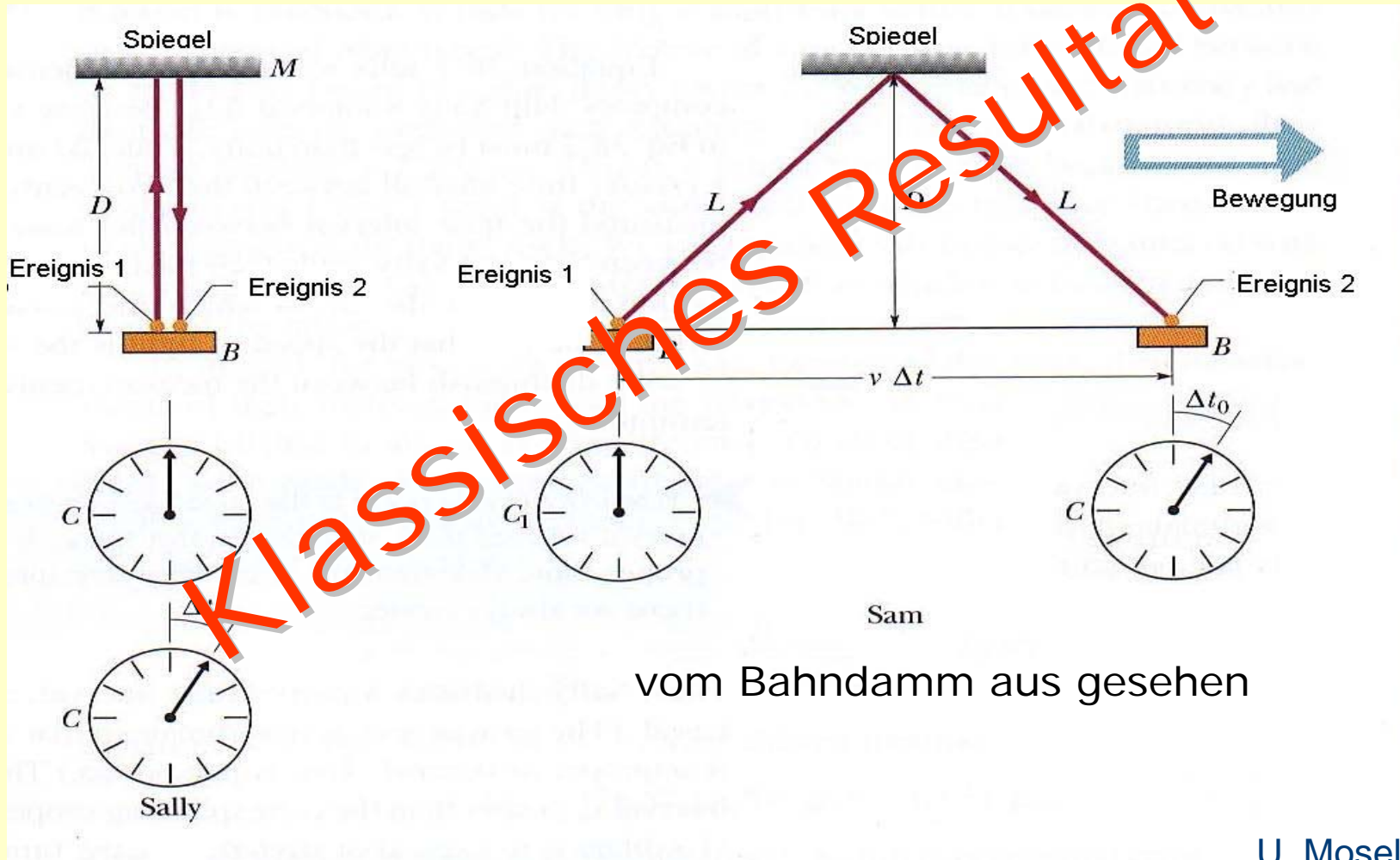
# Uhr im Zug

- Zeit zwischen Ereignissen, vom Bahndamm aus gesehen:



$$\begin{aligned}\Delta t_B &= \frac{2L}{c'} = \frac{2\sqrt{D^2 + \left(\frac{v\Delta t_B}{2}\right)^2}}{c'} \\ &= \frac{2\sqrt{D^2 + \left(\frac{v\Delta t_B}{2}\right)^2}}{\sqrt{c^2 + v^2}} \\ &= \frac{2D}{c} = \Delta t_Z \quad !!\end{aligned}$$

# Uhr im Zug



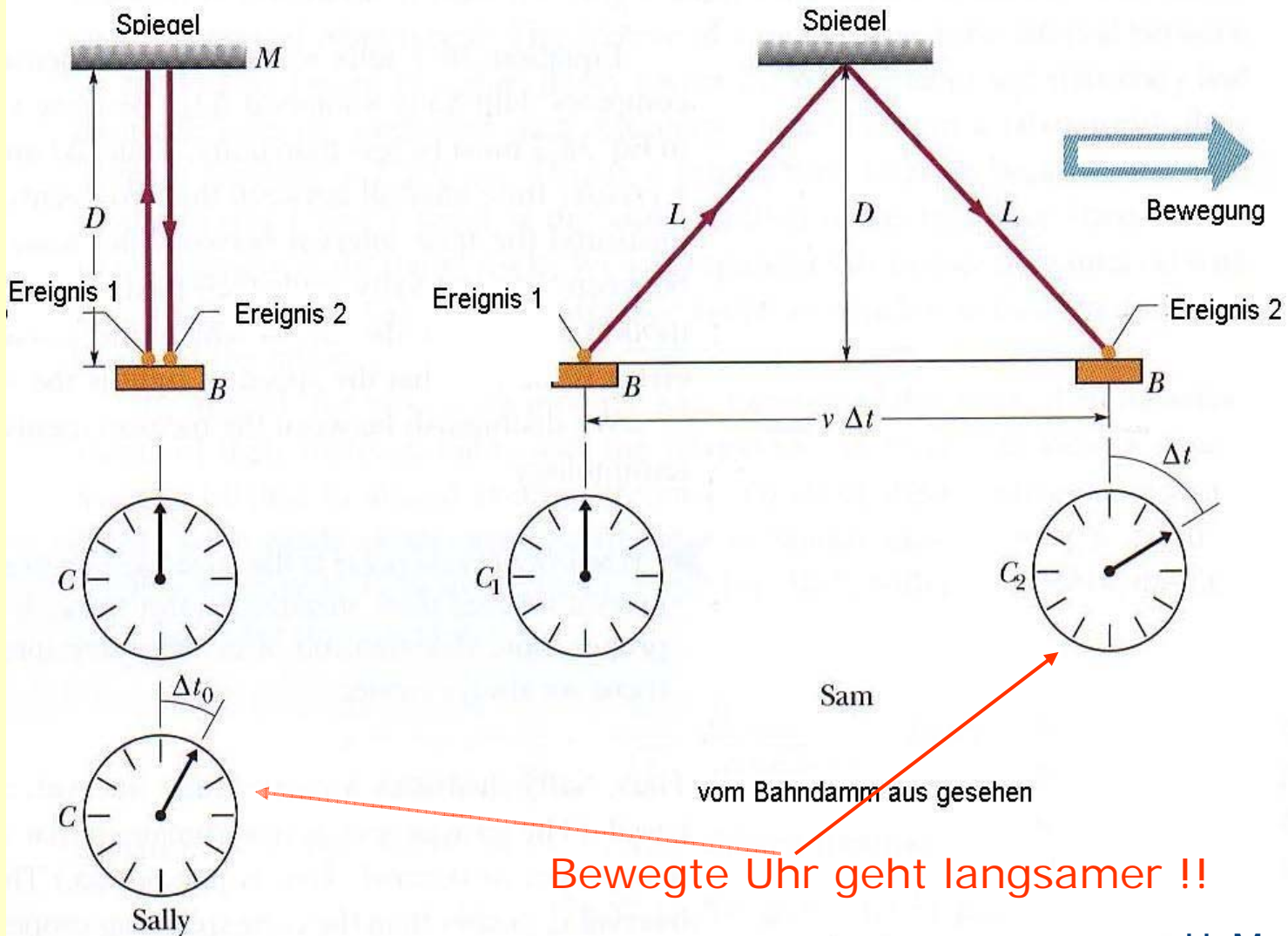
# Postulate der Relativitätstheorie

In gleichförmig bewegten (*Inertial*) Systemen laufen alle physikalischen Prozesse gleichartig ab (Galilei)

Die Lichtgeschwindigkeit hat in allen Inertialsystemen den gleichen Wert

$$c \approx 300.000 \text{ km/sec}$$

# Uhr im Zug (relativistisch)



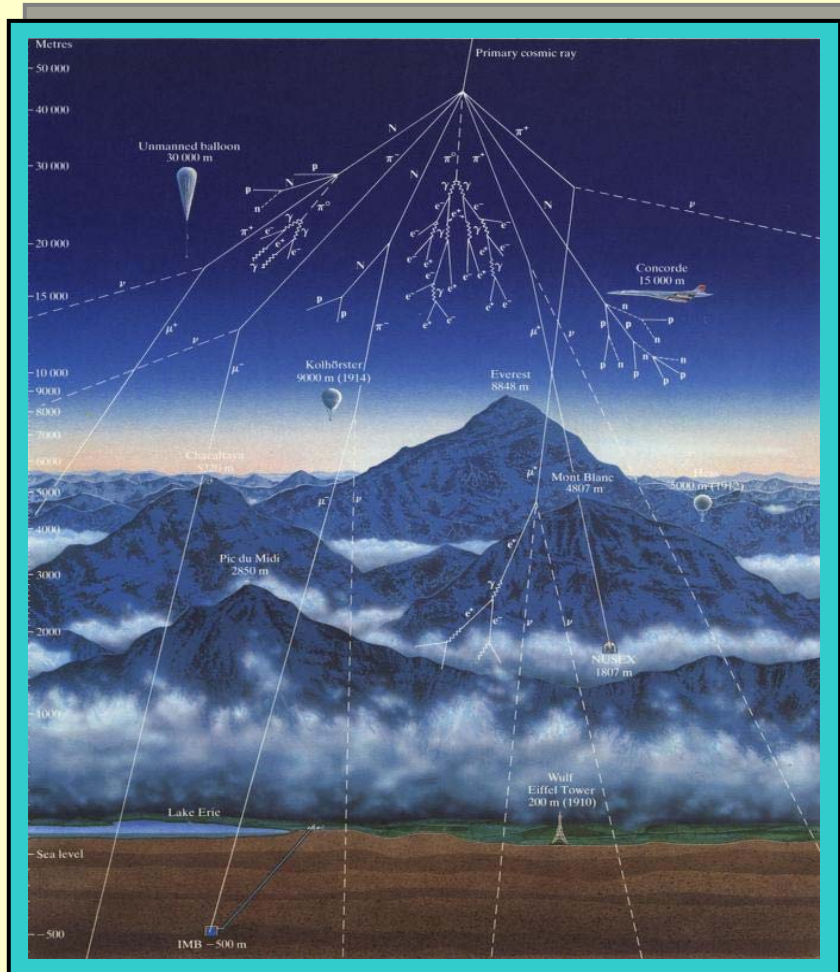
# Zeit-Streckung im Zug

- Die Uhr im Zug geht langsamer

$$\Delta t_B = \frac{1}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} \Delta t_Z = \gamma \Delta t_Z$$

- $v = 100 \text{ km/h}$ ,  $v/c \approx 10^{-7}$   
 $\rightarrow \gamma \approx 1 + 10^{-14}$
- $v = 150.000 \text{ km/sec}$ ,  $v/c = 1/2$   
 $\rightarrow \gamma \approx 1,15$
- $v = 290.000 \text{ km/sec}$ ,  $v/c \approx 0,967$   
 $\rightarrow \gamma \approx 3,9$

