

9. Raum, Zeit und die Entstehung unseres Universums

9.1 Vorstellungen von Raum und Zeit vor Einstein

9.2 Das Experiment von Michelson und Morley

9.3 Die Spezielle Relativitätstheorie

9.4 Die Allgemeine Relativitätstheorie

9.5 Einsteins Kosmologie

9.6 Albert Einstein

9.7 Lemaître's Hypothese vom Urknall

9.8 Die Vermessung des Weltalls

9.9 Das Hubblesche Gesetz

9.10 Edwin Hubble

9.11 Die kosmische Hintergrundstrahlung

3. Zur Elektrodynamik bewegter Körper; von A. Einstein.

Daß die Elektrodynamik Maxwells — wie dieselbe gegenwärtig aufgefaßt zu werden pflegt — in ihrer Anwendung auf bewegte Körper zu Asymmetrien führt, welche den Phänomenen nicht anzuhäufen scheinen, ist bekannt. Man denke z. B. an die elektrodynamische Wechselwirkung zwischen einem Magneten und einem Leiter. Das beobachtbare Phänomen hängt hier nur ab von der Relativbewegung von Leiter und Magnet, während nach der üblichen Auffassung die beiden Fälle, daß der eine oder der andere dieser Körper der bewegte sei, streng voneinander zu trennen sind. Bewegt sich nämlich der Magnet und ruht der Leiter, so entsteht in der Umgebung des Magneten ein elektrisches Feld von gewissem Energiewerte, welches an den Orten, wo sich Teile des Leiters befinden, einen Strom erzeugt. Ruht aber der Magnet und bewegt sich der Leiter, so entsteht in der Umgebung des Magneten kein elektrisches Feld, dagegen im Leiter eine elektromotorische Kraft, welcher an sich keine Energie entspricht, die aber — Gleichheit der Relativbewegung bei den beiden ins Auge gefaßten Fällen vorausgesetzt — zu elektrischen Strömen von derselben Größe und demselben Verlaufe Veranlassung gibt, wie im ersten Falle die elektrischen Kräfte.

Beispiele ähnlicher Art, sowie die mißlungenen Versuche, eine Bewegung der Erde relativ zum „Lichtmedium“ zu konstatieren, führen zu der Vermutung, daß dem Begriffe der absoluten Ruhe nicht nur in der Mechanik, sondern auch in der Elektrodynamik keine Eigenschaften der Erscheinungen entsprechen, sondern daß vielmehr für alle Koordinatensysteme, für welche die mechanischen Gleichungen gelten, auch die gleichen elektrodynamischen und optischen Gesetze gelten, wie dies für die Größen erster Ordnung bereits erwiesen ist. Wir wollen diese Vermutung (deren Inhalt im folgenden „Prinzip der Relativität“ genannt werden wird) zur Voraussetzung erheben und außerdem die mit ihm nur scheinbar unverträgliche

Die zentrale Frage:

Sind Raum und Zeit nur der **Rahmen** für physikalische Prozesse, die in Raum und Zeit ablaufen, oder sind sie selber **physikalische Größen**, die sich verändern können und der Messung unterliegen?

Newtons Vorstellungen von Raum und Zeit (aus den Principia):

- I. „Die absolute, wahre und mathematische Zeit verfließt an sich und vermöge ihrer Natur gleichförmig und ohne Beziehung auf irgendeinen äußeren Gegenstand.“
- II. „Der absolute Raum bleibt vermöge seiner Natur und ohne Beziehung auf einen äußeren Gegenstand stets gleich und unbeweglich.“

Relative Orts- und Zeitangaben setzen immer ein Bezugssystem voraus.

Ausgezeichnete Bezugssysteme sind die **Inertialsysteme**, in denen sich kräftefreie Körper geradlinig und gleichförmig bewegen (Ludwig Lange 1885).

Galileis Relativitätsprinzip

9. Raum, Zeit und die Entstehung unseres Universums

- 9.1 Vorstellungen von Raum und Zeit vor Einstein
- 9.2 **Das Experiment von Michelson und Morley**
- 9.3 Die Spezielle Relativitätstheorie
- 9.4 Die Allgemeine Relativitätstheorie
- 9.5 Einsteins Kosmologie
- 9.6 Albert Einstein
- 9.7 Lemaître's Hypothese vom Urknall
- 9.8 Die Vermessung des Weltalls
- 9.9 Das Hubblesche Gesetz
- 9.10 Edwin Hubble
- 9.11 Die kosmische Hintergrundstrahlung

3. Zur Elektrodynamik bewegter Körper; von A. Einstein.

Daß die Elektrodynamik Maxwells — wie dieselbe gegenwärtig aufgefaßt zu werden pflegt — in ihrer Anwendung auf bewegte Körper zu Asymmetrien führt, welche den Phänomenen nicht anzuhängen scheinen, ist bekannt. Man denke z. B. an die elektrodynamische Wechselwirkung zwischen einem Magneten und einem Leiter. Das beobachtbare Phänomen hängt hier nur ab von der Relativbewegung von Leiter und Magnet, während nach der üblichen Auffassung die beiden Fälle, daß der eine oder der andere dieser Körper der bewegte sei, streng voneinander zu trennen sind. Bewegt sich nämlich der Magnet und ruht der Leiter, so entsteht in der Umgebung des Magneten ein elektrisches Feld von gewissem Energiewerte, welches an den Orten, wo sich Teile des Leiters befinden, einen Strom erzeugt. Ruht aber der Magnet und bewegt sich der Leiter, so entsteht in der Umgebung des Magneten kein elektrisches Feld, dagegen im Leiter eine elektromotorische Kraft, welcher an sich keine Energie entspricht, die aber — Gleichheit der Relativbewegung bei den beiden ins Auge gefaßten Fällen vorausgesetzt — zu elektrischen Strömen von derselben Größe und demselben Verlaufe Veranlassung gibt, wie im ersten Falle die elektrischen Kräfte.

Beispiele ähnlicher Art, sowie die mißlungenen Versuche, eine Bewegung der Erde relativ zum „Lichtmedium“ zu konstatieren, führen zu der Vermutung, daß dem Begriffe der absoluten Ruhe nicht nur in der Mechanik, sondern auch in der Elektrodynamik keine Eigenschaften der Erscheinungen entsprechen, sondern daß vielmehr für alle Koordinatensysteme, für welche die mechanischen Gleichungen gelten, auch die gleichen elektrodynamischen und optischen Gesetze gelten, wie dies für die Größen erster Ordnung bereits erwiesen ist. Wir wollen diese Vermutung (deren Inhalt im folgenden „Prinzip der Relativität“ genannt werden wird) zur Voraussetzung erheben und außerdem die mit ihm nur scheinbar unverträgliche

Seit Huygens stellte man sich vor, dass Licht sich als Longitudinalwelle in einem Medium, genannt Äther, ausbreitet.

Der Äther als Träger des Lichtes definiert ein absolutes Bezugssystem (Newtons absoluter Raum). In diesem breitet sich das Licht in jeder Richtung mit der gleichen Geschwindigkeit aus.

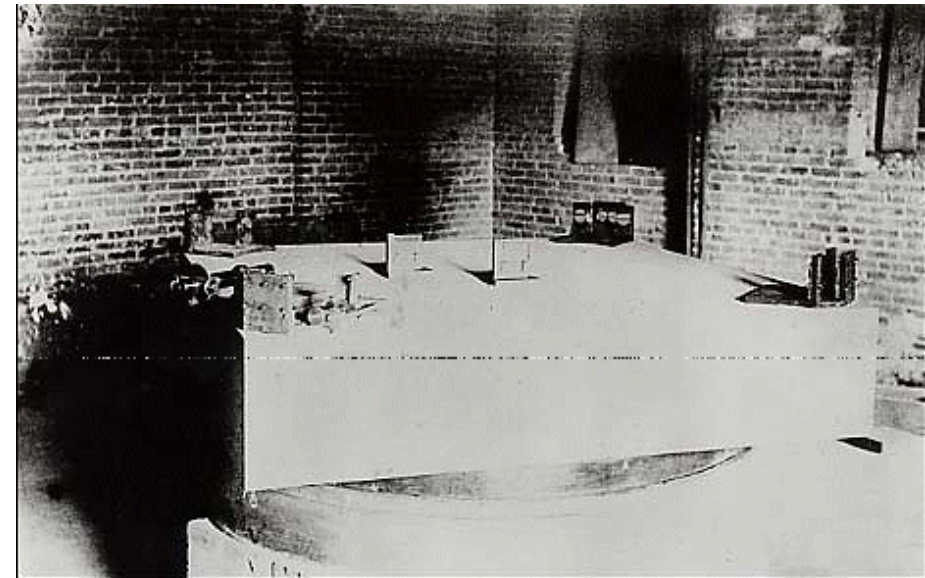
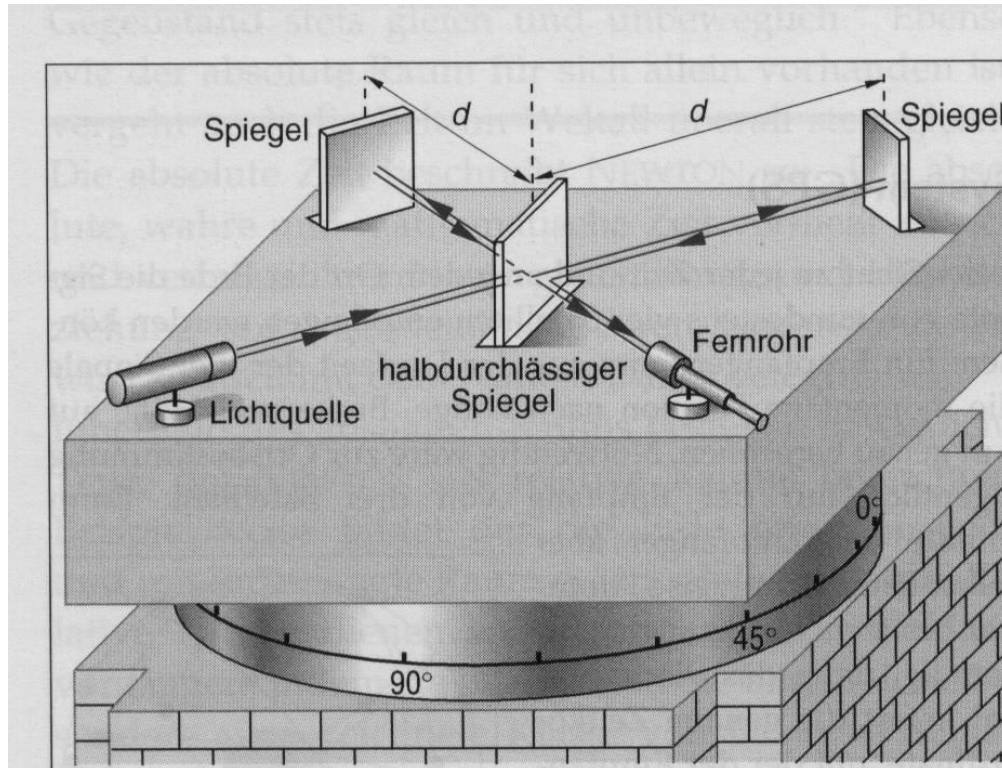
Wie groß ist die Lichtgeschwindigkeit in einem mit der Geschwindigkeit v relativ dazu bewegten System?

