

# Zeit ist, was man auf der Uhr abliest. Aber was ist eine Uhr?

Domenico Giulini

Universität Hannover und ZARM Bremen



Freiburg, 12. Mai 2011

Motti

Einige historische  
Stimmen

Moderne Stimmen

Soll heißen?

Bewegungsgesetze

Tag

Sekunde

Jahr

Atomzeit

UT2 versus TAI

Tageslänge

Gravitation

Pulsare

Compton Clocks?

Zusammenfassung

Domenico Giulini

#### Motti

Einige historische  
Stimmen

Moderne Stimmen

Soll heißen?

Bewegungsgesetze

Tag

Sekunde

Jahr

Atomzeit

UT2 versus TAI

Tageslänge

Gravitation

Pulsare

Compton Clocks?

Zusammenfassung



- ▶ „Es könnte scheinen, dass alle die Definition der «Zeit» betreffenden Schwierigkeiten dadurch überwunden werden können, dass ich an Stelle der «Zeit» die «Stellung des kleinen Zeigers meiner Uhr» setze.“

Zur Elektrodynamik bewegter  
Körper, A. Einstein 1905

Motti

Einige historische  
Stimmen

Moderne Stimmen

Soll heißen?

Bewegungsgesetze

Tag

Sekunde

Jahr

Atomzeit

UT2 versus TAI

Tageslänge

Gravitation

Pulsare

Compton Clocks?

Zusammenfassung

Friedrich Wilhelm Argelander  
1799-1875



„Kennen denn Majestät schon  
das Alte?“

Friedrich Wilhelm IV. von Preussen  
1795-1861



„Na, Argelander, was gibt's  
Neues am Himmel?“



# Aus Newtons 'Principia', 1. Scholium (1686)

- ▶ „Zeit, Raum, Ort und Bewegung als allen bekannt erkläre ich nicht. Ich bemerke nur, dass man gewöhnlich diese Größen nicht anders als in Beziehung auf sinnlich Wahrnehmbares auffasst, und so gewisse Vorurteile entstehen, zu deren Aufhebung man sie passend in absolute und relative, wahre und scheinbare, mathematische und landläufige Größen unterscheidet.“
- ▶ „Die absolute, wahre und mathematische Zeit verfließt an sich und vermöge ihrer Natur gleichförmig und ohne Beziehung auf irgendeinen äußeren Gegenstand. Sie wird auch mir dem Namen Dauer belegt.“
- ▶ „Die relative, scheinbare und landläufige Zeit ist ein beliebiges sinnlich wahrnehmbares und äußerliches , entweder genaueres oder ungleichmäßiges Maß der Dauer, dessen man sich gewöhnlich statt der wahren Zeit bedient, wie Stunde, Tag, Monat Jahr.“

Zeit ist, was man auf der Uhr abliest.  
Aber was ist eine Uhr?

Domenico Giulini

Motti

Einige historische Stimmen

Moderne Stimmen

Soll heißen?

Bewegungsgesetze

Tag

Sekunde

Jahr

Atomzeit

UT2 versus TAI

Tageslänge

Gravitation

Pulsare

Compton Clocks?

Zusammenfassung

# Aus Ernst Machs 'Mechanik'



- ▶ „Wir sind ganz außerstande, die Veränderungen der Dinge an der Zeit zu messen. Die Zeit ist vielmehr eine Abstraktion, zu der wir durch die Veränderung der Dinge gelangen....“
- ▶ „Wir nennen eine Bewegung gleichförmig, in welcher gleiche Wegzuwüchse gleichen Wegzuwüchsen einer Vergleichsbewegung (der Drehung der Erde) entsprechen. Eine Bewegung kann gleichförmig sein in Bezug auf eine andere. Die Frage, ob eine Bewegung an sich gleichförmig sei, hat gar keinen Sinn. Ebenso wenig können wir von einer „absoluten Zeit“ (unabhängig von jeder Veränderung) sprechen. Diese absolute Zeit kann an gar keiner Bewegung abgemessen werden, sie hat also auch gar keinen praktischen und auch keinen wissenschaftlichen Wert, niemand ist berechtigt zu sagen, dass er von derselben etwas wisse, sie ist ein müßiger «metaphysischer» Begriff.“

Zeit ist, was man auf der Uhr abliest.  
Aber was ist eine Uhr?

Domenico Giulini

Motti

Einige historische Stimmen

Moderne Stimmen

Soll heißen?

Bewegungsgesetze

Tag

Sekunde

Jahr

Atomzeit

UT2 versus TAI

Tageslänge

Gravitation

Pulsare

Compton Clocks?

Zusammenfassung

# Aus Henri Poincarés 'La mesure du temps' (1904)



Henri Poincaré 1854-1912

- ▶ „Die Zeit muss so definiert werden, dass die Gleichungen der Mechanik so einfach wie möglich werden. Mit anderen Worten, es gibt keine Art, die Zeit zu messen, die richtiger ist als eine andere; die, die allgemein angewendet wird, ist nur bequemer. Wir haben nicht das Recht, von zwei Uhren zu sagen, dass die eine richtig gehe und die andere falsch, wir können nur sagen, dass es vorteilhafter ist, sich nach den Angaben ersterer zu richten“

Zeit ist, was man auf der Uhr abliest.  
Aber was ist eine Uhr?