# Beweis durch Muonen



- Muonen entstehen in etwa 15 km Höhe durch Kollision energiereicher Teilchen mit der Atmosphäre. Sie machen ca 80% der Höhenstrahlung auf der Erde aus.
- Lebensdauer des ruhenden Muons:  $\tau \sim 2.2 \times 10^{-6} \text{ sec}$
- Geschwindigkeit:  $\sim c$
- Weg des Muons:  
 $s = c \tau = 0.7 \text{ km}$

U. Mosel

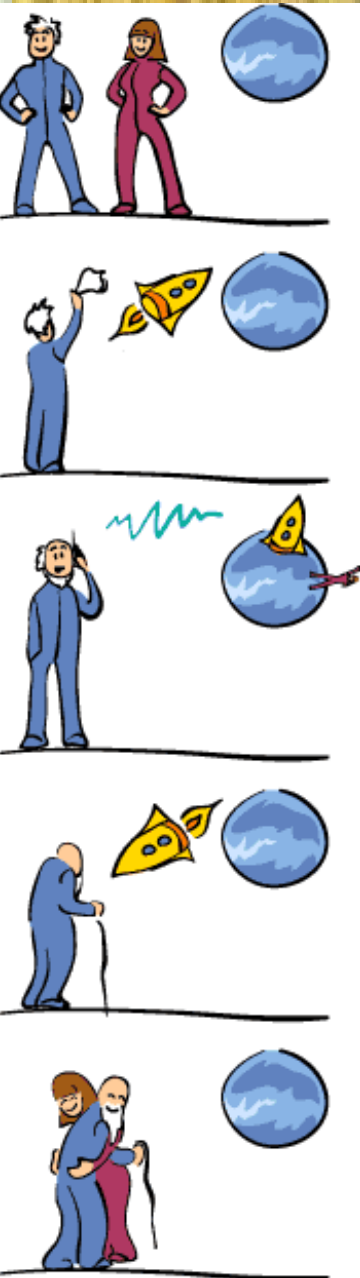
Trotzdem erreichen Sie die Erde:  $\sim 200 / (\text{m}^2 \text{ sec})!$



# Zeit-Streckung

- Rakete fliegt mit  $v = 0.98 c$  ( $\gamma \approx 5$ ) zu einem Stern, der 20 Lichtjahre von der Erde entfernt ist, und wieder zurück. Jeder Weg dauert nach der Erduhr ca. 20 Jahre. Die Rakete kommt also nach 40 Jahren (Erdzeit) zurück.
- Die identische Uhr in der Rakete ‚tickt‘ langsamer: auf ihr vergehen zwischen Abflug und Rückkehr nur  $2 \times 4 = 40/\gamma = 8$  Jahre.

# Biologische Uhren

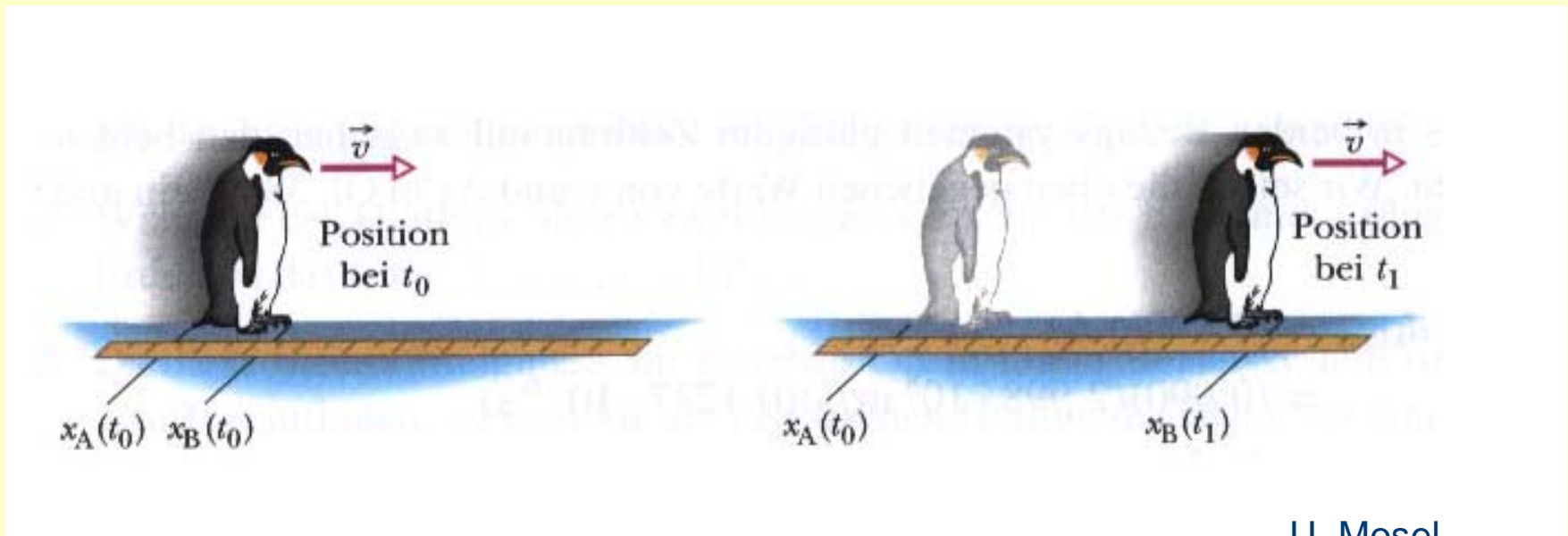


1. Zwilling bleibt auf der Erde, der 2. Zwilling fliegt mit der Rakete. Sie ist bei der Rückkehr erst 8 Jahre älter als bei Abflug, ihr Bruder ist aber 40 Jahre älter!

Biologische Uhr = Lichtuhr = mech. Uhr

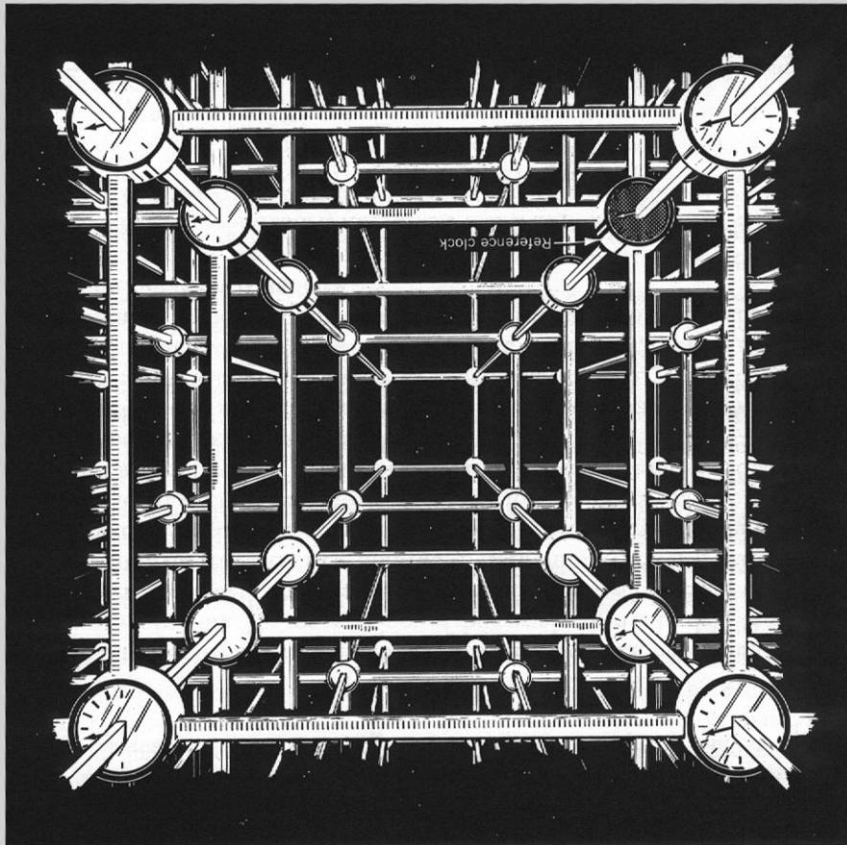
# Längenmessung

- Bei einer Längenmessung müssen die Positionen von Anfang und Ende zur gleichen Zeit gemessen werden.



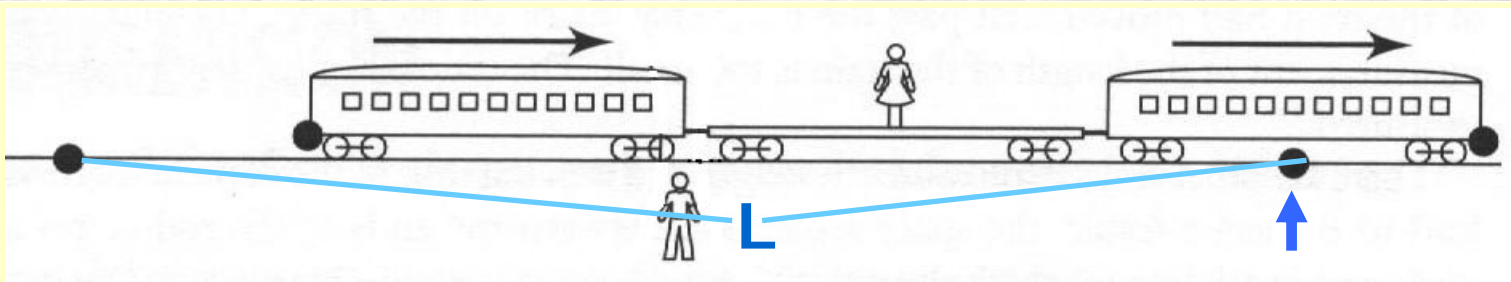
# Uhren-Synchronisation

## Gleichzeitigkeit



- Lichtblitz wird vom Ursprung ausgesendet. Uhr im Abstand  $r$  wird auf  $t = r/c$  gestellt.
- Ereignisse an verschiedenen Orten sind *gleichzeitig*, wenn die Uhren an diesen Orten die gleiche Zeit anzeigen.