Das Experiment von Michelson und Morley 1887

Die Erde ist ein System, das sich relativ zum Äther mit der Geschwindigkeit $v = 30 \text{ m/s}$ bewegt.
Erwarteter Effekt von der Ordnung $(v/c)^2 = 10^{-8}$



Albert Abraham Michelson
1852 – 1931
Nobelpreis 1907



Michelson & Morley's 1887 interferometer
built in the basement of Western Reserve
Photo: Case Western Reserve Archive

9. Raum, Zeit und die Entstehung unseres Universums

- 9.1 Vorstellungen von Raum und Zeit vor Einstein
- 9.2 Das Experiment von Michelson und Morley
- 9.3 Die Spezielle Relativitätstheorie
- 9.4 Die Allgemeine Relativitätstheorie
- 9.5 Einsteins Kosmologie
- 9.6 Albert Einstein
- 9.7 Lemaître's Hypothese vom Urknall
- 9.8 Die Vermessung des Weltalls
- 9.9 Das Hubblesche Gesetz
- 9.10 Edwin Hubble
- 9.11 Die kosmische Hintergrundstrahlung

3. Zur Elektrodynamik bewegter Körper; von A. Einstein.

Daß die Elektrodynamik Maxwells — wie dieselbe gegenwärtig aufgefaßt zu werden pflegt — in ihrer Anwendung auf bewegte Körper zu Asymmetrien führt, welche den Phänomenen nicht anzuhäufen scheinen, ist bekannt. Man denke z. B. an die elektrodynamische Wechselwirkung zwischen einem Magneten und einem Leiter. Das beobachtbare Phänomen hängt hier nur ab von der Relativbewegung von Leiter und Magnet, während nach der üblichen Auffassung die beiden Fälle, daß der eine oder der andere dieser Körper der bewegte sei, streng voneinander zu trennen sind. Bewegt sich nämlich der Magnet und ruht der Leiter, so entsteht in der Umgebung des Magneten ein elektrisches Feld von gewissem Energiewerte, welches an den Orten, wo sich Teile des Leiters befinden, einen Strom erzeugt. Ruht aber der Magnet und bewegt sich der Leiter, so entsteht in der Umgebung des Magneten kein elektrisches Feld, dagegen im Leiter eine elektromotorische Kraft, welcher an sich keine Energie entspricht, die aber — Gleichheit der Relativbewegung bei den beiden ins Auge gefaßten Fällen vorausgesetzt — zu elektrischen Strömen von derselben Größe und demselben Verlaufe Veranlassung gibt, wie im ersten Falle die elektrischen Kräfte.

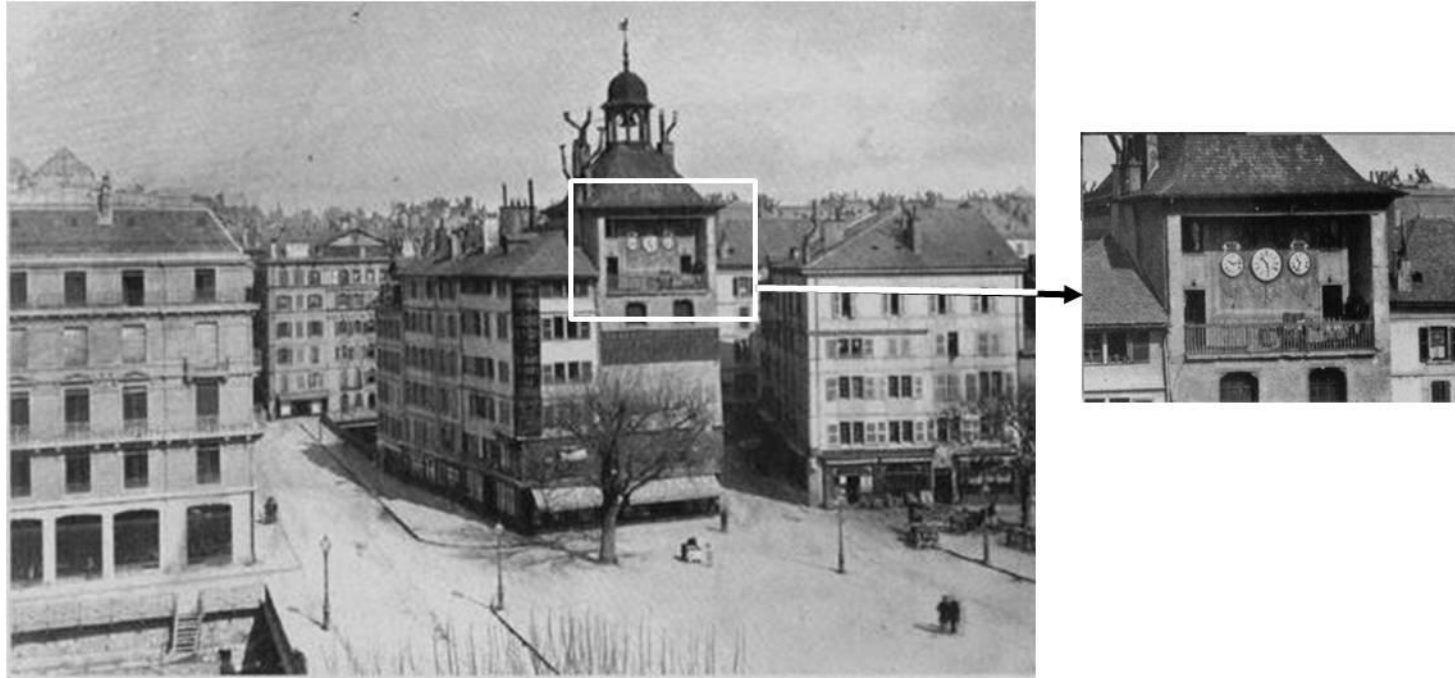
Beispiele ähnlicher Art, sowie die mißlungenen Versuche, eine Bewegung der Erde relativ zum „Lichtmedium“ zu konstatieren, führen zu der Vermutung, daß dem Begriffe der absoluten Ruhe nicht nur in der Mechanik, sondern auch in der Elektrodynamik keine Eigenschaften der Erscheinungen entsprechen, sondern daß vielmehr für alle Koordinatensysteme, für welche die mechanischen Gleichungen gelten, auch die gleichen elektrodynamischen und optischen Gesetze gelten, wie dies für die Größen erster Ordnung bereits erwiesen ist. Wir wollen diese Vermutung (deren Inhalt im folgenden „Prinzip der Relativität“ genannt werden wird) zur Voraussetzung erheben und außerdem die mit ihm nur scheinbar unverträgliche

„Die spezielle Relativitätstheorie hatte Einstein wie eine reife Frucht gepflückt.“ (C.F. von Weizsäcker)

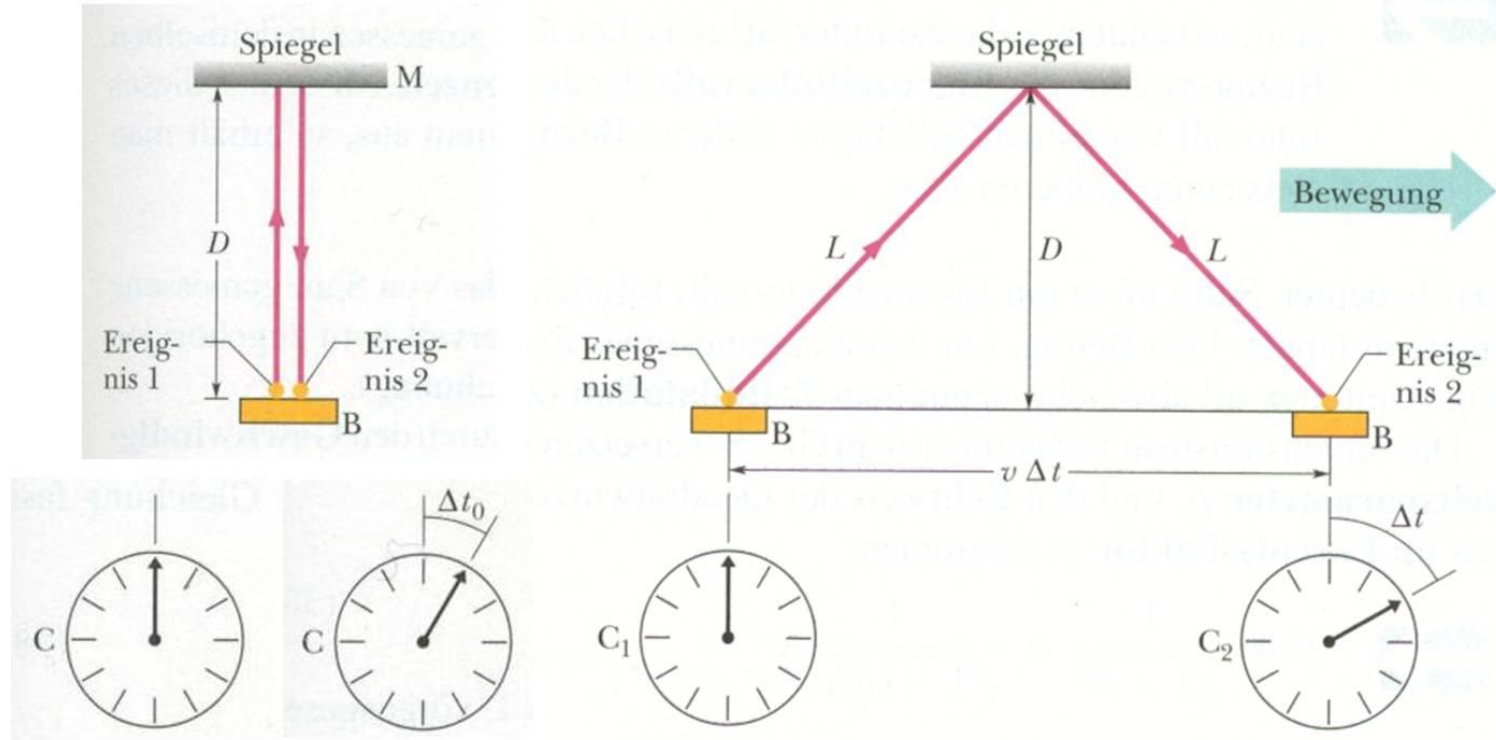
Vorgeschichte: Maxwell Gleichungen, Michelson-Morley Experiment, Überlegungen von Hendrik Antoon Lorentz und Henri Poincare.