Domenico Giulini

Motti

Einige historische Stimmen

Moderne Stimmen

Soll heißen?

Bewegungsgesetze

Tag

Sekunde

Jahr

Atomzeit

UT2 versus TAI

Tageslänge

Gravitation

Pulsare

Compton Clocks?

Zusammenfassung

Domenico Giulini

Motti

Einige historische  
Stimmen

Moderne Stimmen

Soll heißen?

Bewegungsgesetze

Tag

Sekunde

Jahr

Atomzeit

UT2 versus TAI

Tageslänge

Gravitation

Pulsare

Compton Clocks?

Zusammenfassung

„Wenn man das Labor im fünften Stock des Laue-Baus in der PTB betritt, hat man nicht den Eindruck, dass dort die genaueste Uhr der Welt entsteht. Eher ähnelt der Raum einem Optik-Labor, und in der Tat geht es hier um Licht. Ein einziges Aluminium-Ion in einer Falle soll künftig dafür sorgen, dass die Zeit noch hundertmal genauer gemessen wird als heute. Das könnte ein neuer Weltrekord werden, glauben die Forscher. Dabei ist schon das, was man momentan kann, unvorstellbar genau. Uhren in der PTB können die Zeit so exakt messen, dass sie in 30 Millionen Jahren ( $10^{15}$  Sekunden) nur um eine Sekunde falsch gehen.“

PTB-Zeitschrift *Maßstäbe*, Januar 2011

- ▶ Falsch ist nur relativ zu einem Begriff von *richtig* definiert. Welche Zeit ist die „richtige“?
- ▶ Wenn keine Uhr die *richtige Zeit* anzeigt, woher haben wir dann überhaupt Kenntnis von dieser?
- ▶ Ist „Zeit“ überhaupt ein Phänomen?

Domenico Giulini

Motti

Einige historische  
Stimmen

Moderne Stimmen

Soll heißen?

Bewegungsgesetze

Tag

Sekunde

Jahr

Atomzeit

UT2 versus TAI

Tageslänge

Gravitation

Pulsare

Compton Clocks?

Zusammenfassung

„Wenn man das Labor im fünften Stock des Laue-Baus in der PTB betritt, hat man nicht den Eindruck, dass dort die genaueste Uhr der Welt entsteht. Eher ähnelt der Raum einem Optik-Labor, und in der Tat geht es hier um Licht. Ein einziges Aluminium-Ion in einer Falle soll künftig dafür sorgen, dass die Zeit noch hundertmal genauer gemessen wird als heute. Das könnte ein neuer Weltrekord werden, glauben die Forscher. Dabei ist schon das, was man momentan kann, unvorstellbar genau. Uhren in der PTB können die Zeit so exakt messen, dass sie in 30 Millionen Jahren ( $10^{15}$  Sekunden) nur um eine Sekunde falsch gehen.“

PTB-Zeitschrift *Maßstäbe*, Januar 2011

- ▶ Falsch ist nur relativ zu einem Begriff von *richtig* definiert. Welche Zeit ist die „richtige“?
- ▶ Wenn keine Uhr die *richtige Zeit* anzeigt, woher haben wir dann überhaupt Kenntnis von dieser?
- ▶ Ist „Zeit“ überhaupt ein Phänomen?

Domenico Giulini

Motti

Einige historische  
Stimmen

Moderne Stimmen

Soll heißen?

Bewegungsgesetze

Tag

Sekunde

Jahr

Atomzeit

UT2 versus TAI

Tageslänge

Gravitation

Pulsare

Compton Clocks?

Zusammenfassung

„Wenn man das Labor im fünften Stock des Laue-Baus in der PTB betritt, hat man nicht den Eindruck, dass dort die genaueste Uhr der Welt entsteht. Eher ähnelt der Raum einem Optik-Labor, und in der Tat geht es hier um Licht. Ein einziges Aluminium-Ion in einer Falle soll künftig dafür sorgen, dass die Zeit noch hundertmal genauer gemessen wird als heute. Das könnte ein neuer Weltrekord werden, glauben die Forscher. Dabei ist schon das, was man momentan kann, unvorstellbar genau. Uhren in der PTB können die Zeit so exakt messen, dass sie in 30 Millionen Jahren ( $10^{15}$  Sekunden) nur um eine Sekunde falsch gehen.“

PTB-Zeitschrift *Maßstäbe*, Januar 2011

- ▶ Falsch ist nur relativ zu einem Begriff von *richtig* definiert. Welche Zeit ist die „richtige“?
- ▶ Wenn keine Uhr die *richtige Zeit* anzeigt, woher haben wir dann überhaupt Kenntnis von dieser?
- ▶ Ist „Zeit“ überhaupt ein Phänomen?

Domenico Giulini

Motti

Einige historische  
Stimmen

Moderne Stimmen

Soll heißen?

Bewegungsgesetze

Tag

Sekunde

Jahr

Atomzeit

UT2 versus TAI

Tageslänge

Gravitation

Pulsare

Compton Clocks?