# Längenmessung



Länge der Markierung am B:  $L$

U. Mosel

Fahrzeit durch diese Markierung:

• vom Bahndamm:  $\Delta t = L/v$

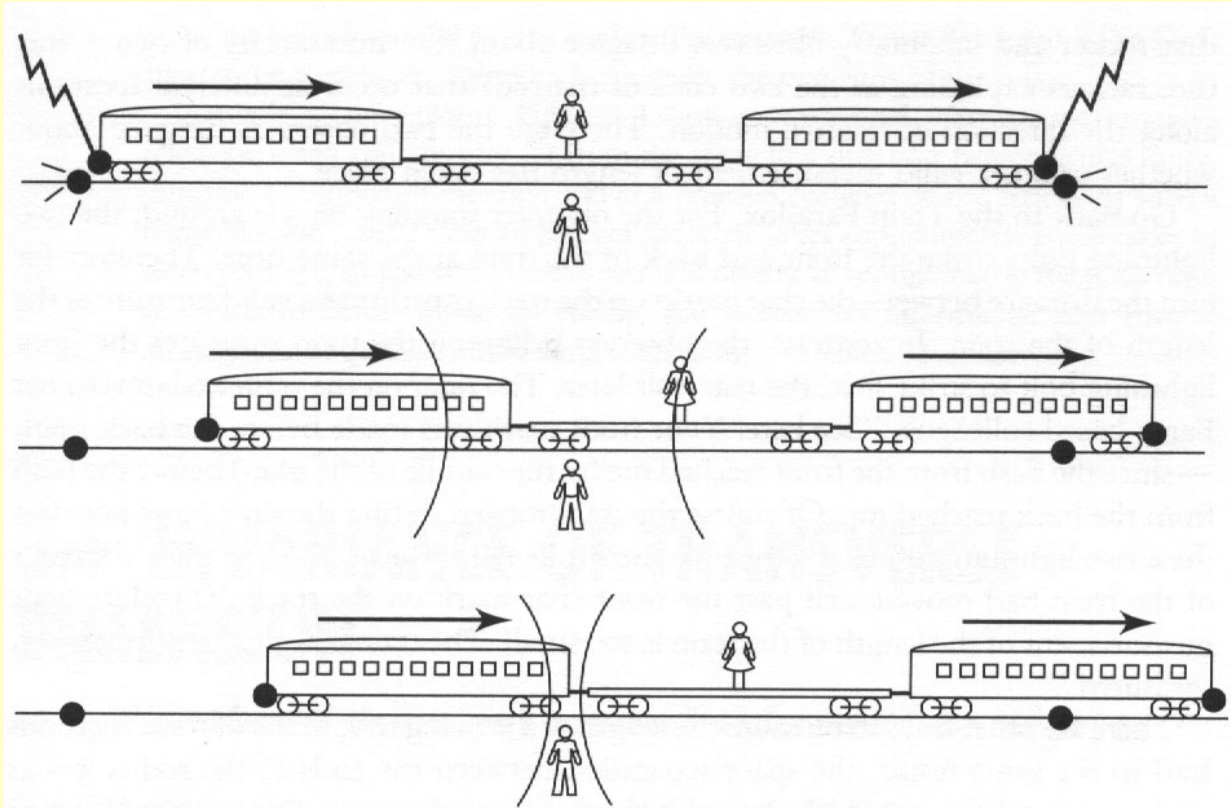
• vom Zug:  $\Delta t_z = L_z / v$

•  $\Delta t_z = 1/\gamma \Delta t \rightarrow L_z = L/\gamma$   
Längenkontraktion



# Gleichzeitigkeit

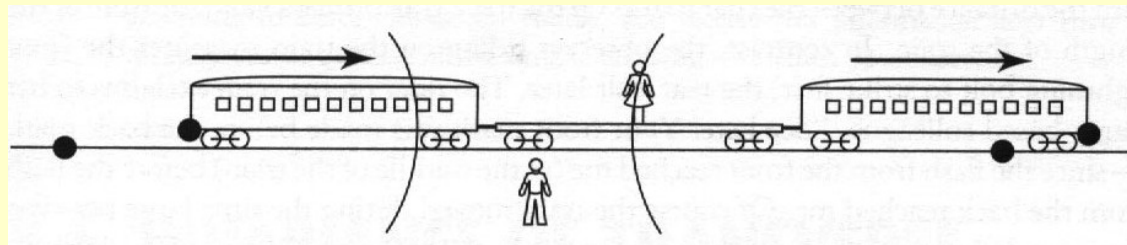
- Ein Blitz schlägt vorne und hinten im Zug ein, als gerade beide Beobachter sich passieren.



# Gleichzeitigkeit

- Beobachter am **Bahndamm**: ich stehe in der Mitte beider Markierungen, die Blitze kommen gleichzeitig an => beide Einschläge waren **gleichzeitig**.
- Beobachter im **Zug**: der Lichtblitz von vorne erreicht mich früher als der von hinten. Beide Einschläge waren also **nicht gleichzeitig**.

Gleichzeitigkeit hängt vom Bezugssystem ab



# Gleichzeitigkeit

- Laufzeit des vorderen Signals zum bewegten Beobachter im Zug, gesehen vom Bahndamm:

$$t_v = (L/2 - v t_v)/c$$

- Laufzeit des hinteren Signals:

$$t_h = (L/2 + v t_h)/c$$

- Laufzeitdifferenz

$$t_h - t_v = L v/c^2 \gamma^2 = \gamma \Delta t_Z$$

# Gleichzeitigkeit

- Laufzeitdifferenz auf der Uhr im Zug:

$$T_Z = (t_h - t_v)/\gamma = L v/c^2 \gamma$$

- Laufzeitdifferenz auf der Uhr am Bahndamm:

$$T = 0$$

Was am Bahndamm gleichzeitig stattfindet,  
ist im Zug um  $T_Z$  **getrennt**

# Invarianz der Raum-Zeit

- Raum-Zeit Abstand der Ereignisse

am Bahndamm:

$$(\Delta x)^2 - (c\Delta t)^2 = (\Delta x)^2 - 0 = L^2$$

im Zug:

$$(\Delta x_Z)^2 - (cT_Z)^2 = \gamma^2 L^2 - c^2 \left( L\gamma v / c^2 \right)^2 = L^2$$

- Raum-Zeit Abstand ist in beiden Systemen (Bahndamm und Zug) gleich !
- => Beginn der nichteuklidischen Geometrie

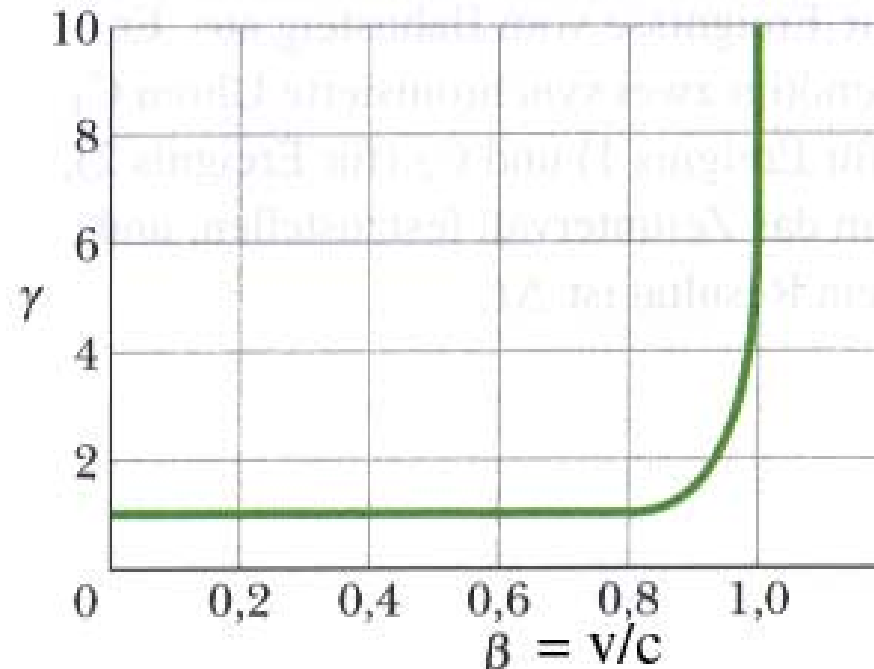


# Zeitstreckung und Längenschrumpfung

- „Zeitstreckungsfaktor“

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$$

zeigt, daß  $v = c$  maximal mögliche Geschwindigkeit ist.



$$E = m c^2$$

- Weitere Konsequenz der speziellen Relativitätstheorie: massive Objekte können nicht auf Geschwindigkeiten, die grösser (oder gleich) der Lichtgeschwindigkeit sind, beschleunigt werden (experimentell bestätigt, Bsp. CERN)
- In klassischer Mechanik ist kinetische Energie eines massiven Objekts gegeben durch  $E = \frac{1}{2} m v^2$ 
  - Die kinetische Energie eines Körpers kann durch Beschleunigung erhöht werden
- Wegen der Maximalgeschwindigkeit massiver Objekte macht die klassische Formel in der speziellen Relativitätstheorie keinen Sinn

$$E = m c^2$$

- Einstein: die Energie eines massiven Objekts ist  $E=mc^2$
- $m$  ist dynamische Masse
- Masse hängt von der Geschwindigkeit ab wie

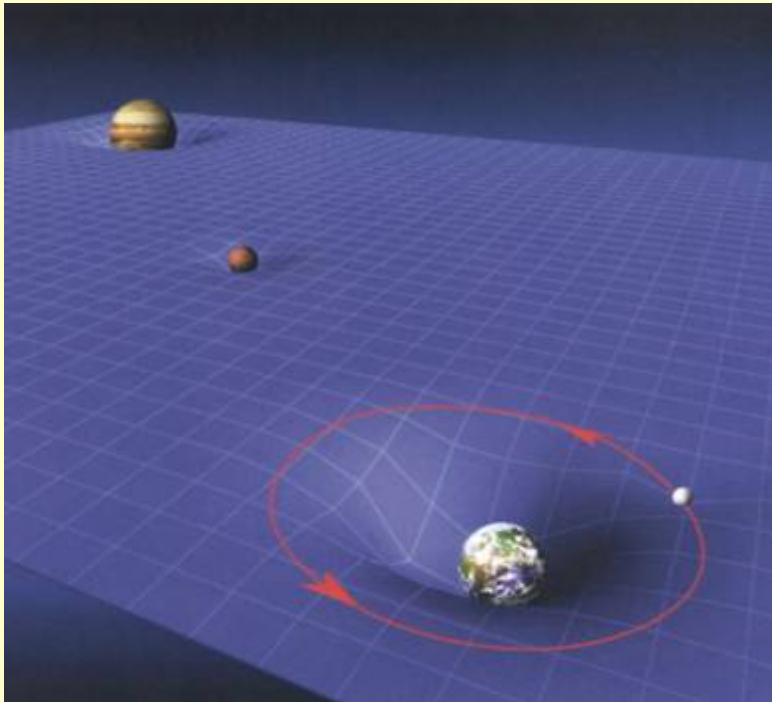
$$m = m_0 \gamma = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$$

- Bestätigt durch Energiebilanz von Kernreaktionen



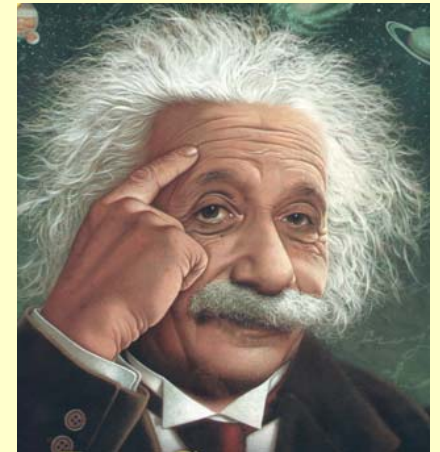
**Raum-Zeit**  
**Allgemeine Relativitätstheorie**