Einsteins origineller Ansatz: Allgemeine Analyse der Bedeutung der Zeit
Einstein, A. (1905), " Zur Elektrodynamik bewegter Körper.", *Annalen der Physik* **17**: 891. [→Lorentz-Transformationen]
Einstein, A. (1905), "Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig?", *Annalen der Physik* **18**: 639–643, [→ $E = m \cdot c^2$]

Das Bahnhofsgebäude in Genf um 1860

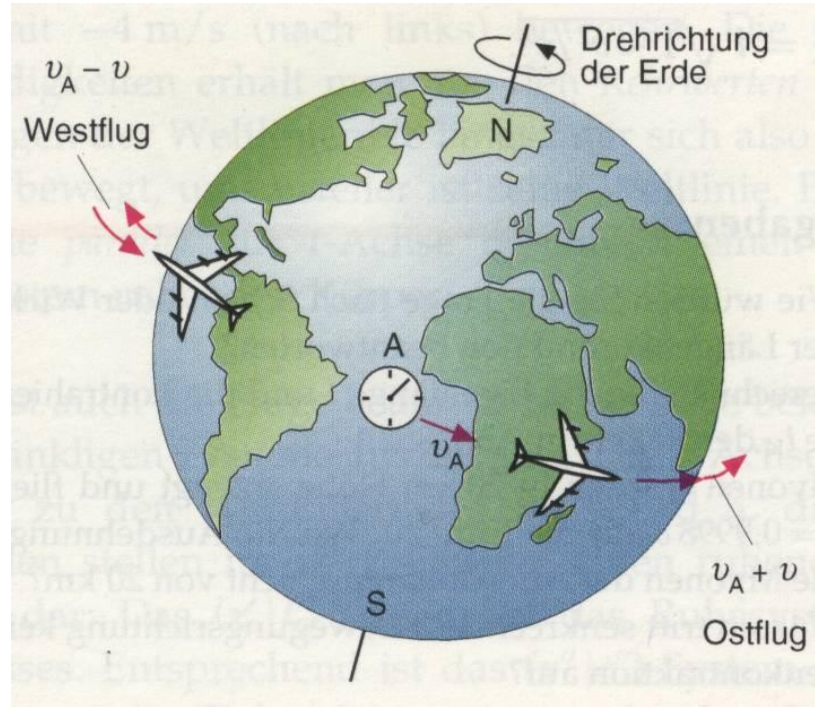


Die drei Uhren zeigen die Zeiten in Bern, Genf und Paris an.
Gegenüber der Genfer Uhr geht die Berner um 4 Minuten vor,
die Pariser um 16 Minuten nach.



Erklärung der Zeitdehnung mit Hilfe von Lichtuhren. Links befindet sich die Uhr in Ruhe, rechts bewegt sie sich mit der Geschwindigkeit v .

Das Experiment von Hafele und Keating (1971)



	Vorhergesagt			Gemessen
	Gravitation (ART)	Geschwindigkeit (SRT)	Gesamt	
Ostwärts	144 ± 14 ns	-184 ± 18 ns	-40 ± 23 ns	-59 ± 10 ns
Westwärts	179 ± 18 ns	96 ± 10 ns	275 ± 21 ns	273 ± 7 ns

9. Raum, Zeit und die Entstehung unseres Universums

- 9.1 Vorstellungen von Raum und Zeit vor Einstein
- 9.2 Das Experiment von Michelson und Morley
- 9.3 Die Spezielle Relativitätstheorie
- 9.4 Die Allgemeine Relativitätstheorie**
- 9.5 Einsteins Kosmologie
- 9.6 Albert Einstein
- 9.7 Lemaître's Hypothese vom Urknall
- 9.8 Die Vermessung des Weltalls
- 9.9 Das Hubblesche Gesetz
- 9.10 Edwin Hubble
- 9.11 Die kosmische Hintergrundstrahlung

3. Zur Elektrodynamik bewegter Körper; von A. Einstein.

Daß die Elektrodynamik Maxwells — wie dieselbe gegenwärtig aufgefaßt zu werden pflegt — in ihrer Anwendung auf bewegte Körper zu Asymmetrien führt, welche den Phänomenen nicht anzuhäufen scheinen, ist bekannt. Man denke z. B. an die elektrodynamische Wechselwirkung zwischen einem Magneten und einem Leiter. Das beobachtbare Phänomen hängt hier nur ab von der Relativbewegung von Leiter und Magnet, während nach der üblichen Auffassung die beiden Fälle, daß der eine oder der andere dieser Körper der bewegte sei, streng voneinander zu trennen sind. Bewegt sich nämlich der Magnet und ruht der Leiter, so entsteht in der Umgebung des Magneten ein elektrisches Feld von gewissem Energiewerte, welches an den Orten, wo sich Teile des Leiters befinden, einen Strom erzeugt. Ruht aber der Magnet und bewegt sich der Leiter, so entsteht in der Umgebung des Magneten kein elektrisches Feld, dagegen im Leiter eine elektromotorische Kraft, welcher an sich keine Energie entspricht, die aber — Gleichheit der Relativbewegung bei den beiden ins Auge gefaßten Fällen vorausgesetzt — zu elektrischen Strömen von derselben Größe und demselben Verlaufe Veranlassung gibt, wie im ersten Falle die elektrischen Kräfte.

Beispiele ähnlicher Art, sowie die mißlungenen Versuche, eine Bewegung der Erde relativ zum „Lichtmedium“ zu konstatieren, führen zu der Vermutung, daß dem Begriffe der absoluten Ruhe nicht nur in der Mechanik, sondern auch in der Elektrodynamik keine Eigenschaften der Erscheinungen entsprechen, sondern daß vielmehr für alle Koordinatensysteme, für welche die mechanischen Gleichungen gelten, auch die gleichen elektrodynamischen und optischen Gesetze gelten, wie dies für die Größen erster Ordnung bereits erwiesen ist. Wir wollen diese Vermutung (deren Inhalt im folgenden „Prinzip der Relativität“ genannt werden wird) zur Voraussetzung erheben und außerdem die mit ihm nur scheinbar unverträgliche

Ausgangspunkt: „Diese Erfahrung vom gleichen Fallen aller Körper im [homogenen] Gravitationsfelde ist eine der allgemeinsten, welche die Naturbeobachtung uns geliefert hat; trotzdem hat dieses Gesetz in den Fundamenten unseres physikalischen Weltbildes keinen Platz gefunden.“ (Einstein, 1911)

Geschichte des **Äquivalenzprinzips:**

Galilei: Im Vakuum fallen alle Körper gleich schnell.

Newton: Die träge Masse m_t ist gleich der schweren Masse m_s : $m_t \cdot d^2x/dt^2 = m_s \cdot g$

Lorand Eötvös (1848-1919) bestimmt die Gleichheit von schwerer und träger Masse bis auf 10^{-8}

Acht Jahre arbeitete Einstein an der Allgemeinen Relativitätstheorie (ART)

„Unter allen bekannten großen Theorien der Physik ist sie [die ART] die einzige, bei der man zweifeln kann, ob sie bis heute überhaupt gefunden wäre, wenn derjenige nicht gelebt hätte, der sie in der Tat gefunden hat.“ (C.F. von Weizsäcker)

Zeitablauf der Arbeit

„Es war 1907, als mir der glücklichste Gedanke meines Lebens kam ... Das Gravitationsfeld hat nur eine relative Existenz, weil für einen Beobachter, der frei vom Dach eines Hauses fällt – zumindest in seiner Umgebung – kein Gravitationsfeld existiert. Tatsächlich bleiben alle von diesem Beobachter fallen gelassenen Gegenstände im Zustand der Ruhe oder der gleichförmigen Bewegung, unabhängig von ihrer chemischen oder physikalischen Natur.“ (A. Einstein)

1908 Einfluss von Gravitation von auf das Verhalten von Licht

1911 Noch einmal Einfluss von Gravitation auf Licht

1913 Gekrümmte Raum-Zeit

1915 Periheldrehung des Merkur

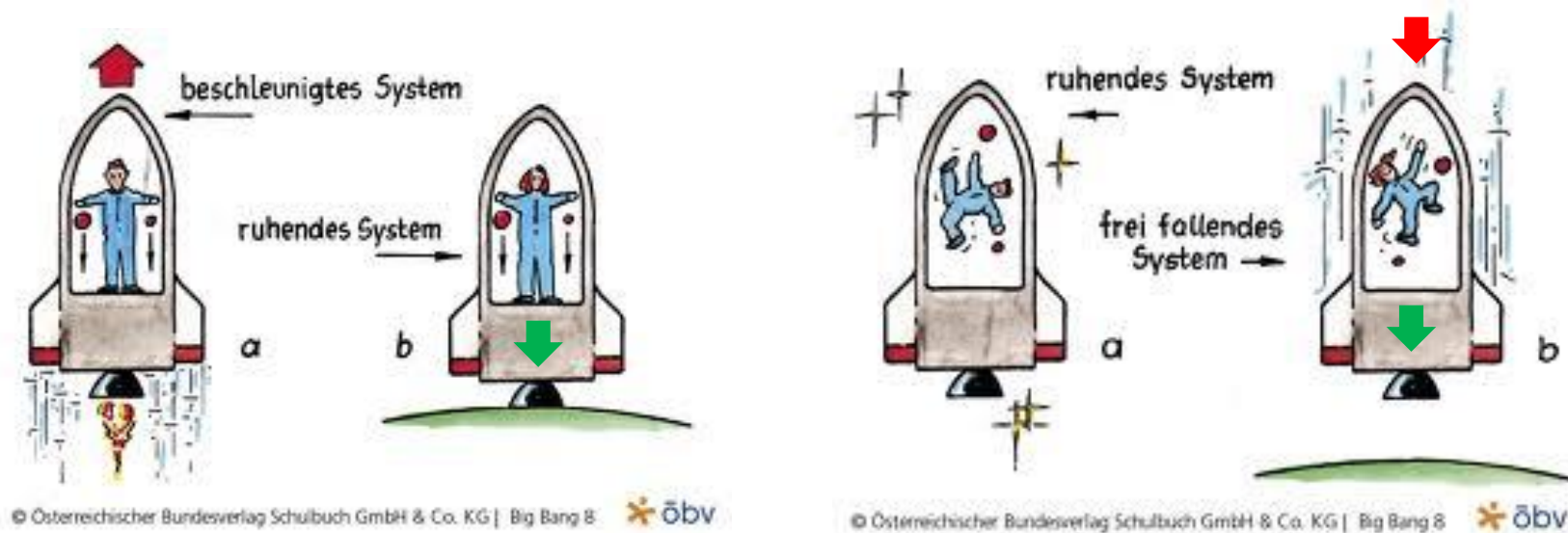
1915 20. Nov. (Göttinger Akad. d. Wiss.): David Hilbert legt eine Formulierung der Gleichungen der ART vor.

1915 25. Nov. (Preußische Akad. D. Wiss.): Feldgleichung der ART plus Lichtablenkung und Periheldrehung

1917 Kosmologische Betrachtungen zur ART

1918 Gravitationswellen

Das Äquivalenzprinzip der Allgemeinen Relativitätstheorie



Die Wirkungen der Gravitation sind von denen der Beschleunigung nicht zu unterscheiden. Die grünen Pfeile kennzeichnen die Richtung der Gravitationskraft, die roten die Richtung der Beschleunigung.