Zusammenfassung

„Wenn man das Labor im fünften Stock des Laue-Baus in der PTB betritt, hat man nicht den Eindruck, dass dort die genaueste Uhr der Welt entsteht. Eher ähnelt der Raum einem Optik-Labor, und in der Tat geht es hier um Licht. Ein einziges Aluminium-Ion in einer Falle soll künftig dafür sorgen, dass die Zeit noch hundertmal genauer gemessen wird als heute. Das könnte ein neuer Weltrekord werden, glauben die Forscher. Dabei ist schon das, was man momentan kann, unvorstellbar genau. Uhren in der PTB können die Zeit so exakt messen, dass sie in 30 Millionen Jahren ( $10^{15}$  Sekunden) nur um eine Sekunde falsch gehen.“

PTB-Zeitschrift *Maßstäbe*, Januar 2011

- ▶ Falsch ist nur relativ zu einem Begriff von *richtig* definiert. Welche Zeit ist die „richtige“?
- ▶ Wenn keine Uhr die *richtige Zeit* anzeigt, woher haben wir dann überhaupt Kenntnis von dieser?
- ▶ Ist „Zeit“ überhaupt ein Phänomen?

Domenico Giulini

Motti

Einige historische  
Stimmen

Moderne Stimmen

Soll heißen?

Bewegungsgesetze

Tag

Sekunde

Jahr

Atomzeit

UT2 versus TAI

Tageslänge

Gravitation

Pulsare

Compton Clocks?

Zusammenfassung

- ▶ Ihnen werden zwei Uhren – etwa Taschenuhren – übergeben. Anfänglich sollen die Uhren identische Zeigerstellungen aufweisen, allmählich stellen sich jedoch Abweichungen ein.
- ▶ Sie sollen herausfinden, welche der beiden Uhren „die genauere“ ist.
- ▶ Weitere Hilfsmittel sind nicht erlaubt, außer eben der Möglichkeit, die Uhren simultan beliebig genau ablesen zu können.

„Wenn Ihr von den theoretischen Physikern etwas lernen wollt über die von ihnen benutzten Methoden, so schlage ich Euch vor am Grundsatz festzuhalten: Höret nicht auf ihre Worte, sondern haltet Euch an ihre Taten!“

A. Einstein 1930: *Zur Methodik der theoretischen Physik*

# Das Trägheitsgesetz in Newtons 'Principia'

Zeit ist, was man auf der Uhr abliest.  
Aber was ist eine Uhr?

Domenico Giulini

Motti

Einige historische Stimmen

Moderne Stimmen

Soll heißen?

Bewegungsgesetze

Tag

Sekunde

Jahr

Atomzeit

UT2 versus TAI

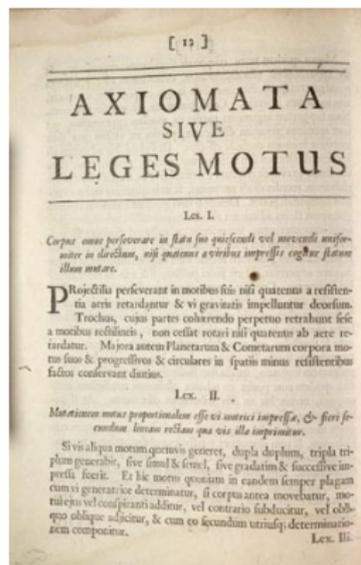
Tageslänge

Gravitation

Pulsare

Compton Clocks?

Zusammenfassung



## Lex. I.

- ▶ „Jeder Körper verharrt in seinem Zustand des Ruhens oder des Sichgeradlinig-gleichförmig-bewegens, außer insoweit er von eingepprägten Kräften gezwungen wird, seinen Zustand zu ändern.“

# Das Trägheitsgesetz - logisch vollständiger



- ▶ „Es [das Trägheitsgesetz] lautet in ausführlicher Formulierung so: Voneinander hinreichend entfernte, materielle Punkte bewegen sich geradlinig gleichförmig – vorausgesetzt, dass man die Bewegung auf ein passend bewegtes Koordinatensystem bezieht und dass man die Zeit passend definiert.

Wer empfindet nicht das Peinliche einer solchen Formulierung? Den Nachsatz weglassen aber bedeutet eine Unredlichkeit.“

Zeit ist, was man auf der Uhr abliest.  
Aber was ist eine Uhr?

Domenico Giulini

Motti

Einige historische Stimmen

Moderne Stimmen

Soll heißen?

Bewegungsgesetze

Tag

Sekunde

Jahr

Atomzeit

UT2 versus TAI

Tageslänge

Gravitation

Pulsare

Compton Clocks?

Zusammenfassung

- ▶ Bewegungsgesetze der klassischen- und der Quantenphysik haben die *deterministische* Form

$$\frac{dZ(t)}{dt} = F(Z(t)) . \quad (1)$$

- ▶ Eine Lösung,  $Z(t)$ , stellt den Zustand  $Z$  des betrachteten Systems als Funktion des zunächst uninterpretierten (nirgends ablesbaren) Zeitparameters  $t$  dar.
- ▶ Eine Uhr ist ein System, dessen Zustand durch eine „Zeigervariable“  $X$  parametrisiert wird und ebenfalls einer (1) entsprechenden (möglichst einfachen) Gleichung genügt, mit invertierbarer Lösungsfunktion:

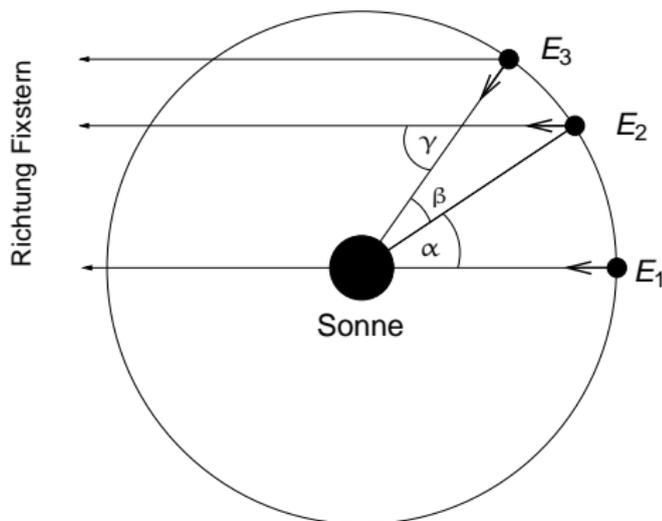
$$X(t) \Rightarrow t(X) . \quad (2)$$

- ▶ Damit kann man  $t$  aus  $Z(t)$  eliminieren und durch  $X$  ersetzen. So erhält man den Zustand  $Z$  des Systems als Funktion der (ablesbaren!) Zeigerstellung  $X$ :

$$Z(t) \Rightarrow Z(X) \quad (3)$$

Die durch  $Z(X)$  dargestellte Relation ist nun beobachtbar.

# Was ist ein Tag?



Während eines siderischen Tages bewegt sich die Erde auf ihrer Bahn um die Sonne von  $E_1$  nach  $E_2$ . Für die Vollendung eines Sonnentages muss sie noch von  $E_2$  nach  $E_3$ :

$$T(E_1, E_2) = 1 \text{ Tag}_{\text{siderisch}}, \quad \alpha = 360^\circ \times \frac{T(E_1, E_2)}{1 \text{ Jahr}} = \frac{360^\circ}{365}$$
$$T(E_2, E_3) = 1 \text{ Tag}_{\text{siderisch}} \times \frac{\alpha}{360^\circ}, \quad \beta = 360^\circ \times \frac{T(E_2, E_3)}{1 \text{ Jahr}} = \frac{360^\circ}{(365)^2}$$
$$\text{Tag}_{\text{Sonne}} := T(E_1, E_2) + T(E_2, E_3) = \text{Tag}_{\text{siderisch}} \left( 1 + \frac{1}{365} \right)$$

Zeit ist, was man auf der Uhr abliest.  
Aber was ist eine Uhr?

Domenico Giulini

Motti

Einige historische Stimmen

Moderne Stimmen

Soll heißen?

Bewegungsgesetze

Tag

Sekunde

Jahr

Atomzeit

UT2 versus TAI

Tageslänge

Gravitation

Pulsare

Compton Clocks?

Zusammenfassung

# Mittlerer Sonnentag und Sekunde

Teilt man  $\text{Tag}_{\text{Sonne}}$  in 24 Stunden (h), so ergibt sich

$$\text{Tag}_{\text{siderisch}} = \frac{24 \text{ h}}{1 + \frac{1}{365}} = 23 \text{ h} + 56 \text{ min} + 3,9344 \text{ sec}$$



► Da die Bahn der Erde um die Sonne kein Kreis sondern eine Ellipse ist, schwankt  $\text{Tag}_{\text{Sonne}}$  relativ zu seinem Mittelwert. Zusätzliche Schwankungen entstehen durch die Schiefe der Ekliptik. Die Differenz wird durch die *Zeitgleichung* beschrieben

- Auf Basis der mittleren Sonnenzeit wurden „Universal-Time“-Zeitskalen UT0, UT1 und UT2 eingeführt, die bis 1956 als Grundlage für die Definition der „Sekunde“ dienten.
- Die Grenzen unseres Verständnisses der Erd-Dynamik limitiert die Genauigkeit von UT2 auf etwa  $10^{-8}$  (eine Sekunde in 3 Jahren).
- Die Idee der „Ephemeridenzeit“ besteht darin, neben der Erde noch andere Himmelskörper einzubeziehen (Mond,...).

Zeit ist, was man auf der Uhr abliest.  
Aber was ist eine Uhr?

Domenico Giulini

Motti

Einige historische Stimmen

Moderne Stimmen

Soll heißen?

Bewegungsgesetze

Tag

Sekunde

Jahr

Atomzeit

UT2 versus TAI

Tageslänge

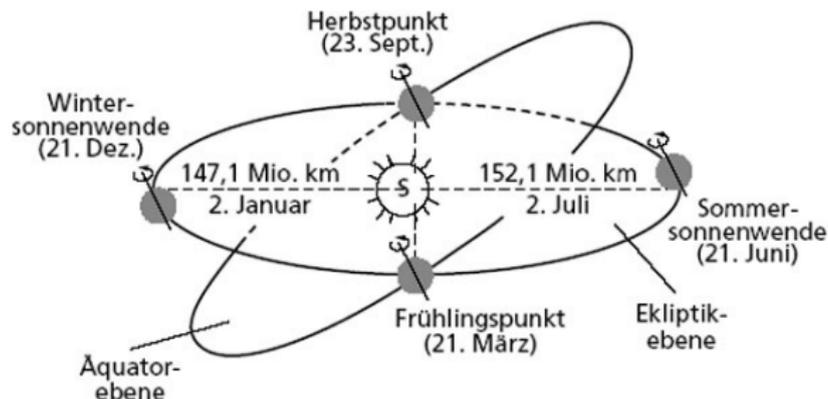
Gravitation

Pulsare

Compton Clocks?