# Die Krümmung der Raum-Zeit



Ausschnitt aus unserem  
Sonnensystem

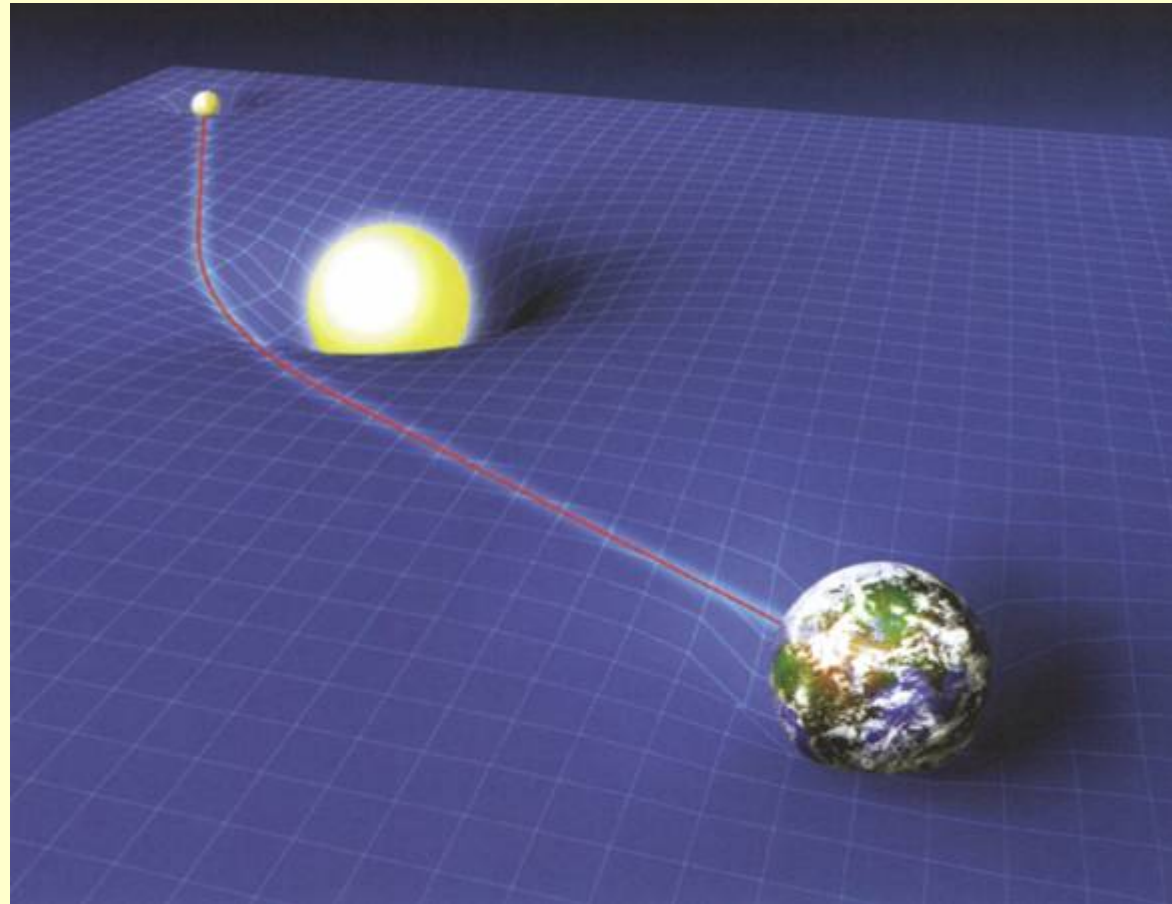
Gravitationskräfte entstehen  
durch eine Krümmung der  
Raum-Zeit.



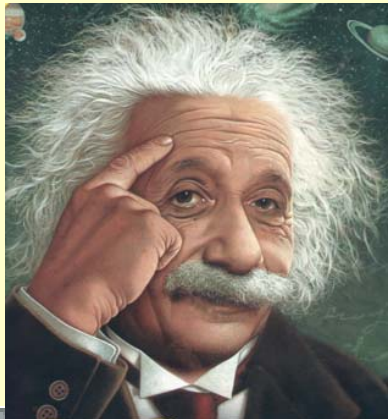
Letztere ist wiederum durch  
die Verteilung der Masse  
(Energie) bestimmt.



# Beugung von Licht durch Materie



A. Müller



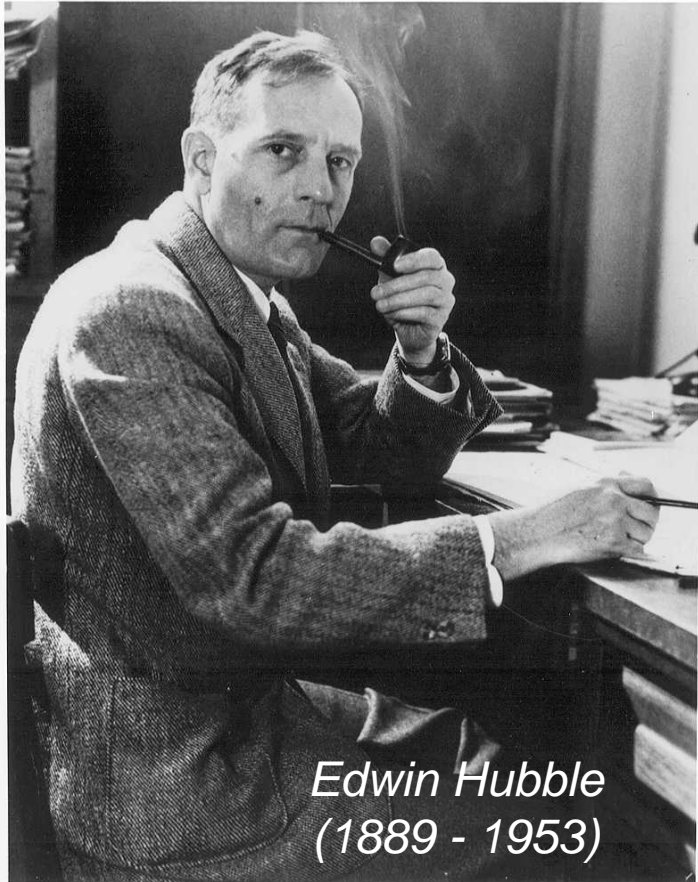
Auch Licht wird im Gravitationsfeld abgelenkt!



# Problem der Singularität



# Galaxienflucht



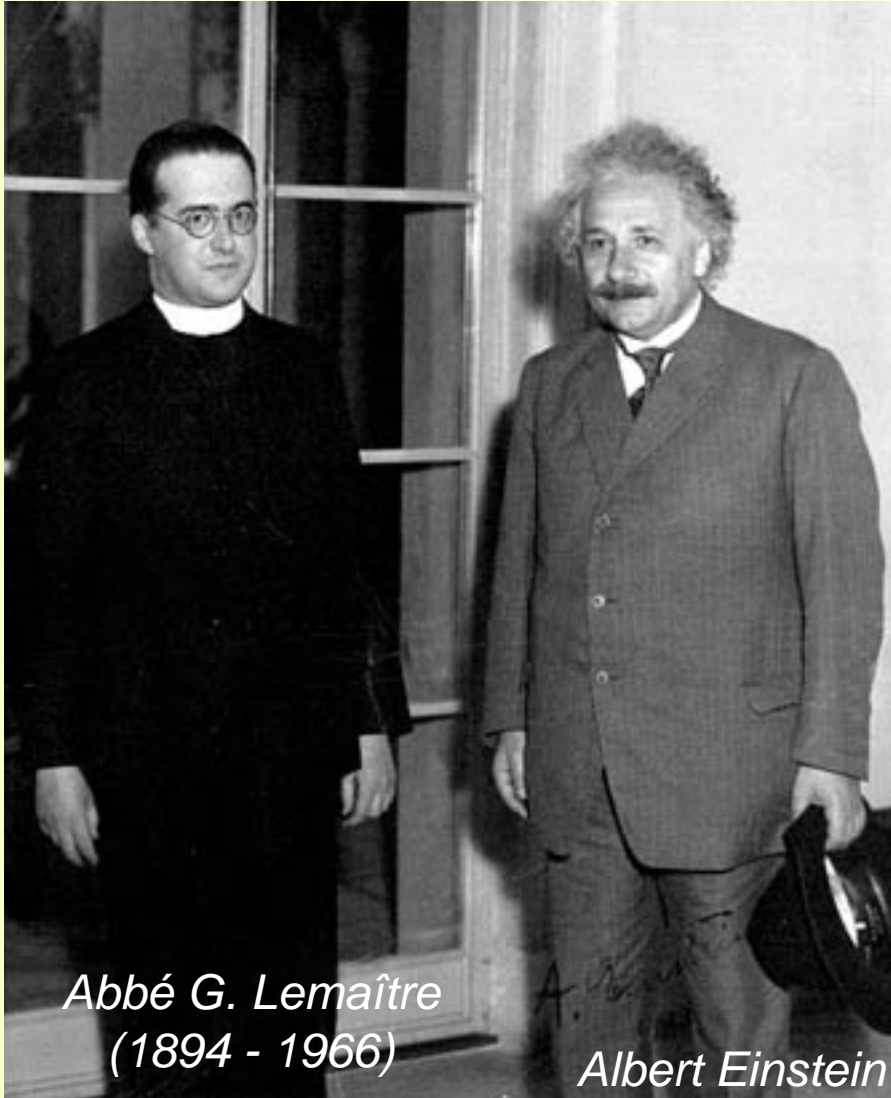
*Edwin Hubble  
(1889 - 1953)*

- 1929: empirischer Befund der Fluchtbewegung von Galaxien
- Hubble-Gesetz:

$$cz = H_0 D$$

- (gültig bis  $z \sim 0.1$  bzw. 420 Mpc)
- Hubble-Konstante  
 $H_0 = 72 \text{ km/s/Mpc}$  ist Maß für Expansionsgeschwindigkeit des Kosmos

# Geburt des Raums



Abbé G. Lemaître  
(1894 - 1966)

Albert Einstein

- ◆ 1925: Entdeckung eines expandierenden Kosmos als Lösung der Feldgleichungen
- ◆  $\Lambda > 0$ ,  $k = +1$
- ◆ Friedmann-Lemaître-Modell
- ◆ Geburt des Raums (Nature 1931), „Vater des Urknalls“

# Problem der Singularität

- Nach den Singularitätssätzen von R. Penrose (1956) und S. Hawking (1970) folgt aus der Allgemeinen Relativitätstheorie, daß die kosmischen Standardmodelle eine anfängliche Raum-Zeit-Singularität mit unendlicher Krümmung haben müssen (Urknall);
  - Singularitäten haben den Nachteil, daß an Raum-Zeit-Stellen mit unendlicher Krümmung die physikalischen Gesetze nicht definiert sind und daher keine Prognosen über das physikalische Geschehen möglich sind; Im Rahmen der relativistischen Kosmologie ist Zeit nur eine reelle Koordinate, um Ereignisse zu markieren, die Frage nach dem „Davor“ ist mathematisch nicht definiert; ähnliches Problem mit Schwarzen Löchern





# Problem des „Davor“



# „Davor“

- Hawking: in Vereinigungstheorie bilden die drei Raumrichtungen zusammen mit der imaginären Zeit ein Modell des Universums, das ohne Grenzen und Ränder in sich geschlossen ist. Diese Raum-Zeit hätte nicht nur immer bestanden, sondern jedes physikalische Geschehen wäre gesetzmäßig erklärbar. Die historisch tradierten Vorstellungen, daß etwas irgendwie „anfangen“ oder irgendwann „geschaffen“ werden muß, sind dafür methodisch schlicht unangemessen und werden als *menschliche Anschauungen* entlarvt, die durch Adaption an die begrenzten Raum-Zeit-Ausschnitte unserer alltäglichen Erlebniswelt entstanden sind
- Überprüfbarkeit: Hawking-Strahlung Schwarzer Löcher

# Quanten + Gravitation



# Quanten

- Planck: um 1900 führt er ein nach ihm benanntes minimales Wirkungsquantum ein
- Bohr wendet 1913 die Quantenhypothese auf das Rutherford'sche Atommodell an
- Schrödinger: die kausale Entwicklung der Zustände eines Quantensystems (Atom, Elektron) ist durch die (zeitabhängige) Schrödingergleichung eindeutig determiniert; ist zeitsymmetrisch; Zeit ist in der Quantenmechanik nur ein invarianter Parameter wie in der klassischen Mechanik und Relativitätstheorie, keine Messgröße im Sinne eines quantenmechanischen Operators

# Auf dem Weg zur Loop-Quantengravitation

- In den 30iger Jahren: Gerüchte, dass W. Heisenberg eine Theorie, die Gravitation und Elektromagnetismus vereint, gefunden hat und dass er diese publizieren würde, sobald er die Details ausgearbeitet hätte
  - W. Pauli: schickt Postkarte an Freund mit leerem Rahmen
- ....
- Heisenberg: seine Unschärferelation bietet Erklärung für Singularität am Anfang: verbindet Zeit und Energie so, daß das Produkt der Meßstreuungen von Energie und Zeit nicht kleiner als das Plancksche Wirkungsquantum werden kann; je kürzer das Zeitintervall bestimmt wird, um so größer wird die Meßstreuung der Energie; für sehr kurze Zeitintervalle wird daher die Aufhebung der Energieerhaltung möglich
- Lee Smolin heute: „wir sind 10 bis 15 Jahre davor, eine moderne Version der Arbeit von Heisenberg zu vervollständigen“



- Antike Naturphilosophen: Materie lässt sich nicht beliebig fein unterteilen, besteht aus winzigen „Atomen“ (unteilbar)
- Bis vor einem Jahrhundert: die Natur macht keine Sprünge!
- Quantenphysik: bestimmte Größen (die Energie eines Atoms) treten nur in bestimmten diskreten Einheiten auf; sagt präzise das Verhalten von Atomen und Elementarteilchen voraus sowie die Eigenschaften der zwischen ihnen wirkenden Kräfte
- Gleichzeitig: A. Einstein: Allgemeine Relativitätstheorie: beschreibt Schwerkraft als Folge der Krümmung von Raum und Zeit – die eine gemeinsame „Raumzeit“ bilden – durch die darin befindliche Materie
- Besteht auch der Raum aus diskreten Stücken?
- Und die Zeit?
- Loop-Quantengravitation: loop engl. für Schleife: Raum und Zeit bestehen aus diskreten Stücken; positiv: nachprüfbare Vorhersagen!!