Die Gleichungen der ART

$$R_{\mu\nu} - \frac{R}{2} g_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

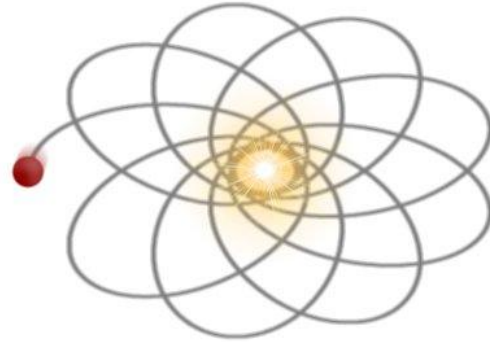
Bestimmung der Metrik $g_{\mu\nu}$ aus der Massen-Energie-Verteilung $T_{\mu\nu}$ im Raum

$$\ddot{x}^\mu + \Gamma_{\lambda\nu}^\mu \dot{x}^\lambda \dot{x}^\nu = 0$$

Das Teilchen bewegt sich auf einer Geodäte durch den Raum

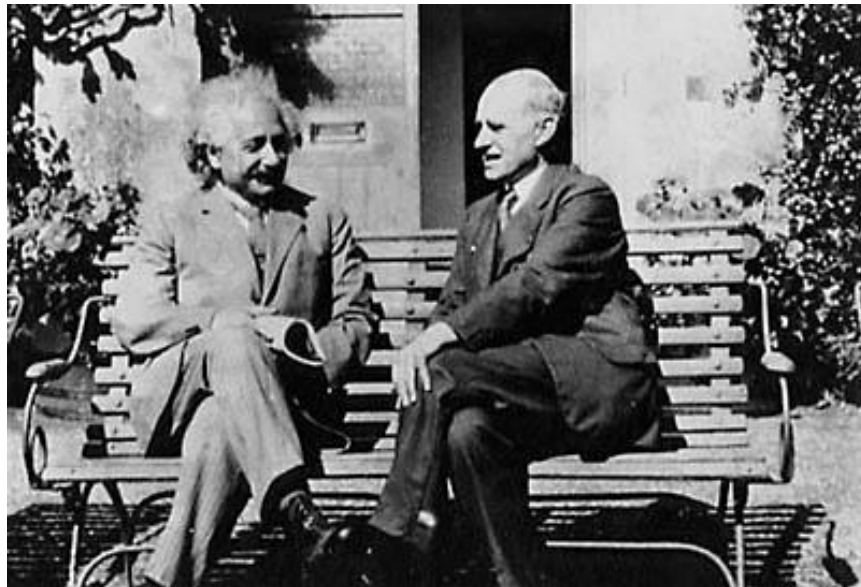
Newton : $m \cdot d^2 \mathbf{x} / dt^2 = - \mathbf{grad} V_{\text{grav}}$

Quantitative Erklärung der Periheldrehung des Merkur als erste Bestätigung für die Richtigkeit der ART

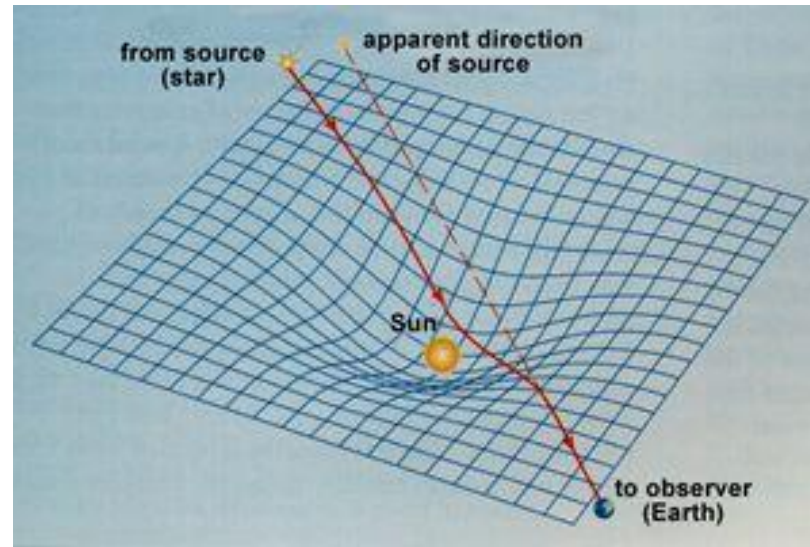


Periheldrehung des Merkur (Exzentrizität und Drehwinkel sind übertrieben). Der Drehwinkel beträgt $571''$ pro Jahrhundert und war schon vor Einstein gemessen, aber nicht verstanden worden.

Raumkrümmung und Lichtablenkung

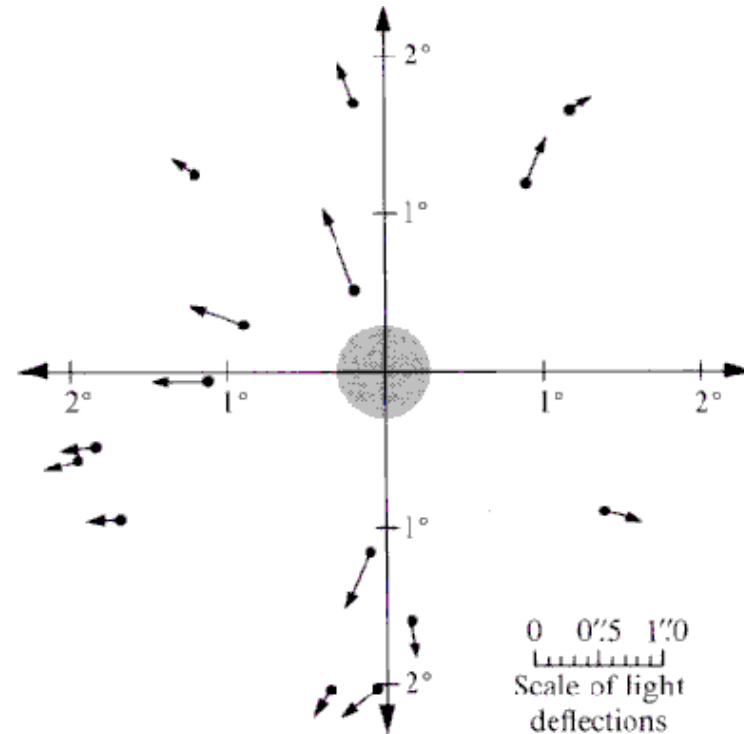


Einstein und Eddington



Lichtablenkung im Schwerfeld der Sonne.

Bei der Sonne beträgt sie $1.75''$ (aus der Newtonschen Theorie nur $0.83''$) für einen Strahl, der die Sonne tangiert. Experimenteller Nachweis durch Eddington et al. bei einer Sonnenfinsternis 1919



9. Raum, Zeit und die Entstehung unseres Universums

- 9.1 Vorstellungen von Raum und Zeit vor Einstein
- 9.2 Das Experiment von Michelson und Morley
- 9.3 Die Spezielle Relativitätstheorie
- 9.4 Die Allgemeine Relativitätstheorie
- 9.5 Einsteins Kosmologie**
- 9.6 Albert Einstein
- 9.7 Lemaître's Hypothese vom Urknall
- 9.8 Die Vermessung des Weltalls
- 9.9 Das Hubblesche Gesetz
- 9.10 Edwin Hubble
- 9.11 Die kosmische Hintergrundstrahlung

3. Zur Elektrodynamik bewegter Körper; von A. Einstein.

Daß die Elektrodynamik Maxwells — wie dieselbe gegenwärtig aufgefaßt zu werden pflegt — in ihrer Anwendung auf bewegte Körper zu Asymmetrien führt, welche den Phänomenen nicht anzuhäufen scheinen, ist bekannt. Man denke z. B. an die elektrodynamische Wechselwirkung zwischen einem Magneten und einem Leiter. Das beobachtbare Phänomen hängt hier nur ab von der Relativbewegung von Leiter und Magnet, während nach der üblichen Auffassung die beiden Fälle, daß der eine oder der andere dieser Körper der bewegte sei, streng voneinander zu trennen sind. Bewegt sich nämlich der Magnet und ruht der Leiter, so entsteht in der Umgebung des Magneten ein elektrisches Feld von gewissem Energiewerte, welches an den Orten, wo sich Teile des Leiters befinden, einen Strom erzeugt. Ruht aber der Magnet und bewegt sich der Leiter, so entsteht in der Umgebung des Magneten kein elektrisches Feld, dagegen im Leiter eine elektromotorische Kraft, welcher an sich keine Energie entspricht, die aber — Gleichheit der Relativbewegung bei den beiden ins Auge gefaßten Fällen vorausgesetzt — zu elektrischen Strömen von derselben Größe und demselben Verlaufe Veranlassung gibt, wie im ersten Falle die elektrischen Kräfte.

Beispiele ähnlicher Art, sowie die mißlungenen Versuche, eine Bewegung der Erde relativ zum „Lichtmedium“ zu konstatieren, führen zu der Vermutung, daß dem Begriffe der absoluten Ruhe nicht nur in der Mechanik, sondern auch in der Elektrodynamik keine Eigenschaften der Erscheinungen entsprechen, sondern daß vielmehr für alle Koordinatensysteme, für welche die mechanischen Gleichungen gelten, auch die gleichen elektrodynamischen und optischen Gesetze gelten, wie dies für die Größen erster Ordnung bereits erwiesen ist. Wir wollen diese Vermutung (deren Inhalt im folgenden „Prinzip der Relativität“ genannt werden wird) zur Voraussetzung erheben und außerdem die mit ihm nur scheinbar unverträgliche

Einsteins Modell für den Kosmos: Ein unbegrenztes System mit einer homogenen Massendichte

1. Je nach der Größe der Dichte erhält man für die Geometrie des Universums ein geschlossenes, ein flaches oder ein offenes Universum
2. Da nur die attraktive Gravitationskraft wirkt, lassen die Bewegungsgleichungen kein statisches Universum als Lösung zu.
3. Da Einstein das „Vorurteil“ hatte, das Universum sei statisch, führte er eine kosmologische Konstante Λ ein. Damit erhielt er eine statische Lösung, die aber nicht stabil ist.
4. Die kosmologische Konstante wird heute benutzt, um die Dunkle Energie zu beschreiben.