Zusammenfassung

# Was ist ein Jahr?



- ▶ Das siderische Jahr ist die Dauer zwischen zwei aufeinander folgenden gleichen Stellungen von Erde-Sonne relativ zu den Fixsternen.
- ▶ Das Perihel- oder anomalistische Jahr ist die Dauer zwischen aufeinander folgenden Periheldurchgängen der Erde.
- ▶ Das tropische Jahr ist die Dauer zwischen zwei Durchgängen der Erde durch den Frühlingspunkt (gleiche „Jahreszeit“).

$$\text{Jahr}_{\text{siderisch}} = 365 \text{ Tage} + 6 \text{ Stunden} + 9 \text{ Minuten}$$

$$\text{Jahr}_{\text{Perihel}} = 365 \text{ Tage} + 6 \text{ Stunden} + 13 \text{ Minuten}$$

$$\text{Jahr}_{\text{tropisch}} = 365 \text{ Tage} + 5 \text{ Stunden} + 48 \text{ Minuten} + 46 \text{ Sekunden}$$

Zeit ist, was man auf der Uhr abliest.  
Aber was ist eine Uhr?

Domenico Giulini

Motti

Einige historische Stimmen

Moderne Stimmen

Soll heißen?

Bewegungsgesetze

Tag

Sekunde

Jahr

Atomzeit

UT2 versus TAI

Tageslänge

Gravitation

Pulsare

Compton Clocks?

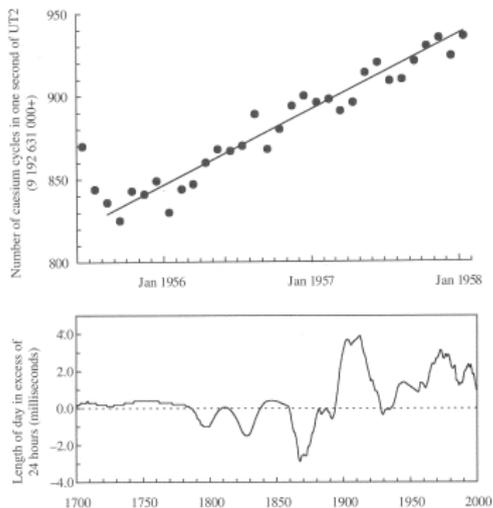
Zusammenfassung

- ▶ Periodische Zustandsänderungen mehrerer oder einzelner Atome können ebenso wie in der Mechanik einen „Uhrzeiger“ definieren.
- ▶ Der Zeitparameter  $t$  der Schrödinger-Gleichung unterscheidet sich prinzipiell *nicht* von dem der Newtonschen Bewegungsgleichungen.
- ▶ Der klare Vorteil mikroskopischer Uhren liegt in der weit(!!!) kleineren Störanfälligkeit des „Uhrwerks“.
- ▶ Mit einem System von etwa 250 Atomuhren (Cäsium, H-Maser) an verschiedenen Orten (Höhendifferenzen beachten, s.u.) wird ein gewichtetes Zeitmittel errechnet, die TAI-Zeit (Temps Atomique International).
- ▶ **Definition der TAI-Sekunde (1967):** Eine Sekunde ist das

9.192.613.770 – Fache

der Periodendauer des Übergangs zwischen den beiden Hyperfeinstruktur-niveaus des Atoms  $^{133}\text{Cs}$ .

# UT2, TAI und UTC



- ▶ Messungen in den späten 50er Jahren zeigten klar, dass die Anzahl der „Schläge“ von Cäsiumuhren pro UT2-Sekunde systematisch zunehmen. Dies wird als Abbremsung der Erdrotation *interpretiert*.
- ▶ Aus historischen astronomischen Quellen können Astronomen die Schwankungen der Dauer eines mittleren Sonnentages in den letzten 300 Jahren annäherungsweise rekonstruieren. Diese sind auffällig irregulär.

- ▶ Um die theoretischen Vorteile der Atomzeit TAI mit den praktischen Erfordernissen einer am Sonnenstand sich orientierenden Zeit zu vereinen, versieht man die TAI mit Schaltsekunden; es entsteht die **Universal Coordinated Time (UCT)**, für die stets gilt  $|\text{UCT}-\text{UT2}| < 1 \text{ s}$ . Einheit ist nach wie vor die TAI-Sekunde.

Zeit ist, was man auf der Uhr abliest.  
Aber was ist eine Uhr?

Domenico Giulini

Motti

Einige historische Stimmen

Moderne Stimmen

Soll heißen?