# Quantentheorie / Allgemeine Relativitätstheorie

- Beide unabhängig durch Experimente bestätigt
- Bereich noch nicht untersucht, für den beide Theorien signifikante Effekte vorhersagen: kleine Größenordnungen und große Massen
- Einstein'sche Theorie ist rein klassisch, muß Vereinigungstheorie geben: Quantengravitation
  - Twistor-Theorie
  - Nicht-kommutative Geometrie
  - Supergravitation
  - Stringtheorie



# Loop-Quantengravitation



- Loop-Quantengravitation ist die am weitesten entwickelte Alternative zur String-Theorie
- Bereits Anfang der 70iger Jahre von Roger Penrose vorgeschlagen
- Anfang der 90iger Jahre wieder aufgegriffen und weiterentwickelt

# Loop-Quantengravitation

## ■ Zwei Grundprinzipien:

- Hintergrund-Unabhängigkeit (Geometrie der Raumzeit steht nicht ein für alle Mal fest, sondern ist eine sich entwickelnde dynamische Größe)
- Diffeomorphismus-Invarianz (man darf ein beliebiges Koordinatensystem wählen, um die Raumzeit darzustellen; ein Punkt in der Raumzeit ist nur durch die physikalischen Vorgänge in diesem Punkt definiert, nicht durch seinen Ort in einem speziellen Koordinatensystem – denn „spezielle“ Koordinaten gibt es nicht.

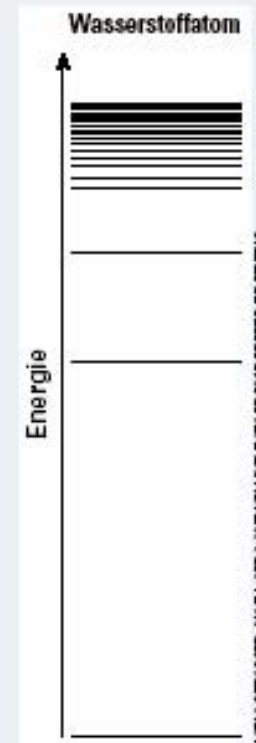
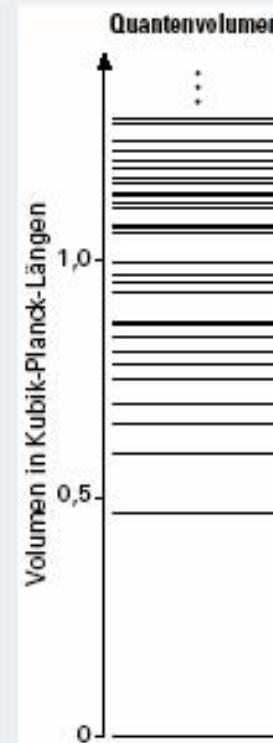
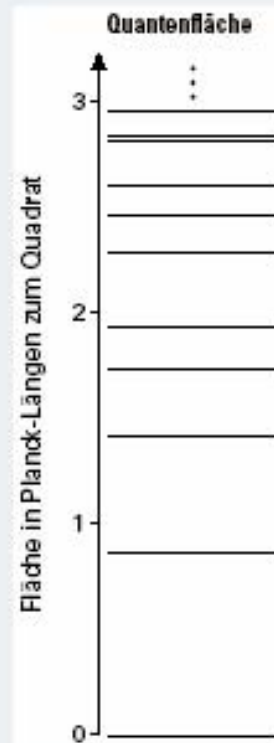
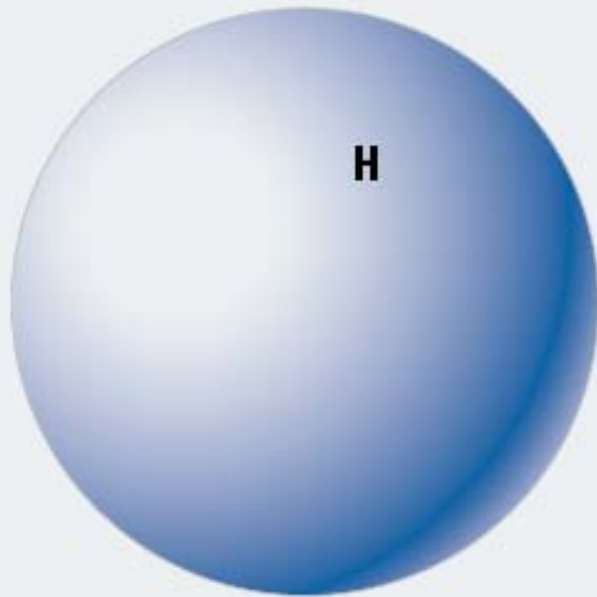
## ■ Quantisierter Raum ergibt sich direkt aus diesen Bedingungen

# Alles gequantelt?

## Diskrete Zustände von Fläche und Volumen

In der Theorie der Loop-Quantengravitation sind Flächen und Volumina keine kontinuierlichen Größen. Betrachten wir eine kugelförmige Hülle  $H$ , die ein gewisses Raumvolumen umschließt (linke Grafik). In der klassischen – also nichtquantenmechanischen – Physik könnte das Volumen eine beliebige positive reelle Zahl sein. Doch gemäß der Loop-Quantengravitation gibt es ein absolutes Minimalvolumen – rund ein Planck-Volu-

men oder  $10^{-69}$  Kubikzentimeter –, und auch für größere Volumina sind nur bestimmte Zahlenwerte erlaubt. Ebenso gibt es eine Minimalfläche – rund eine Planck-Fläche oder  $10^{-66}$  Quadratzentimeter – und nur diskrete größere Flächenwerte. Das diskrete Spektrum zulässiger Quantenflächen und -volumina ähnelt den Anregungsenergien eines Wasserstoffatoms (rechte Grafik).





# Raumquanten

- Werte für Volumen und Fläche werden in Einheiten der *Planck-Länge* gemessen (gibt die Größenordnung an, bei der die Geometrie des Raumes nicht mehr kontinuierlich ist):  $10^{-33}$  cm



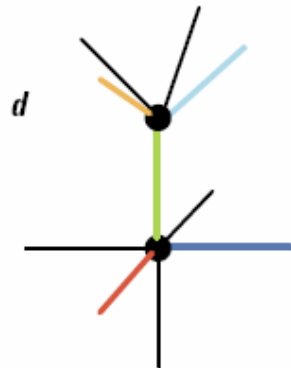
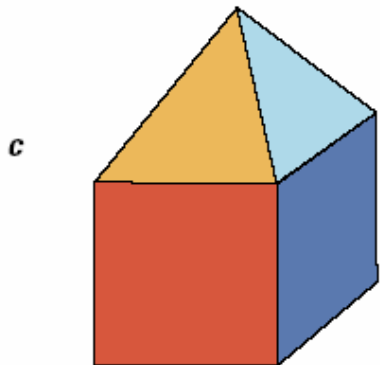
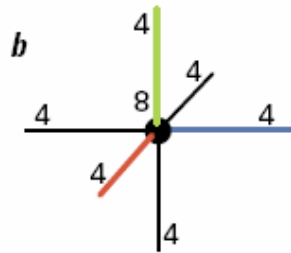
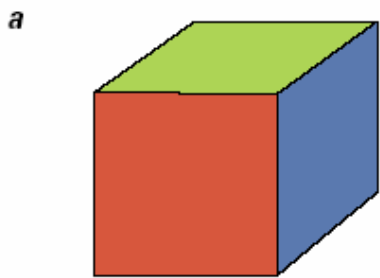
# Pointilismus & Quanten der Raumzeit



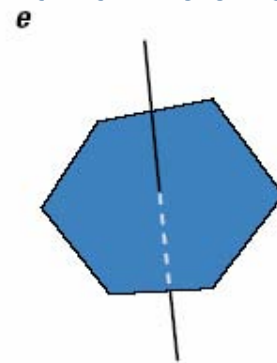


# Loop-Quantengravitation

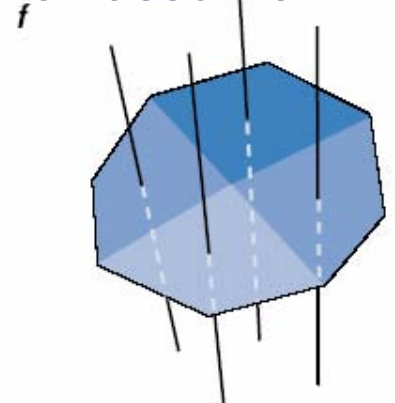
- Der Raum wird als dynamisches quantenmechanisches Spin-Netzwerk beschrieben, das durch Diagramme aus Linien und Knoten dargestellt werden kann
- Quantenzahlen, die mit den Volumen- und Flächenquanten assoziiert sind



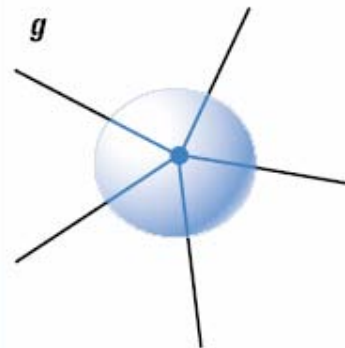
NADIA STRASSER



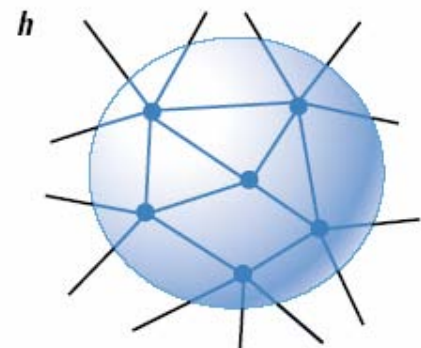
ein Flächenquant



größere Fläche



ein Volumenquant



größeres Volumen

NADIA STRASSER



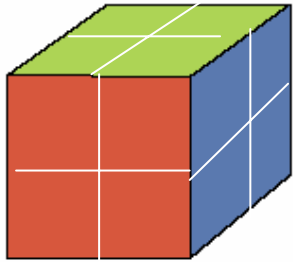
# Loop-Quantengravitation

8 Volumenquanten

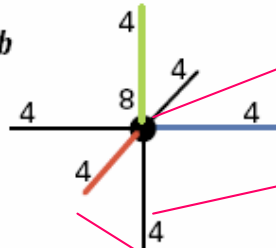
Für jede Berandungsfläche  
eine Linie :6