9. Raum, Zeit und die Entstehung unseres Universums

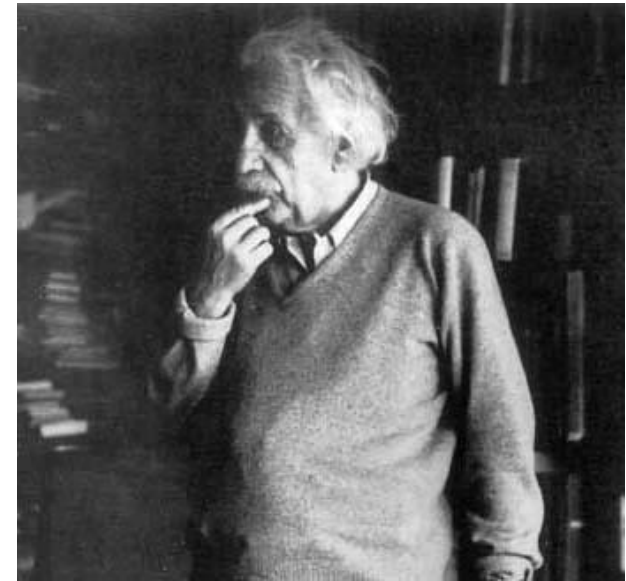
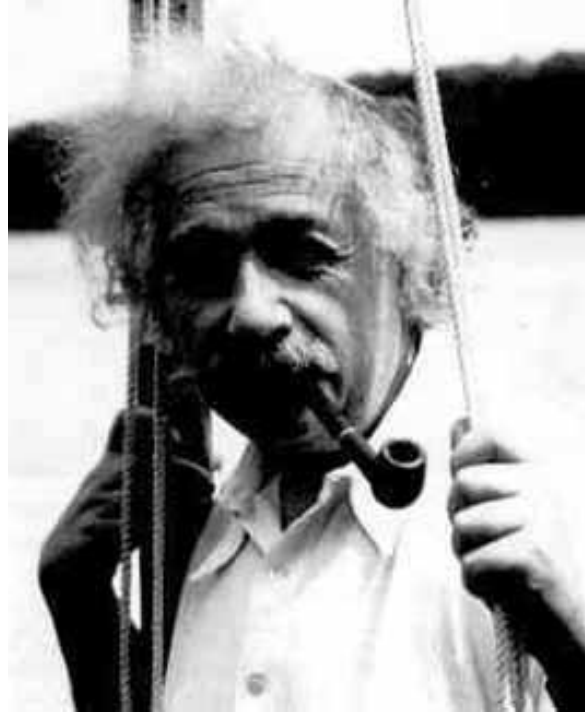
- 9.1 Vorstellungen von Raum und Zeit vor Einstein
- 9.2 Das Experiment von Michelson und Morley
- 9.3 Die Spezielle Relativitätstheorie
- 9.4 Die Allgemeine Relativitätstheorie
- 9.5 Einsteins Kosmologie
- 9.6 **Albert Einstein**
- 9.7 Lemaître's Hypothese vom Urknall
- 9.8 Die Vermessung des Weltalls
- 9.9 Das Hubblesche Gesetz
- 9.10 Edwin Hubble
- 9.11 Die kosmische Hintergrundstrahlung

3. Zur Elektrodynamik bewegter Körper; von A. Einstein.

Daß die Elektrodynamik Maxwells — wie dieselbe gegenwärtig aufgefaßt zu werden pflegt — in ihrer Anwendung auf bewegte Körper zu Asymmetrien führt, welche den Phänomenen nicht anzuhäufen scheinen, ist bekannt. Man denke z. B. an die elektrodynamische Wechselwirkung zwischen einem Magneten und einem Leiter. Das beobachtbare Phänomen hängt hier nur ab von der Relativbewegung von Leiter und Magnet, während nach der üblichen Auffassung die beiden Fälle, daß der eine oder der andere dieser Körper der bewegte sei, streng voneinander zu trennen sind. Bewegt sich nämlich der Magnet und ruht der Leiter, so entsteht in der Umgebung des Magneten ein elektrisches Feld von gewissem Energiewerte, welches an den Orten, wo sich Teile des Leiters befinden, einen Strom erzeugt. Ruht aber der Magnet und bewegt sich der Leiter, so entsteht in der Umgebung des Magneten kein elektrisches Feld, dagegen im Leiter eine elektromotorische Kraft, welcher an sich keine Energie entspricht, die aber — Gleichheit der Relativbewegung bei den beiden ins Auge gefaßten Fällen vorausgesetzt — zu elektrischen Strömen von derselben Größe und demselben Verlaufe Veranlassung gibt, wie im ersten Falle die elektrischen Kräfte.

Beispiele ähnlicher Art, sowie die mißlungenen Versuche, eine Bewegung der Erde relativ zum „Lichtmedium“ zu konstatieren, führen zu der Vermutung, daß dem Begriffe der absoluten Ruhe nicht nur in der Mechanik, sondern auch in der Elektrodynamik keine Eigenschaften der Erscheinungen entsprechen, sondern daß vielmehr für alle Koordinatensysteme, für welche die mechanischen Gleichungen gelten, auch die gleichen elektrodynamischen und optischen Gesetze gelten, wie dies für die Größen erster Ordnung bereits erwiesen ist. Wir wollen diese Vermutung (deren Inhalt im folgenden „Prinzip der Relativität“ genannt werden wird) zur Voraussetzung erheben und außerdem die mit ihm nur scheinbar unverträgliche

Albert Einstein (1879 - 1955)



Albert Einstein (1879 - 1955)



Einsteins Arbeitszimmer

- 1879 Geboren in Ulm
- 1896 Abitur in Aarau als Klassenbesten, danach Studium der Mathematik und Physik am Züricher Polytechnikum (heute ETH)
- 1902 Anstellung im Patentamt Bern
- 1905 „Wunderjahr“: Lichtquantenhypothese und Spezielle Relativitätstheorie
- 1911 Ordinarius in Prag, danach an der ETH
- 1914 Mitglied der preußischen Akademie der Wissenschaften in Berlin
- 1915 Allgemeine Relativitätstheorie, die vier Jahre später bestätigt wurde
- 1922 Nobelpreis für Physik
- 1933 Emigration in die USA
- 1939 Brief an Präsident Roosevelt über die Gefahr einer deutschen Atombombe
- 1955 Tod in Princeton

9. Raum, Zeit und die Entstehung unseres Universums

- 9.1 Vorstellungen von Raum und Zeit vor Einstein
- 9.2 Das Experiment von Michelson und Morley
- 9.3 Die Spezielle Relativitätstheorie
- 9.4 Die Allgemeine Relativitätstheorie
- 9.5 Einsteins Kosmologie
- 9.6 Albert Einstein
- 9.7 Lemaître's Hypothese vom Urknall
- 9.8 Die Vermessung des Weltalls
- 9.9 Das Hubblesche Gesetz
- 9.10 Edwin Hubble
- 9.11 Die kosmische Hintergrundstrahlung

3. Zur Elektrodynamik bewegter Körper; von A. Einstein.

Daß die Elektrodynamik Maxwells — wie dieselbe gegenwärtig aufgefaßt zu werden pflegt — in ihrer Anwendung auf bewegte Körper zu Asymmetrien führt, welche den Phänomenen nicht anzuhäufen scheinen, ist bekannt. Man denke z. B. an die elektrodynamische Wechselwirkung zwischen einem Magneten und einem Leiter. Das beobachtbare Phänomen hängt hier nur ab von der Relativbewegung von Leiter und Magnet, während nach der üblichen Auffassung die beiden Fälle, daß der eine oder der andere dieser Körper der bewegte sei, streng voneinander zu trennen sind. Bewegt sich nämlich der Magnet und ruht der Leiter, so entsteht in der Umgebung des Magneten ein elektrisches Feld von gewissem Energiewerte, welches an den Orten, wo sich Teile des Leiters befinden, einen Strom erzeugt. Ruht aber der Magnet und bewegt sich der Leiter, so entsteht in der Umgebung des Magneten kein elektrisches Feld, dagegen im Leiter eine elektromotorische Kraft, welcher an sich keine Energie entspricht, die aber — Gleichheit der Relativbewegung bei den beiden ins Auge gefaßten Fällen vorausgesetzt — zu elektrischen Strömen von derselben Größe und demselben Verlaufe Veranlassung gibt, wie im ersten Falle die elektrischen Kräfte.

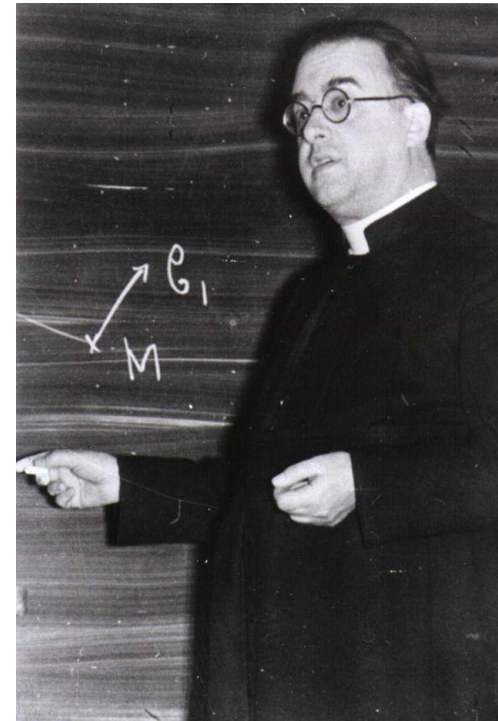
Beispiele ähnlicher Art, sowie die mißlungenen Versuche, eine Bewegung der Erde relativ zum „Lichtmedium“ zu konstatieren, führen zu der Vermutung, daß dem Begriffe der absoluten Ruhe nicht nur in der Mechanik, sondern auch in der Elektrodynamik keine Eigenschaften der Erscheinungen entsprechen, sondern daß vielmehr für alle Koordinatensysteme, für welche die mechanischen Gleichungen gelten, auch die gleichen elektrodynamischen und optischen Gesetze gelten, wie dies für die Größen erster Ordnung bereits erwiesen ist. Wir wollen diese Vermutung (deren Inhalt im folgenden „Prinzip der Relativität“ genannt werden wird) zur Voraussetzung erheben und außerdem die mit ihm nur scheinbar unverträgliche

Die Idee von einem expandierenden Universum -
vorgeschlagen aufgrund von Lösungen der ART:
1922 von Friedmann und 1927 unabhängig von Lemaître



A. Friedmann

Alexander Friedmann
1888 - 1925



George Lemaître
1894 - 1966

Friedmann-Lemaître-Gleichungen für ein expandierendes Universum

Friedmann Metrik mit dem Skalen-Faktor $a(t)$ und dem Krümmungsparameter k :

$$-c^2 d\tau^2 = -c^2 dt^2 + a(t)^2 d\Sigma^2$$
$$d\Sigma^2 = \frac{dr^2}{1 - kr^2} + r^2 d\Omega^2, \quad \text{where } d\Omega^2 = d\theta^2 + \sin^2 \theta d\phi^2.$$

$k = 0$: flaches Universum

$k = 1$: „spärisches“, geschlossenes Universum

$k = -1$: hyperbolisches, offenes Universum

Friedmann-Lemaître Gleichungen für die zeitliche Entwicklung des Skalenfaktors $a(t)$.