Bewegungsgesetze

Tag

Sekunde

Jahr

Atomzeit

UT2 versus TAI

Tageslänge

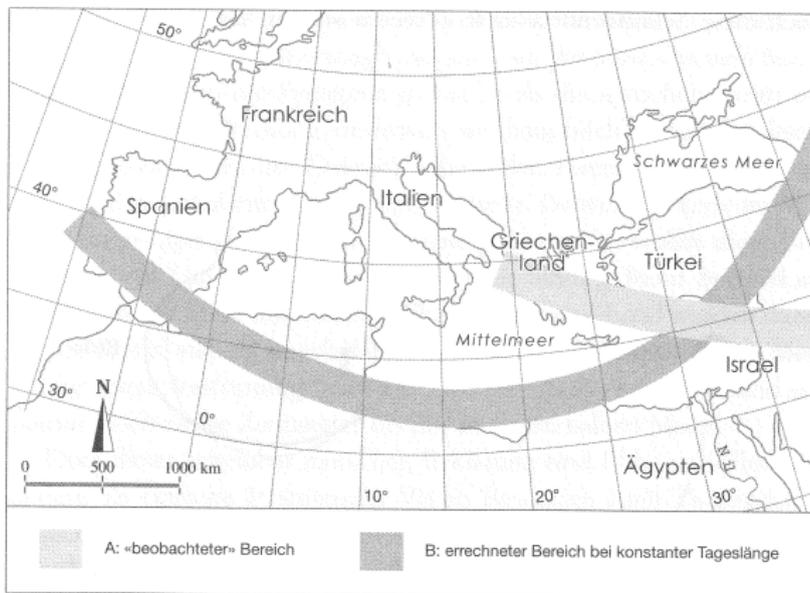
Gravitation

Pulsare

Compton Clocks?

Zusammenfassung

## Sonnenfinsternis am 14. Januar 484 v. Chr. (beobachtet in Griechenland)



Nach antiken Berichten strich der Mondschatten entlang dem hell eingefärbten Streifen. Berechnungen auf Grund der Hypothese, dass die Erde auch in der Vergangenheit ihre heutige Drehgeschwindigkeit besaß, ergeben aber den weiter westlich gelegenen dunklen Streifen.

Zeit ist, was man auf der Uhr abliest.  
Aber was ist eine Uhr?

Domenico Giulini

Motti

Einige historische Stimmen

Moderne Stimmen

Soll heißen?

Bewegungsgesetze

Tag

Sekunde

Jahr

Atomzeit

UT2 versus TAI

Tageslänge

Gravitation

Pulsare

Compton Clocks?

Zusammenfassung

# Einfluss der Gravitation auf Uhrengang

- ▶ Nach der Allgemeinen Relativitätstheorie differieren die Perioden zweier baugleicher Uhren auf unterschiedlichen Höhen  $H$  und  $H + \Delta H$  im Gravitationsfeld einer sphärisch-symmetrischen Massenverteilung um

$$\frac{\Delta T}{T} = \frac{GM}{c^2 H^2} \cdot \Delta H.$$

- ▶ Für das Heben und Senken einer Uhr auf der Erdoberfläche ergibt sich

$$\frac{\Delta T}{T} \approx 10^{-16} \cdot \frac{\Delta H}{\text{Meter}}.$$

- ▶ Für das radiale Verschieben einer Uhr auf der Erdbahn im Gravitationsfeld der Sonne hingegen

$$\frac{\Delta T}{T} \approx 10^{-16} \cdot \frac{\Delta H}{\text{Kilometer}}.$$

Achtung, hier ist

$$\Delta H = \begin{cases} \text{täglich bis zu 12.000 Kilometer durch Erddrehung,} \\ \text{jährlich bis zu 5 Millionen Kilometer durch Bahnellipse.} \end{cases}$$

Zeit ist, was man auf der Uhr abliest.  
Aber was ist eine Uhr?

Domenico Giulini

Motti

Einige historische Stimmen

Moderne Stimmen

Soll heißen?

Bewegungsgesetze

Tag

Sekunde

Jahr

Atomzeit

UT2 versus TAI

Tageslänge

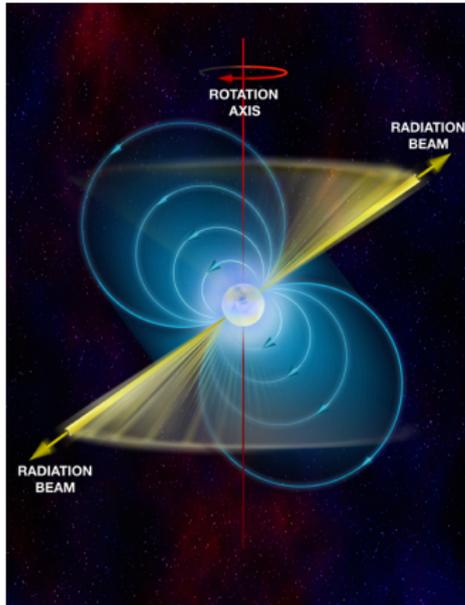
Gravitation

Pulsare

Compton Clocks?

Zusammenfassung

# Pulsare als Uhren



- ▶ Pulsare sind schnell rotierende Neutronensterne, deren Rotationsachse schräg zur magnetischen Achse steht.
- ▶ Der schnellste Pulsar ist PSR 1937+21 mit einer Periode von

$$T = 1,557.806.448.872.75(3) \text{ ms}$$

- ▶ Abzüglich systematischer Verlangsamungen durch Energieverlust, kann die Stabilität von Pulsaren mit der von Atomuhren verglichen werden.

Zeit ist, was man auf der Uhr abliest.  
Aber was ist eine Uhr?

Domenico Giulini

Motti

Einige historische Stimmen

Moderne Stimmen

Soll heißen?