Anzahl der Flächenquanten der  
Jeweiligen Seiten: 4

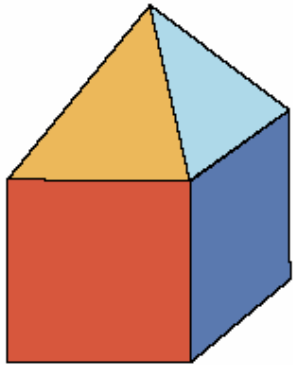
*a*



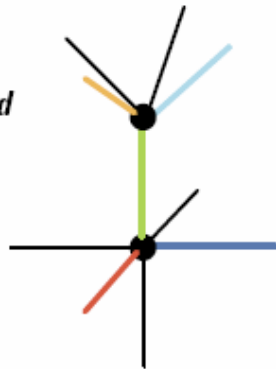
*b*



*c*



*d*

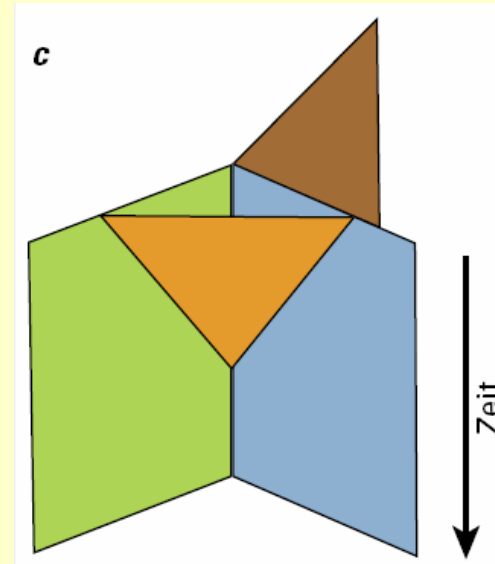
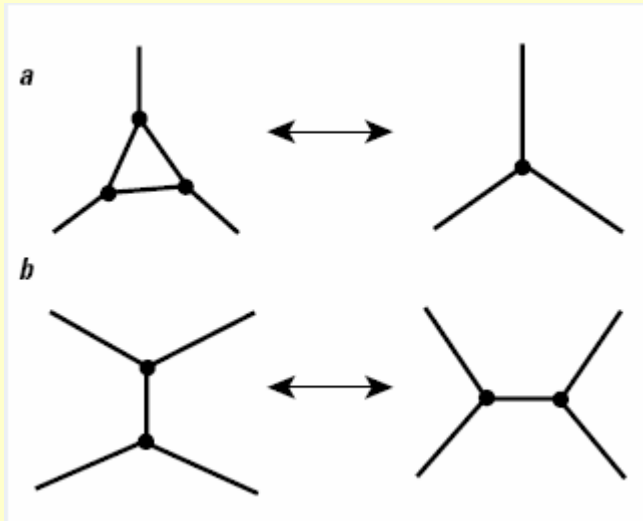


# Loop-Quantengravitation

- Elementarteilchen entsprechen Netzknoten mit bestimmten Eigenschaften
- Die Bewegung von Teilchen entspricht dabei einer Verschiebung entsprechender Knotentypen in dem Netz
- Durch Hinzufügen der Zeit als 4. Dimension werden aus den Knoten Linien in der Raumzeit
- Aus den Linien, die die Knoten verbinden, werden Flächen: Spin-Schaum der Raumzeit
- **Raumzeitschaum statt Raum-Zeit-Kontinuum**
- Dem Fortschreiten der Zeit entsprechen fortlaufend strukturelle Veränderungen in dem Netz wie die Vereinigung von Knoten oder die Entstehung mehrerer Knoten aus einem einzigen

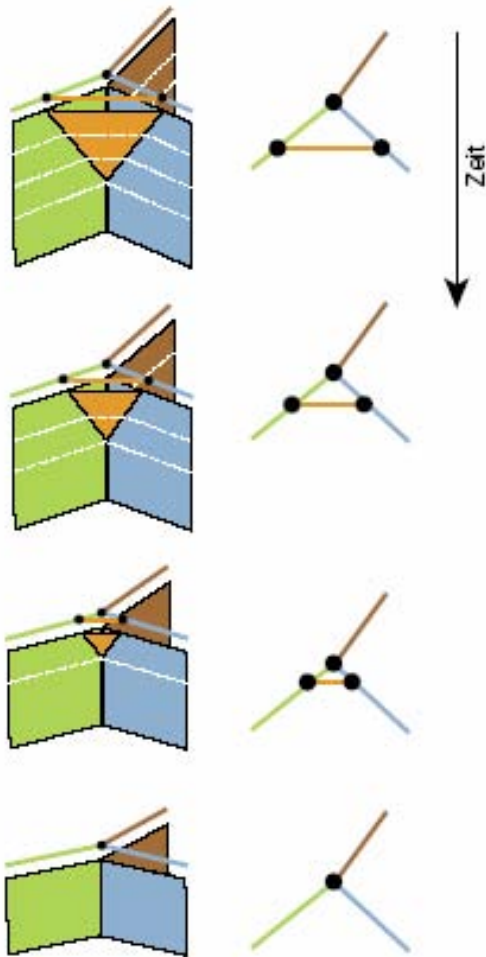
# Spin-Netze

- Quantenzustand des Universums abbilden:  $10^{184}$  Knoten
- Der Zeitfluß ist eine Folge ständiger Strukturveränderungen dieses Spin-Netzwerks
- Spin-Netzwerke entwickeln sich zeitlich, Knoten verschwinden oder entstehen neu



# Lop-Quantengravitation

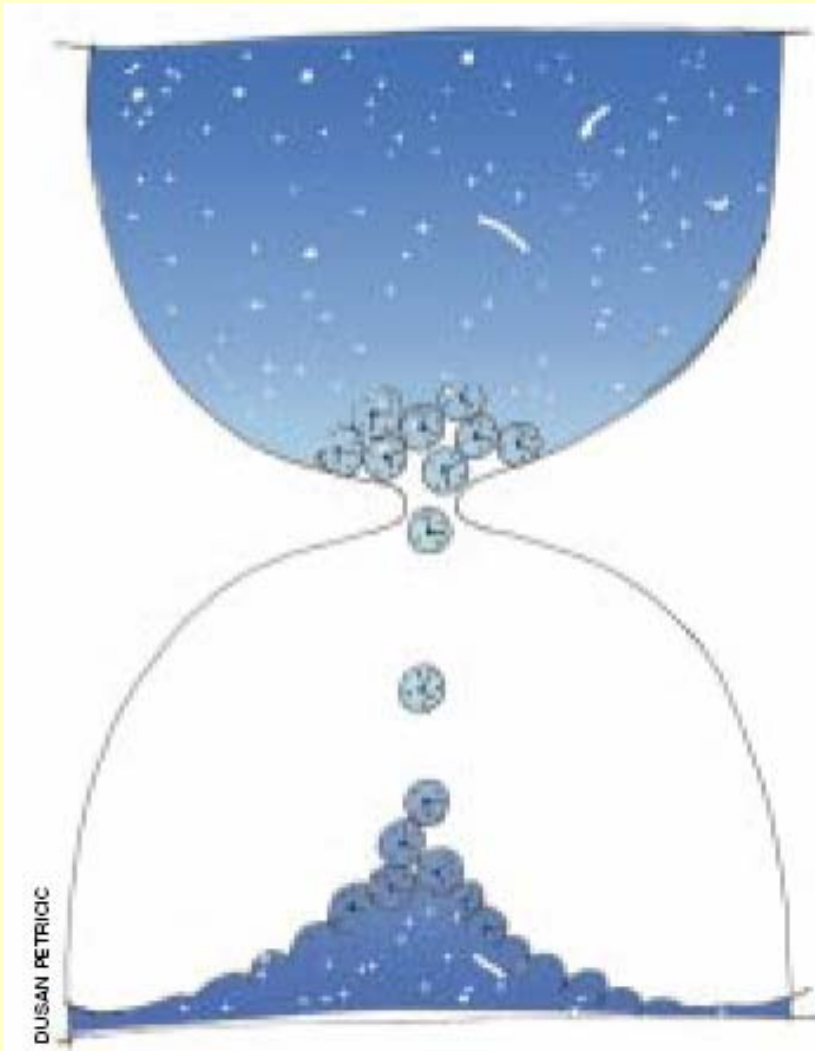
- Die Spur, bezogen auf einen bestimmten Pfad durch die Raumzeit, dient zur Bestimmung von parallel-transportierten physikalischen Größen, wenn ein Teilchen entlang des Pfads durch die Raumzeit propagiert
- Bsp. Elektron: wie ändert sich die Observable Spin?
  - Krümmung der Raumzeit rotiert den Spinvektor bei der Bewegung entlang der geschlossenen Kurve
  - Die Spur des Operators ist der Loop



# Loop-Quantengravitation

- Spin-Netzwerke , die in der Loop-Quantengravitation den Raum darstellen, passen sich dem Begriff der Raumzeit an, indem sie zu so genannten Spin-Schäumen erweitert werden
- Auch die Zeit ist diskret, fließt nicht wie ein Fluss, sondern tickt wie eine Uhr
- Jedes Ticken entspricht einer *Planck-Zeit* von  $10^{-43}$  Sekunden
- Die Zeit im Universum fließt mit dem Ticken unzähliger Uhren: an jedem Ort im Spin-Schaum an dem ein quantenphysikalischer „Zug“ stattfindet, tickt gleichsam eine dort befindliche Uhr einmal.

# Die Zeit machst Sprünge



- Mit den Zeitsprüngen ändert sich die Gestalt des Spin-Netzwerks schlagartig, instantan
- Überall dort, wo sich ein Spin-Netzwerk neu formiert, tickt einmal eine lokale Uhr
- Ein Spin-Netzwerk-Zustand ist nicht lokalisierbar
- Das Spin-Netzwerk ist nicht *in* der Raumzeit, es **ist** die Raumzeit!