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 + \frac{kc^2}{a^2} - \frac{\Lambda c^2}{3} = \frac{8\pi G}{3}\rho$$

$$2\frac{\ddot{a}}{a} + \left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 + \frac{kc^2}{a^2} - \Lambda c^2 = -\frac{8\pi G}{c^2}p.$$

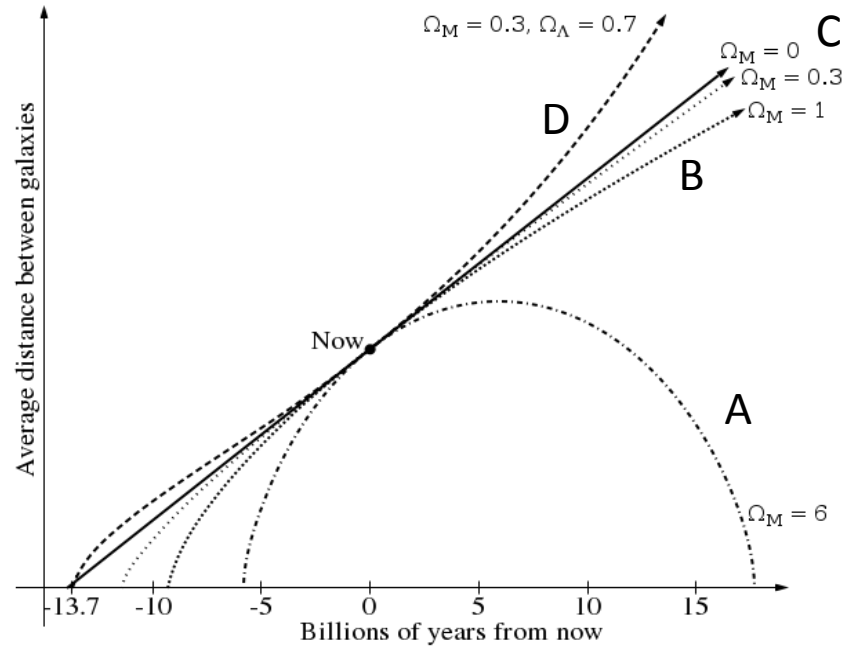
Hubble Konstante $H(t) = (da/dt) / a$

Hubbles Gesetz: $v = H r$

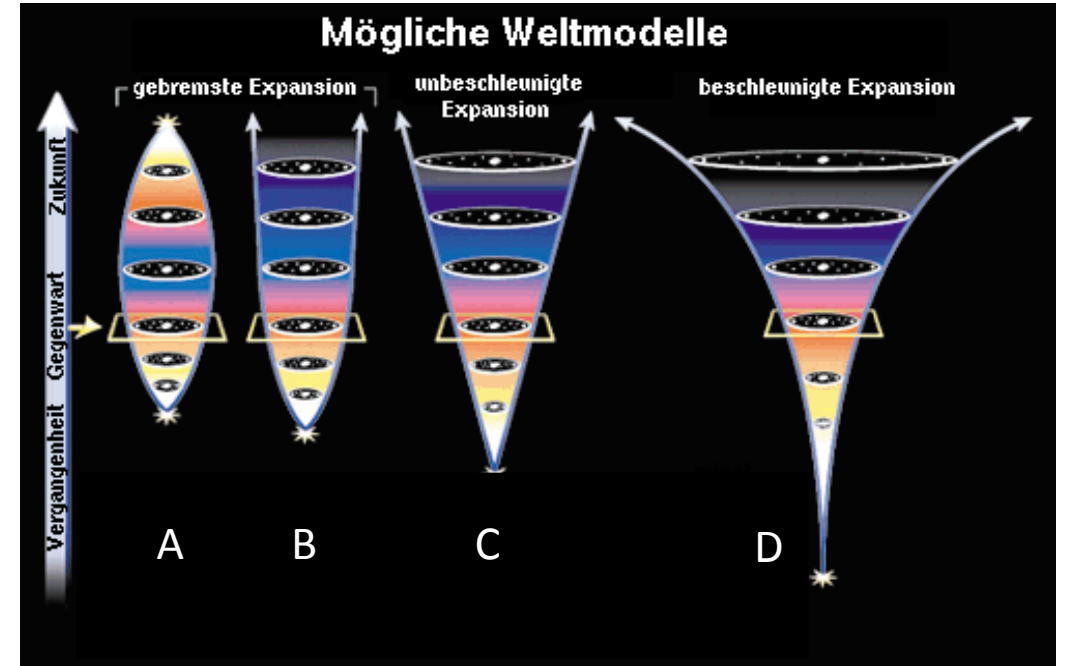
Hierbei bezeichnen ρ die Massendichte, p den Druck, a den Skalenfaktor, G die Gravitationskonstante und Λ die Einsteinsche kosmologische Konstante.

$R(t) = a(t) \cdot R_0$, worin R und R_0 die Abstände zweier Galaxien zu verschiedenen Zeiten angeben.

Die Expansion des Universums in verschiedenen Szenarien



Die Werte von Ω_M und Ω_Λ beziehen sich auf die relativen Anteile von Materie und dunkler Energie.



Lemaître's Beiträge zur Kosmologie

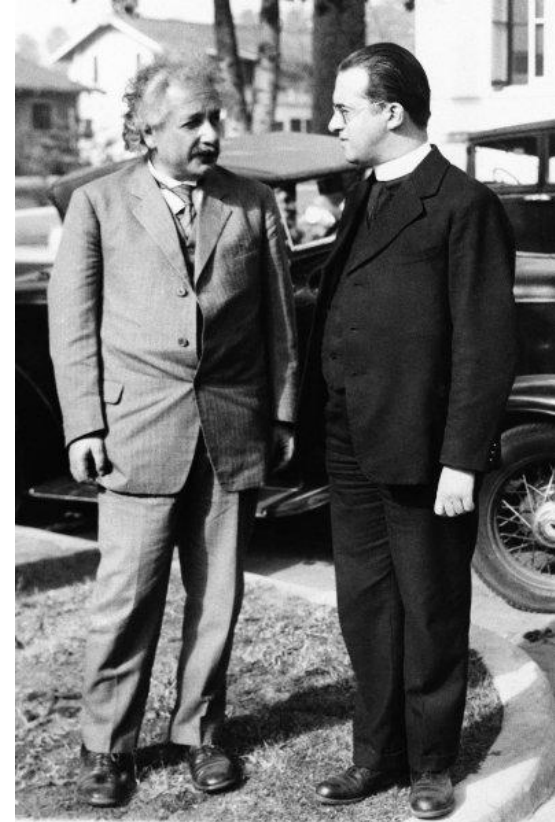
1. Gedanke eines „Uratoms“ als Beginn eines expandierenden Universums
2. Voraussage dass die Himmelskörper von einander wegstreben nach dem Gesetz $v = H \cdot r$

Einstein zu Lemaître :

1927 : "Ihre Berechnungen sind richtig, aber Ihre Physik scheußlich."

[1929 entdeckt Hubble die Galaxienflucht und bestätigt Lemaître's Voraussage]

1933 "Das ist die wundervollste und befriedigendste Erklärung der Entstehung der Welt, die ich je gehört habe"



Georges Lemaitre (1894 – 1966)



- 1894 Geboren in Charleroi
- 1911 Studium der Ingenieurwissenschaften an der Universität zu Leuven
- 1914 Freiwilliger Kriegsdienst in der belgischen Armee
- 1918 Studium der Physik, Mathematik und Theologie, Promotion in Mathematik
- 1923 Ordination zum Priester, Beginn von Studien der Astronomie in Cambridge (GB) und Cambridge (USA), zweite Doktorarbeit in Naturwissenschaften
- 1927 Voraussage eines expandierenden Universums
- 1936 Mitglied der päpstlichen Akademie der Wissenschaften
- 1966 Gestorben in Leuven

9. Raum, Zeit und die Entstehung unseres Universums

- 9.1 Vorstellungen von Raum und Zeit vor Einstein
- 9.2 Das Experiment von Michelson und Morley
- 9.3 Die Spezielle Relativitätstheorie
- 9.4 Die Allgemeine Relativitätstheorie
- 9.5 Einsteins Kosmologie
- 9.6 Albert Einstein
- 9.7 Lemaître's Hypothese vom Urknall
- 9.8 Die Vermessung des Weltalls**
- 9.9 Das Hubblesche Gesetz
- 9.10 Edwin Hubble
- 9.11 Die kosmische Hintergrundstrahlung

3. Zur Elektrodynamik bewegter Körper; von A. Einstein.

Daß die Elektrodynamik Maxwells — wie dieselbe gegenwärtig aufgefaßt zu werden pflegt — in ihrer Anwendung auf bewegte Körper zu Asymmetrien führt, welche den Phänomenen nicht anzuhäufen scheinen, ist bekannt. Man denke z. B. an die elektrodynamische Wechselwirkung zwischen einem Magneten und einem Leiter. Das beobachtbare Phänomen hängt hier nur ab von der Relativbewegung von Leiter und Magnet, während nach der üblichen Auffassung die beiden Fälle, daß der eine oder der andere dieser Körper der bewegte sei, streng voneinander zu trennen sind. Bewegt sich nämlich der Magnet und ruht der Leiter, so entsteht in der Umgebung des Magneten ein elektrisches Feld von gewissem Energiewerte, welches an den Orten, wo sich Teile des Leiters befinden, einen Strom erzeugt. Ruht aber der Magnet und bewegt sich der Leiter, so entsteht in der Umgebung des Magneten kein elektrisches Feld, dagegen im Leiter eine elektromotorische Kraft, welcher an sich keine Energie entspricht, die aber — Gleichheit der Relativbewegung bei den beiden ins Auge gefaßten Fällen vorausgesetzt — zu elektrischen Strömen von derselben Größe und demselben Verlaufe Veranlassung gibt, wie im ersten Falle die elektrischen Kräfte.

Beispiele ähnlicher Art, sowie die mißlungenen Versuche, eine Bewegung der Erde relativ zum „Lichtmedium“ zu konstatieren, führen zu der Vermutung, daß dem Begriffe der absoluten Ruhe nicht nur in der Mechanik, sondern auch in der Elektrodynamik keine Eigenschaften der Erscheinungen entsprechen, sondern daß vielmehr für alle Koordinatensysteme, für welche die mechanischen Gleichungen gelten, auch die gleichen elektrodynamischen und optischen Gesetze gelten, wie dies für die Größen erster Ordnung bereits erwiesen ist. Wir wollen diese Vermutung (deren Inhalt im folgenden „Prinzip der Relativität“ genannt werden wird) zur Voraussetzung erheben und außerdem die mit ihm nur scheinbar unverträgliche

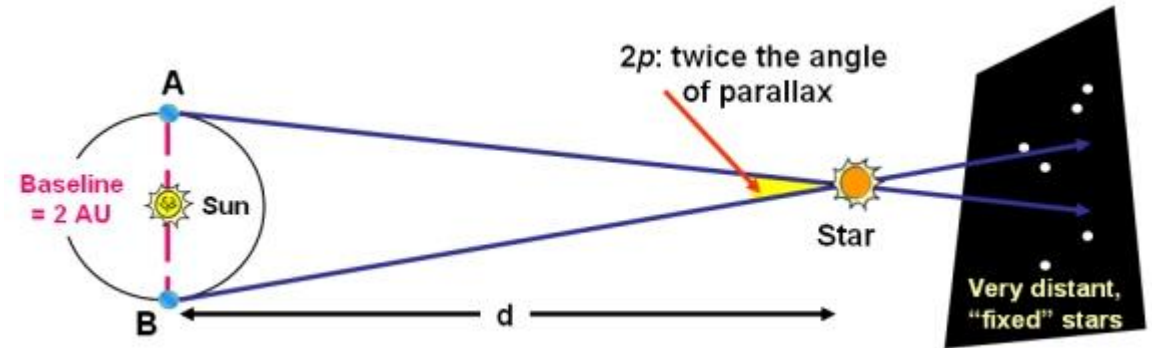
Methoden zur Entfernungsbestimmung von Himmelskörpern:

- Messung trigonometrische Parallaxen
- Bestimmung von Helligkeiten und Leuchtkräften
- Geschwindigkeitsmessungen aus Rotverschiebungen von Spektrallinien



Trigonometrische Fixsternparallaxen

Erste Messung:
1838 In Königsberg durch
Friedrich Wilhelm Bessel
(1784 -1846)



Definition der Entfernungseinheit Parsec (Parallaxensekunde, pc)

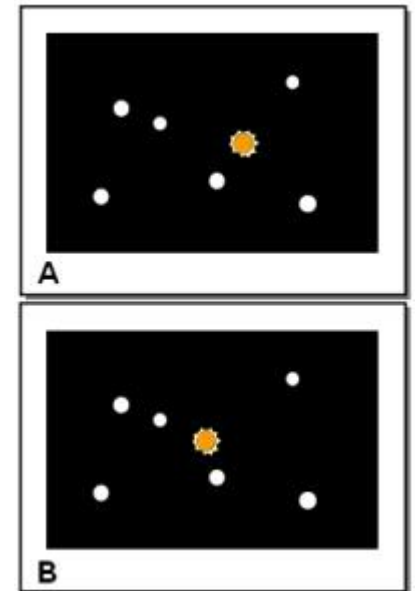
1 Parsec = 1 pc = Entfernung, aus der der Erdbahnradius unter einem Winkel von 1 Bogensekunde erscheint

1 pc = 3,26 Lichtjahre $\approx 3 \cdot 10^{13}$ km

Es gilt: $\sin \pi = \pi = 1 \text{ AE}/r \rightarrow r = 1 \text{ AE}/\pi$ und **$r = 1 \text{ pc } 1''/\pi$**

Moderne Messungen mit Satteliten:

Hipparchos:	1989 -1993	120.000 Sterne	Genauigkeit: 0,002''
GAIA-Mission:	ab 2010	200 10^6 Sterne	Genauigkeit: 0,000001''



Entfernungsbestimmung durch Helligkeitsmessungen

Wissenswertes zu Sternhelligkeiten:

Leuchtkraft L: gesamte Strahlungsleistung des Stern, die von der Oberfläche und der Temperatur an der Oberfläche abhängt.

Intensität I: auf der Erdoberfläche empfangene Strahlungsleistung pro Flächeneinheit.

$$I = L / (4 \cdot \pi \cdot r^2), \quad r: \text{Entfernung Stern - Erde}$$

Einteilung der Sternhelligkeiten in Größenklassen (magnitudines m):

1. Scheinbare Helligkeiten

Bereits Hipparch teilte die sichtbaren Sterne in 6 Größenklassen ein, die hellsten in Klasse 1, die schwächsten in Klasse 6.

Weber-Fechnersches Gesetz: die menschliche Empfindung ist proportional zum Logarithmus des Reizes, d.h.

$$m = c \cdot \lg(I)$$

Damit ergibt sich für die (empfundenen) scheinbaren Helligkeitsdifferenzen zweier Sterne.

$$m_1 - m_2 = c \lg(I_1/I_2)$$

Die Konstante c wurde 1850 von dem englischen Astronomen Norman Pogson (1829 – 1891) zu -2,5 festgelegt, um einen guten Anschluss an die aus der Antike überlieferten Sternhelligkeiten zu erhalten.

$$m_1 - m_2 = -2,5 \lg(I_1/I_2) \quad \text{bzw.} \quad I_1/I_2 = 10^{-0,4(m_1 - m_2)}$$

- Zwei Sterne, deren Intensitäten sich wie 10:1 verhalten, haben einen Größenklassenunterschied von 2,5.
- Je kleiner die Größenklasse, desto heller der Stern.

2. Absolute Helligkeiten

Um die Leuchtkräfte zweier Sterne vergleichen zu können, setzt man sie gedanklich in die gleiche Entfernung zur Erde, und zwar in die Entfernung $r = 10$ pc. Die Helligkeit, die ein Stern in dieser Entfernung hat, bezeichnet man als absolute Helligkeit M . Sie wird ebenfalls in Größenklassen angegeben.

Mit Hilfe der beiden Beziehungen:

$$I = L/(4 \cdot \pi \cdot r^2) \quad (1)$$

$$m_1 - m_2 = c \lg(I_1/I_2) \quad (2)$$

erhält man für einen Stern, der einmal aus der Entfernung r und zum zweiten aus $r = 10$ pc leuchtet.

$$m - M = -2,5 \cdot 2 \cdot (\lg(10) - \lg r) \text{ oder}$$

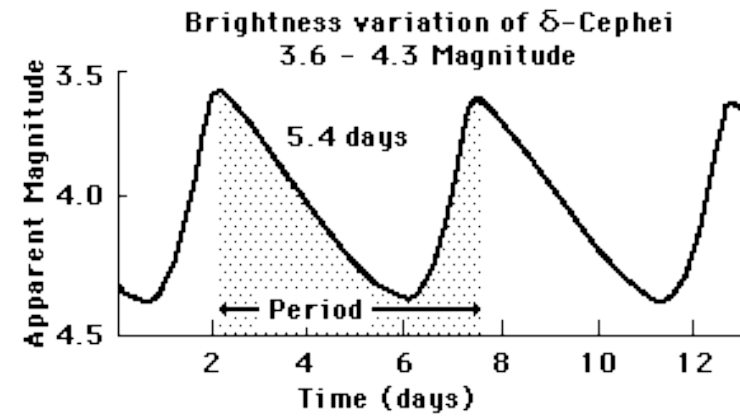
$$\mathbf{m - M = 5 \lg r - 5} \quad (3)$$

Kennt man m und M , so kann man mit Hilfe von (3) die Entfernung r des Sterns bestimmen.

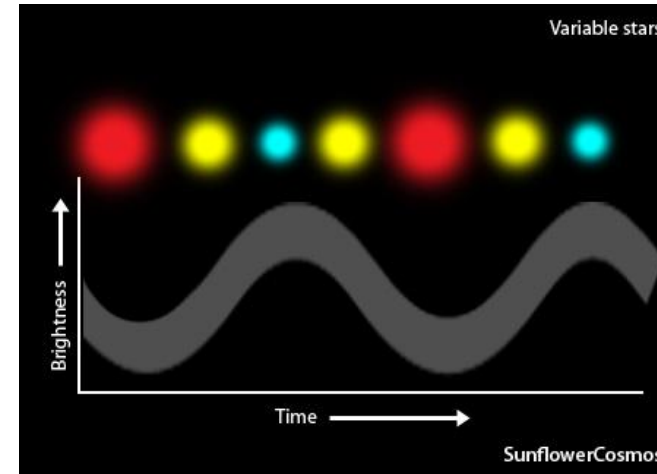
Perioden-Leuchtkraft-Beziehung von Cepheiden (1912)



Henrietta Leavitt (1868 – 1922)



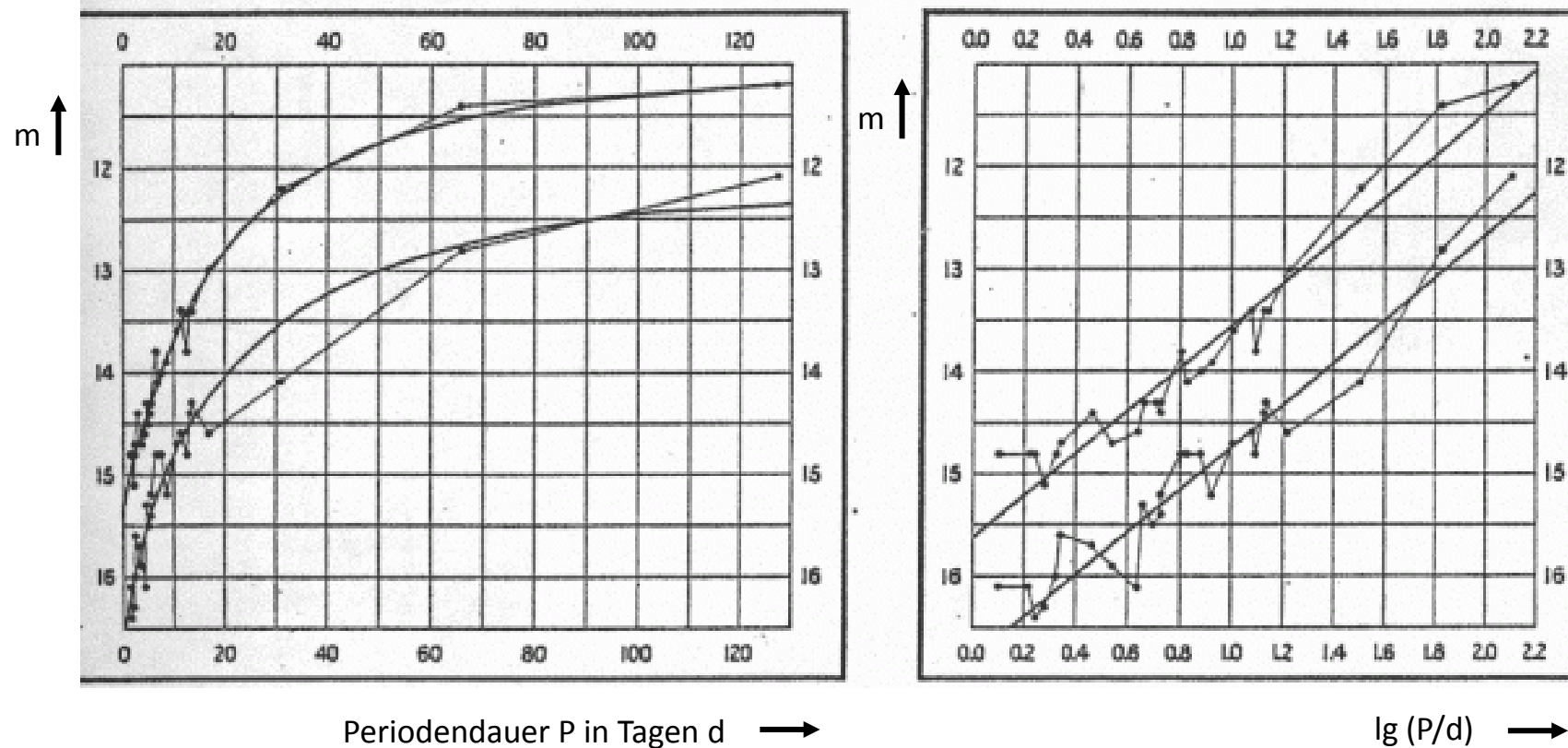
Kleine Magellansche Wolke (SMC)