Bewegungsgesetze

Tag

Sekunde

Jahr

Atomzeit

UT2 versus TAI

Tageslänge

Gravitation

**Pulsare**

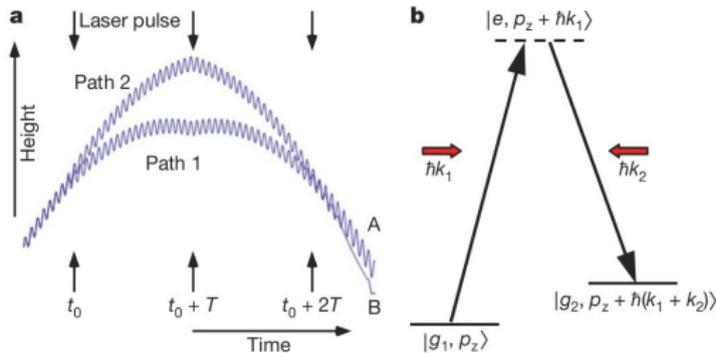
Compton Clocks?

Zusammenfassung

# „Compton Clocks“: Ein Bubenstück aus jüngster Vergangenheit

Zeit ist, was man auf der Uhr abliest.  
Aber was ist eine Uhr?

Domenico Giulini



- ▶ *Nature*, Februar 2010. Müller, Peters und Chu behaupten, dass Cäsiumatome in einem *anderen Sinn* als oben Uhren sind: Selbst in stationären Zuständen schwängen sie mit der Compton-Frequenz

$$\omega_C = \frac{mc^2}{\hbar} \approx 2 \times 10^{26} \cdot \text{s}^{-1}$$

- ▶ Damit wäre der gravitative Einfluss auf den Uhrengang für Höhenunterschiede  $\Delta H = 0,1 \text{ mm}$  mit einer Genauigkeit von  $10^{-9}$  durch Atominterferometrie im Labor messbar ( $\Rightarrow$  Präzisionstest der ART).
- ▶ Kann das sein?

Motti

Einige historische Stimmen

Moderne Stimmen

Soll heißen?

Bewegungsgesetze

Tag

Sekunde

Jahr

Atomzeit

UT2 versus TAI

Tageslänge

Gravitation

Pulsare

Compton Clocks?

Zusammenfassung

- ▶ In der Physik ist Zeit zunächst keine direkt messbare Größe.
- ▶ Relativ zu einem deterministisch dynamischen Gesetz (Bewegungsgleichung) eines Systems wird der durch das Gesetz eingeführte Zeitparameter  $t$  *durch* die instantanen Konfigurationen des Systems ablesbar. (⇒ Idee der Ephimeridenzeit.)
- ▶ Darin unterscheiden sich klassische- und Quantenmechanik nicht. Das trifft auch für die Relativitätstheorie in Bezug auf lokale Zeitmessungen zu.
- ▶ Die Tatsache, dass viele der bekannten dynamischen Gesetze einen oder eine Klasse von Zeitparametern auszeichnen (in Sinne Poincarés) wird als kontingente Eigenschaft des Naturgeschehens verstanden.
- ▶ „Erst die Theorie entscheidet, was man beobachtet“ (A. Einstein zu W. Heisenberg 1925)

Vielen Dank!

- ▶ In der Physik ist Zeit zunächst keine direkt messbare Größe.
- ▶ Relativ zu einem deterministisch dynamischen Gesetz (Bewegungsgleichung) eines Systems wird der durch das Gesetz eingeführte Zeitparameter  $t$  durch die instantanen Konfigurationen des Systems ablesbar. (⇒ Idee der Ephimeridenzeit.)
- ▶ Darin unterscheiden sich klassische- und Quantenmechanik nicht. Das trifft auch für die Relativitätstheorie in Bezug auf lokale Zeitmessungen zu.
- ▶ Die Tatsache, dass viele der bekannten dynamischen Gesetze einen oder eine Klasse von Zeitparametern auszeichnen (in Sinne Poincarés) wird als kontingente Eigenschaft des Naturgeschehens verstanden.
- ▶ „Erst die Theorie entscheidet, was man beobachtet“ (A. Einstein zu W. Heisenberg 1925)

Motti

Einige historische  
Stimmen

Moderne Stimmen

Soll heißen?

Bewegungsgesetze

Tag

Sekunde

Jahr

Atomzeit

UT2 versus TAI

Tageslänge

Gravitation

Pulsare

Compton Clocks?

Zusammenfassung

Vielen Dank!

- ▶ In der Physik ist Zeit zunächst keine direkt messbare Größe.
- ▶ Relativ zu einem deterministisch dynamischen Gesetz (Bewegungsgleichung) eines Systems wird der durch das Gesetz eingeführte Zeitparameter  $t$  *durch* die instantanen Konfigurationen des Systems ablesbar.  
( $\Rightarrow$  Idee der Ephimeridenzeit.)
- ▶ Darin unterscheiden sich klassische- und Quantenmechanik nicht. Das trifft auch für die Relativitätstheorie in Bezug auf lokale Zeitmessungen zu.
- ▶ Die Tatsache, dass viele der bekannten dynamischen Gesetze einen oder eine Klasse von Zeitparametern auszeichnen (in Sinne Poincarés) wird als kontingente Eigenschaft des Naturgeschehens verstanden.
- ▶ „Erst die Theorie entscheidet, was man beobachtet“  
(A. Einstein zu W. Heisenberg 1925)

Motti

Einige historische  
Stimmen

Moderne Stimmen

Soll heißen?