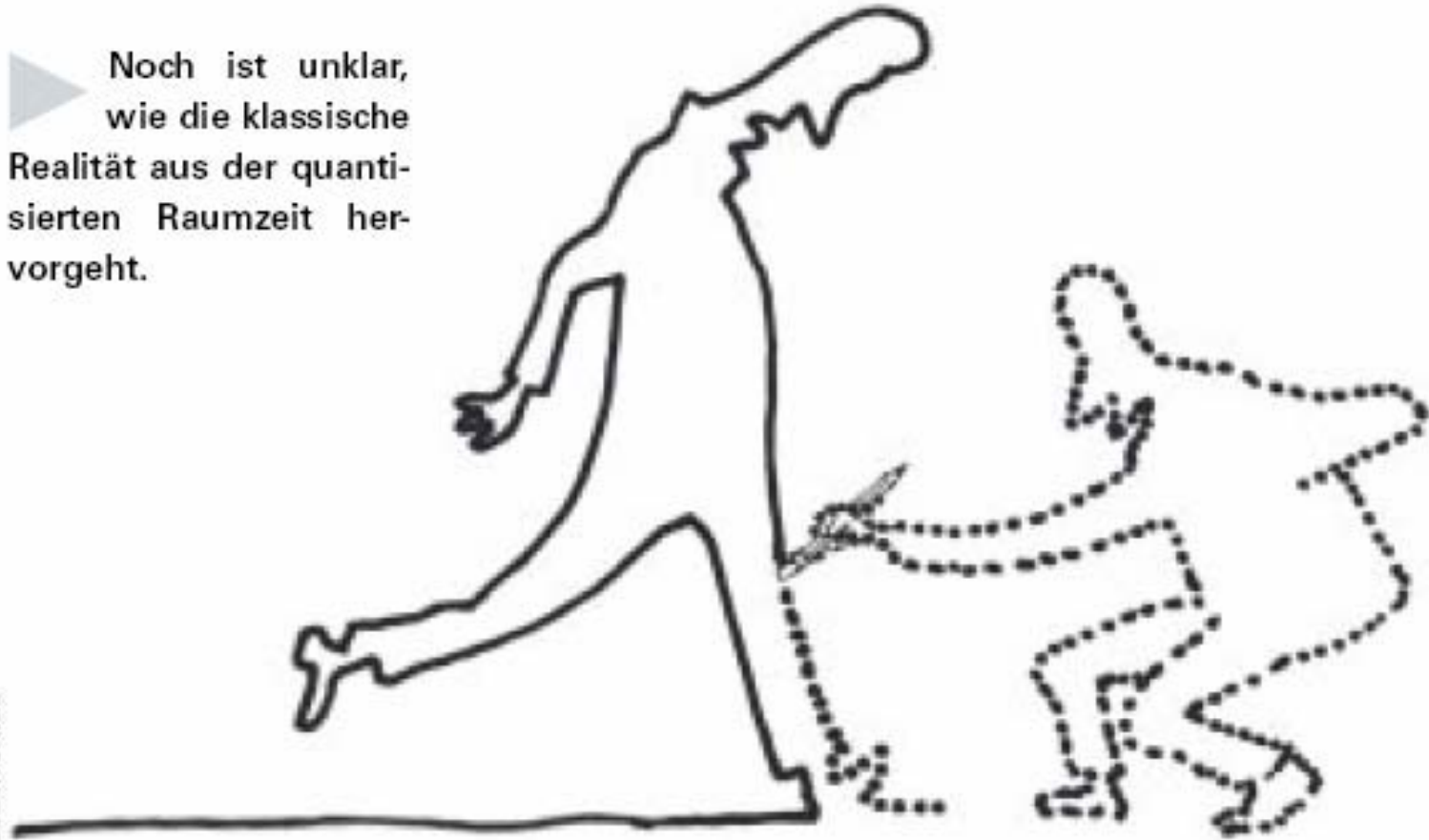


# Vorhersagen der Quantengravitation

# Klassisch – gequantelt

▶ Noch ist unklar,  
wie die klassische  
Realität aus der quanti-  
sierten Raumzeit her-  
vorgeht.

DUSAN PETRICIC

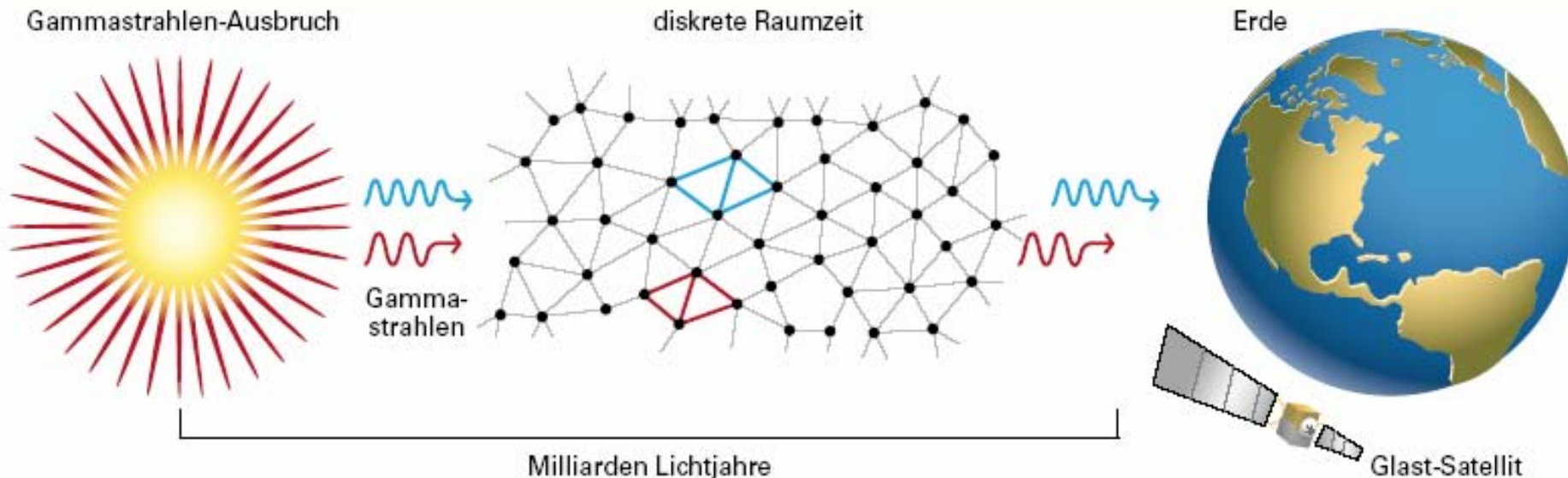


# Test der Loop-Quantengravitation

- Beschreiben Spin-Netzwerke die räumliche Geometrie und zeitliche Entwicklung auf eine Art, die mit dem „glatten Stoff“ der klassischen Einstein'schen Theorie übereinstimmt? 16 Größenordnungen jenseits dessen, was die derzeitigen Teilchenbeschleuniger zu erforschen vermögen
- 1) Gravitationswellen: lassen sich als Anregungen spezieller Quantenzustände im Rahmen der Loop-Quantengravitation beschreiben
- 2) Entropie der Schwarzen Löcher lassen sich mit Theorie beschreiben; reproduziert Hawking-Strahlung, macht zusätzliche Aussagen bzgl. Feinstruktur

# Nachprüfbarkeit der Loop-Quantengravitation

- Effekte bei Ausbreitung des Lichts im Universum
- Licht verändert die Eigenschaften, wenn es ein Spin-Netzwerk durchquert; Größe des Effekts proportional zum Verhältnis der Planck-Länge zur Wellenlänge (für sichtbares Licht  $<10^{-28}$ ); akkumulieren sich, wenn das Licht große





# Einstein falsch?

- Spezielle Relativitätstheorie mit Postulat einer universellen Vakuum-Lichtgeschwindigkeit falsch?
- Modifizierte Versionen der Einstein'schen Theorie: hochenergetische Photonen mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten, universelle Lichtgeschwindigkeit gilt exakt nur für Photonen niedriger Energie



# Nachprüfbarkeit der Loop - Quantengravitation

## ■ Gamma Ray Bursts:

- Die Photonen sollten je nach ihrer Energie geringfügig verschiedene Geschwindigkeiten haben und zu leicht unterschiedlichen Zeiten ankommen;
- Bislang ist Messgenauigkeit um Faktor 1000 zu tief

## ■ Sehr energiereiche kosmische Strahlung:

- WW mit Hintergrundstrahlung für Photonen mit Energien über  $10^{19}$  Elektronenvolt erwartet, statt dessen: 10 kosmische Strahlen mit höherer Energie auf der Erde detektiert
- „doppelte Spezielle Relativitätstheorie“:  
Unveränderlichkeit der Lichtgeschwindigkeit + Invarianz der Planckmasse

# Nachprüfbarkeit der Loop - Quantengravitation

## ■ Urknall:

- **Big Bang** war **Big Bounce** laut Loop-Quantengravitation (vor dem Prall zog sich das Universum rapide zusammen; Ashtekar und andere)
  - An dem Punkt an dem andere Formeln versagen, hält die Quantengravitation!
  - Gravitation hat früheres Universum so weit zusammengezogen, daß die Quanteneigenschaften die Schwerkraft schließlich umgekehrt un in eine abstoßende Kraft verwandelt hätten (Quanten-Rückstoß)
  - Ein weiteres „klassisches Universum“ vor einem Urknall

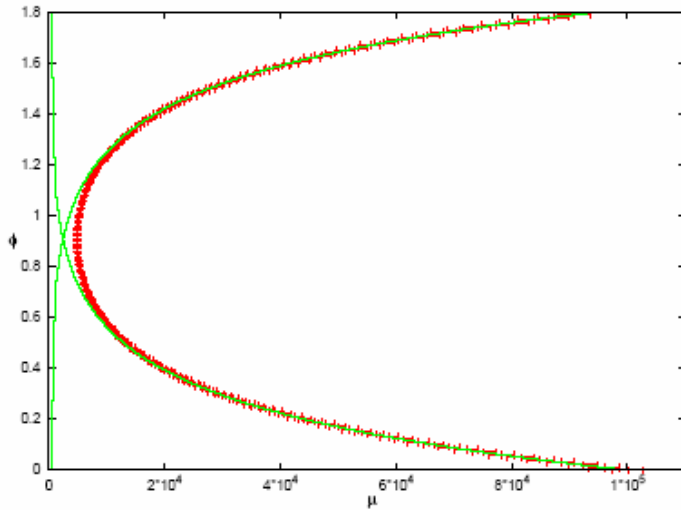


FIG. 2: The expectation values of Dirac observables  $\hat{\mu}|_{\phi}$  are plotted (in multiples of  $\mu_0$ ), together with their dispersions. They exhibit a quantum bounce which joins the contracting and expanding classical trajectories marked by fainter lines.

Ashtekar et al.

# Kritik an der Big Bounce Theorie

## ■ Urknall:

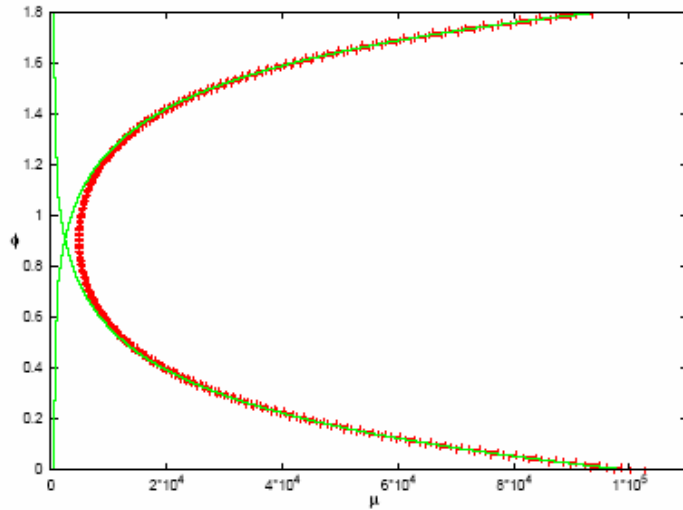


FIG. 2: The expectation values of Dirac observables  $\hat{\mu}|\phi$  are plotted (in multiples of  $\mu_o$ ), together with their dispersions. They exhibit a quantum bounce which joins the contracting and expanding classical trajectories marked by fainter lines.