Bewegungsgesetze

Tag

Sekunde

Jahr

Atomzeit

UT2 versus TAI

Tageslänge

Gravitation

Pulsare

Compton Clocks?

Zusammenfassung

Vielen Dank!

- ▶ In der Physik ist Zeit zunächst keine direkt messbare Größe.
- ▶ Relativ zu einem deterministisch dynamischen Gesetz (Bewegungsgleichung) eines Systems wird der durch das Gesetz eingeführte Zeitparameter  $t$  *durch* die instantanen Konfigurationen des Systems ablesbar.  
( $\Rightarrow$  Idee der Ephimeridenzeit.)
- ▶ Darin unterscheiden sich klassische- und Quantenmechanik nicht. Das trifft auch für die Relativitätstheorie in Bezug auf lokale Zeitmessungen zu.
- ▶ Die Tatsache, dass viele der bekannten dynamischen Gesetze einen oder eine Klasse von Zeitparametern auszeichnen (in Sinne Poincarés) wird als kontingente Eigenschaft des Naturgeschehens verstanden.
- ▶ „Erst die Theorie entscheidet, was man beobachtet“  
(A. Einstein zu W. Heisenberg 1925)

Motti

Einige historische  
Stimmen

Moderne Stimmen

Soll heißen?

Bewegungsgesetze

Tag

Sekunde

Jahr

Atomzeit

UT2 versus TAI

Tageslänge

Gravitation

Pulsare

Compton Clocks?

Zusammenfassung

Vielen Dank!

- ▶ In der Physik ist Zeit zunächst keine direkt messbare Größe.
- ▶ Relativ zu einem deterministisch dynamischen Gesetz (Bewegungsgleichung) eines Systems wird der durch das Gesetz eingeführte Zeitparameter  $t$  *durch* die instantanen Konfigurationen des Systems ablesbar.  
( $\Rightarrow$  Idee der Ephimeridenzeit.)
- ▶ Darin unterscheiden sich klassische- und Quantenmechanik nicht. Das trifft auch für die Relativitätstheorie in Bezug auf lokale Zeitmessungen zu.
- ▶ Die Tatsache, dass viele der bekannten dynamischen Gesetze einen oder eine Klasse von Zeitparametern auszeichnen (in Sinne Poincarés) wird als kontingente Eigenschaft des Naturgeschehens verstanden.
- ▶ „Erst die Theorie entscheidet, was man beobachtet“  
(A. Einstein zu W. Heisenberg 1925)

Motti

Einige historische  
Stimmen

Moderne Stimmen

Soll heißen?

Bewegungsgesetze

Tag

Sekunde

Jahr

Atomzeit

UT2 versus TAI

Tageslänge

Gravitation

Pulsare

Compton Clocks?

Zusammenfassung

Vielen Dank!

- ▶ In der Physik ist Zeit zunächst keine direkt messbare Größe.
- ▶ Relativ zu einem deterministisch dynamischen Gesetz (Bewegungsgleichung) eines Systems wird der durch das Gesetz eingeführte Zeitparameter  $t$  *durch* die instantanen Konfigurationen des Systems ablesbar.  
( $\Rightarrow$  Idee der Ephimeridenzeit.)
- ▶ Darin unterscheiden sich klassische- und Quantenmechanik nicht. Das trifft auch für die Relativitätstheorie in Bezug auf lokale Zeitmessungen zu.
- ▶ Die Tatsache, dass viele der bekannten dynamischen Gesetze einen oder eine Klasse von Zeitparametern auszeichnen (in Sinne Poincarés) wird als kontingente Eigenschaft des Naturgeschehens verstanden.
- ▶ „Erst die Theorie entscheidet, was man beobachtet“  
(A. Einstein zu W. Heisenberg 1925)

Motti

Einige historische  
Stimmen

Moderne Stimmen

Soll heißen?

Bewegungsgesetze

Tag

Sekunde

Jahr

Atomzeit

UT2 versus TAI

Tageslänge

Gravitation

Pulsare

Compton Clocks?

Zusammenfassung

Vielen Dank!

- ▶ In der Physik ist Zeit zunächst keine direkt messbare Größe.
- ▶ Relativ zu einem deterministisch dynamischen Gesetz (Bewegungsgleichung) eines Systems wird der durch das Gesetz eingeführte Zeitparameter  $t$  *durch* die instantanen Konfigurationen des Systems ablesbar. (⇒ Idee der Ephimeridenzeit.)
- ▶ Darin unterscheiden sich klassische- und Quantenmechanik nicht. Das trifft auch für die Relativitätstheorie in Bezug auf lokale Zeitmessungen zu.
- ▶ Die Tatsache, dass viele der bekannten dynamischen Gesetze einen oder eine Klasse von Zeitparametern auszeichnen (in Sinne Poincarés) wird als kontingente Eigenschaft des Naturgeschehens verstanden.
- ▶ „Erst die Theorie entscheidet, was man beobachtet“  
(A. Einstein zu W. Heisenberg 1925)

Motti

Einige historische  
Stimmen

Moderne Stimmen

Soll heißen?

Bewegungsgesetze

Tag

Sekunde

Jahr

Atomzeit

UT2 versus TAI

Tageslänge

Gravitation

Pulsare

Compton Clocks?

Zusammenfassung

Vielen Dank!