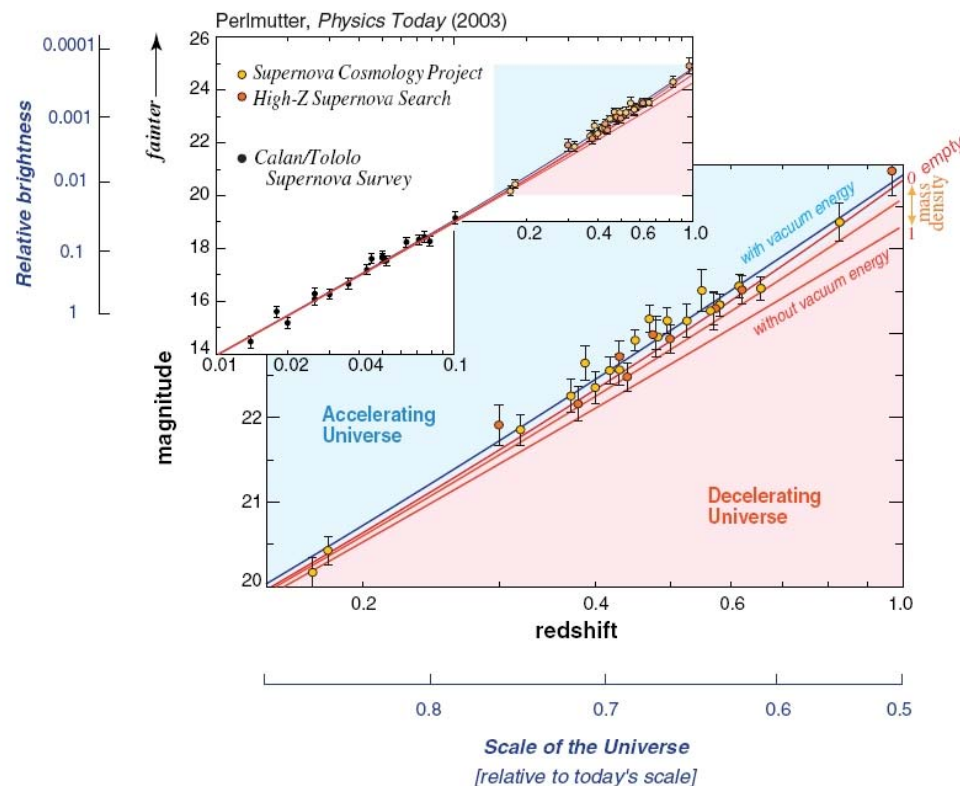
- „Ähnlichkeit zwischen String-Theorie und Schleifen-Quantengravitation ermutigend“
- „zu simplistisch“
- „starke Zweifel“
- Vorteil: Modell kommt näher an den Moment des Urknalls

Ashtekar et al.

# Nachprüfbarkeit der Loop - Quantengravitation

## ■ Kosmologische Konstante:

- Beobachtungen an weit entfernten Supernovae liefern starke Indizien für positive Energiedichte, welche die Expansion des Universums beschleunigt: läßt sich aus Loop-Quantengravitation herleiten



# Nachprüfbarkeit der Loop - Quantengravitation

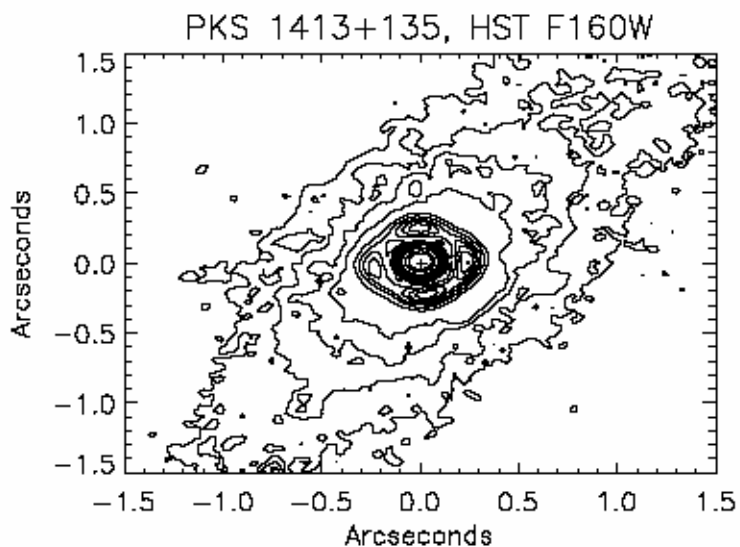
- Phasen-Kohärenz des Lichts extragalaktischer Quellen
  - Lieu & Hillman: HST von PKS 1413+135
  - Bei optischen Frequenzen ist Phasen-Kohärenz des Lichts einer entfernten Punktquelle notwendige Voraussetzung für die Entstehung von Interferenzmustern wenn die Quelle durch ein Teleskop beobachtet wird: diese Beobachtungen liefern den empfindlichsten Test
  - „Optische Interferenzmuster in den Beobachtungen einer fernen Quelle schließen Quanteneffekte aus!!“



# Nachprüfbarkeit der Loop - Quantengravitation

## ■ Phasen-Kohärenz des Lichts extragalaktischer Quellen

- Lieu & Hillman: HST von PKS 1413+135



- $z=0.24671$ , 5 Milliarden Lichtjahre
- Einer der wenigen AGN mit offensichtlicher Spiralgalaxie als Heimatgalaxie
- Zweifel bzgl. Relation zw. Heimatgalaxie und AGN, keine re-emittierte Strahlung
- Dezentriert um  $13 \pm 4$  Millibogensekunden
- AGN sehr weit dahinter oder Bedeckung/Absorption

# Nachprüfbarkeit der Loop - Quantengravitation

- Phasen-Kohärenz des Lichts extragalaktischer Quellen
  - Lieu & Hillman: Evidenz gegen Planck-Fluktuationen in Zeit & Raum
  - Coule: ????? van Cittert-Zernike Theorem, gewinnen an Kohärenz durch die Ausbreitung
    - Die Summe über Weglängen-Differenzen ist unabhängig von einer unterliegenden Planck-Länge
  - Beispiel Sonne: obwohl inkohärente Quelle, entwickelt räumliche Kohärenz (zwar nur über kurze Distanz) zur Zeit zu der die Strahlung die Erde erreicht

Das van Cittert-Zernike Theorem verknüpft quantitativ die Eigenschaften einer Quelle mit der Kreuzkorrelationsfunktion und lautet

$$\gamma_{12}(0, \vec{r}, 0) = \frac{\int_{\text{Quelle}} d\alpha \exp(-i\vec{k}\vec{r}\alpha) I(\alpha)}{I_{\text{gesamt}}}, \quad (1)$$

wobei  $\vec{r}$  die Positionen in der Beobachtungsebene und  $\alpha$  als Raumwinkel die Positionen in der Quelle beschreibt. Die Kreuzkorrelationsfunktion ist also die Fouriertransformierte der Intensitätsverteilung der Quelle.

- Scharfe Interferenzmuster schließen Planck-Sprünge nicht aus
- Möglicherweise dramatischer Effekt auf Polarisation

# Nachprüfbarkeit der Loop - Quantengravitation

- Sagt korrekt das Spektrum der Fluktuationen für den CMB voraus ....
- Es steht noch aus:
  - Vereinigung oder gar Herleitung aller Grundkräfte der Physik



**Kritik an der  
Quantengravitation**

# Kritik an der Loop-Quantengravitation

- Unklar ist, wie sich das oberhalb der Planck-Länge kontinuierliche und stetige Verhalten der Raumzeit als Grenzwert des diskreten Netzwerks von Knoten ergibt
- Die Raumzeit als diskretes Netzwerk von Knoten zeichnet ein Bezugssystem aus, widerspricht der speziellen Relativitätstheorie und ist Wiedergeburt des *Äthers* der vorrelativistischen Physik ...



# Konstanz der Lichtgeschwindigkeit

■ 1886:

Michelson und Morley finden, dass sich die Lichtgeschwindigkeit nicht ändert zwischen dem ruhenden Trägermedium ‚Äther‘ und der bewegenden Erde ( $v \approx 30 \text{ km/sec}$ ).

Ende des Äther's!

Elektromagnetische Wellen breiten sich im Vakuum aus

# CPT-Theorem

- Zu jedem Vorgang steht der spiegelbildlich und zeitumgekehrt betrachtete und zusätzlich durch Vertauschen von Materie mit Antimaterie aufgebaute Vorgang ebenfalls im Einklang mit den Gesetzen der Physik und ist damit möglich
- Invarianz der physikalischen Gesetze bezüglich einer CPT-Transformation (1955, Wolfgang Pauli)
- C-Transformation: Austausch eines Teilchens durch sein Antiteilchen
- P-Transformation: Inversion aller drei Raumkoordinaten sämtlicher beteiligter Teilchen und Strukturen (Raumspiegelung oder Paritätstransformation)
- T-Transformation: Inversion der Zeitkoordinaten (Zeitumkehr)

# Kritik an der Loop-Quantengravitation

- Verletzung der CP-Invarianz in der Schwachen Wechselwirkung läßt sich in der Loop-Quantengravitation nicht erklären

Klar gibt es  
Lammda!





**Doppelte  
Relativitätstheorie**

# Doppelte Relativitätstheorie

- 2000 von Giovanni Amelino-Camelia (Rom) eingeführt:
  - Lockerung der absoluten Konstanz der Lichtgeschwindigkeit (Photonen hoher Energie haben höhere Geschwindigkeit; Energiegrenze, ab der die kosmische Hintergrundstrahlung alle hochenergetischen Teilchen zerstört, wird heraufgesetzt)
  - Neue Forderung nach Invarianz der so genannten **Planckmasse** (folgt auch aus Quantengravitation, zwei Beobachter, die sich unterschiedlich schnell bewegen sind sonst anderer Meinung über die Größe der Planckmasse)





# Die innere Uhr / Zeit

# Zeit & das Ich

- Wesentliches Merkmal aller höheren Organismen ist deren Fähigkeit, sich zeitlich zu orientieren und das Verhalten zeitlich abgestimmt zu organisieren: beinhaltet die Fähigkeit, kurze Zeitintervalle von einigen 100 ms bis zu mehreren Sekunden präzise unterscheiden zu können; auch der Mensch profitiert von dieser Eigenschaft
  - Bsp. Straßenverkehr, Überholvorgang
- Worauf basiert das Zeitgefühl?????
- Zeit-Sinn, Sinnesorgan gibt es nicht
- Keinen direkten physikalischen Reiz, der Zeitempfindung hervorrufen könnte
- Metapher der „inneren Uhr“
- Eine, oder mehrere „innere Uhren“?

# Zeit & das Ich

- Eigenschaften der inneren Uhr:
  - ihre „Geschwindigkeit“ kann verändert werden
  - Basisfrequenz? 12.4 Hz – 222 Hz
  - Wie werden Zeitintervalle gespeichert und abgerufen?
  - Akustische Reize werden hinsichtlich ihrer Dauer in der Regel länger eingeschätzt als physikalisch gleichlange visuelle Reize
  - Bislang kein gemeinsames Modell

# Zeit & das Ich

- Eindrücke, die aus den verschiedenen Sinneskanälen zu unterschiedlichen Zeiten im Gehirn eintreffen, müssen synchronisiert werden. Aber wie?
  - Zeitliche Koordination der Neuronentätigkeit im Gehirn; Nervenzellen in unterschiedlichen Hirnregionen können dadurch „zusammengebunden“ werden, dass sie synchrone Impulse aussenden; Korrelationstheorie der Hirnfunktion: kurzfristige zeitliche Übereinstimmung zwischen der Aktivität in räumlich auch weit voneinander entfernt liegenden Hirnarealen hinterlässt ihre Spuren im Kurzzeitgedächtnis und ermöglicht die mentale Repräsentation von Objekten
  - Bindungstheorie erklärt nicht, auf welche Weise mehrere Objekte auch gleichzeitig im Bewusstsein repräsentiert sein können
  - Für die Dauer des Kurzzeitgedächtnisses oder Arbeitsspeichers wird eine Obergrenze von ca. 2 Sekunden angegeben (mehrere Elemente im Bewußtsein gleichzeitig repräsentiert)

# Zeit & das Ich

- Wie ist die zeitliche Struktur der Neuronentätigkeit beschaffen, damit keine Diffusion zwischen verschiedenen Ebenen auftritt und jedes Element robust identifizierbar bleibt?
  - Simultan operierende Frequenzen weisen ein harmonische Struktur ähnlich einem Oktavband in der Musik auf
  - Noch keine empirische Prüfung
- Experimente legen nahe, daß das Gehirn nicht kontinuierlich arbeitet, sondern in aufeinanderfolgenden Schritten mit fester Zeitdauer, sog. ***Zeitquanten !!!***



Schöne Ferien !!