Perioden-Leuchtkraft Beziehung bei Cepheiden

Originaldaten von Henrietta Leavitt aus dem Jahre 1912

m



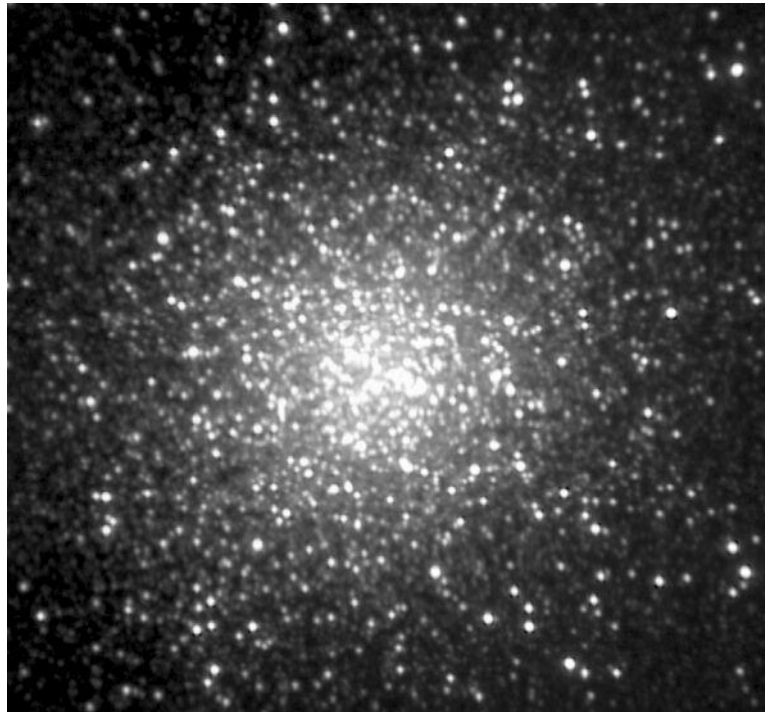
Perioden-Leuchtkraft-Beziehung von Cepheiden in der kleinen Magellanschen Wolke für das Helligkeitsmaximum und -minimum. Man erhält zwei Geraden, also eine lineare Beziehung, wenn die scheinbare Helligkeit m (in Größenklassen) gegen den Logarithmus der Periodendauer P aufgetragen wird.

Ergebnis: $m = a \lg (P) + b$ bzw. $M = a \lg (P) + b^*$

Harlow Shapleys Kalibrierung der Perioden-Leuchtkraft Beziehung durch Beobachtung von Kugelsternhaufen



Harlow Shapley (1885 – 1972)



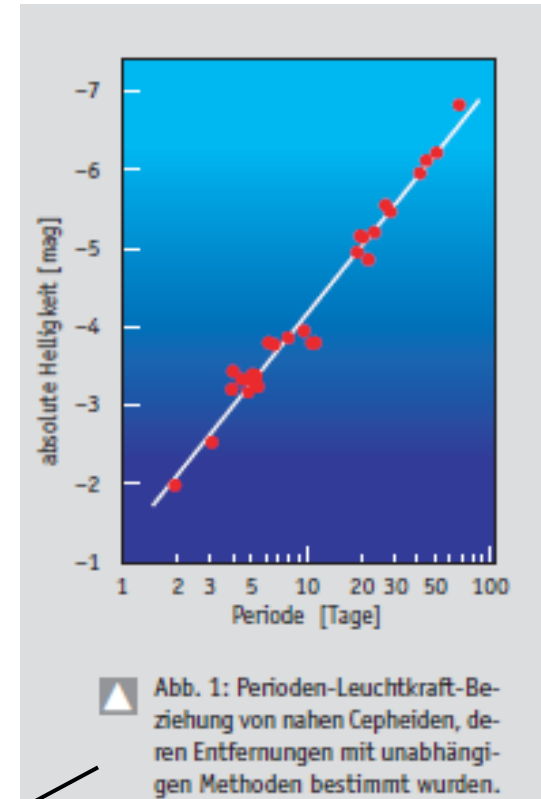
M 13



M 53

Hertzsprung-Russell-Diagramm (HRD):
Ejnar Hertzsprung (1873 – 1967)
Henry Noris Russell (1877 – 1957)

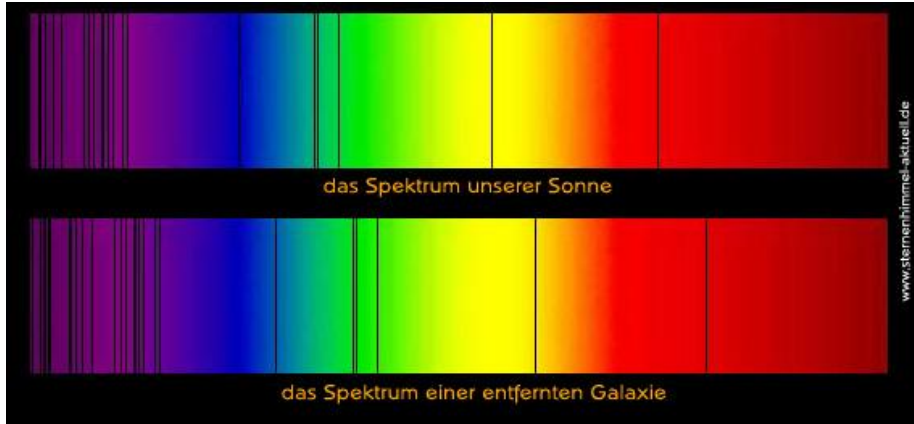
Vergleich der HRD von Kugelsternhaufen
und Sternen aus der Sonnenumgebung



Rotverschiebung von Linien
 bei verschiedenen astronomischen Objekten,
 zuerst beobachtet 1912 von Vesto Slipher



Vesto Melvin Slipher
 (1875 – 1969)



Oben: Spektrum unserer Sonne
 Unten: So sähe das Spektrum aus, wenn unsere Sonne sich in einer fernen Galaxie befände

Rotverschiebungen der H und K-Linie verschiedener Galaxien.
 Aus der Größe der Rotverschiebung kann man auf Grund des Dopplereffekts auf die jeweilige Geschwindigkeit schließen

Kosmisches
 Objekt
 im Sternbild

Die Pfeilspitzen deuten jeweils auf die
 rotverschobenen K und H Linien.
 v ist die Entfernungsgeschwindigkeit
 des Objekts

Virgo

$v = 1150 \text{ km/s}$



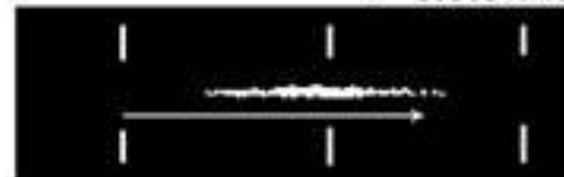
Corona Borealis

$v = 21600 \text{ km/s}$

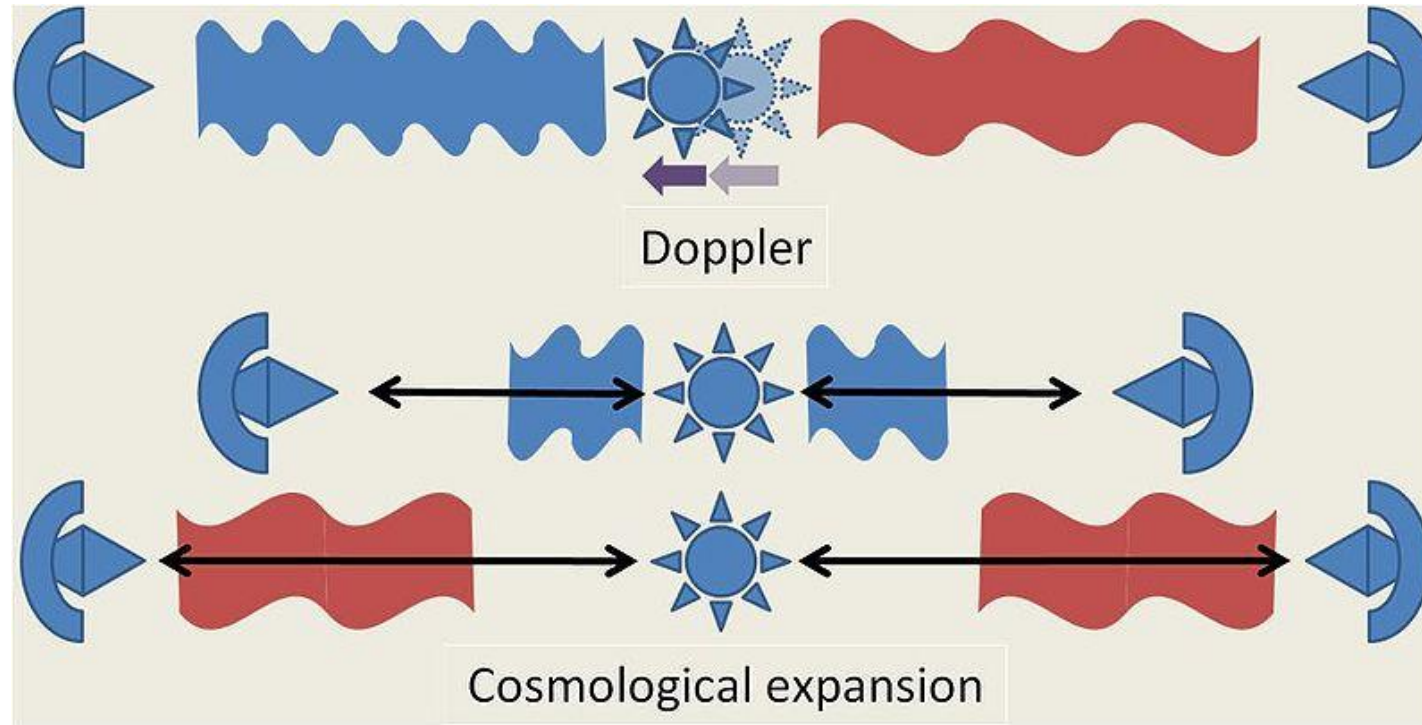


Hydra

$v = 60600 \text{ km/s}$



Verschiedene Ursachen der Rot- bzw. Violettverschiebung



Die große Debatte

Die Diskussion zwischen den Astronomen Harlow Shapley und Heber Curtis fand am 26. April 1920 im National Museum of Natural History in Washington statt.

Sie kreiste um die Größe unserer Milchstraße und die Frage, ob die damals als *Spiralnebel* bekannten Galaxien kleine Objekte in unserer Milchstraße oder sehr viel weiter entfernt und von der Milchstraße getrennt sind.

Entscheidung 1924 durch die Messung der Entfernung des Andromeda Nebels durch Edwin Hubble (mit Hilfe von δ -Cephei-Sternen)

9. Raum, Zeit und die Entstehung unseres Universums

- 9.1 Vorstellungen von Raum und Zeit vor Einstein
- 9.2 Das Experiment von Michelson und Morley
- 9.3 Die Spezielle Relativitätstheorie
- 9.4 Die Allgemeine Relativitätstheorie
- 9.5 Einsteins Kosmologie
- 9.6 Albert Einstein
- 9.7 Lemaître's Hypothese vom Urknall
- 9.8 Die Vermessung des Weltalls
- 9.9 **Das Hubblesche Gesetz**
- 9.10 Edwin Hubble
- 9.11 Die kosmische Hintergrundstrahlung

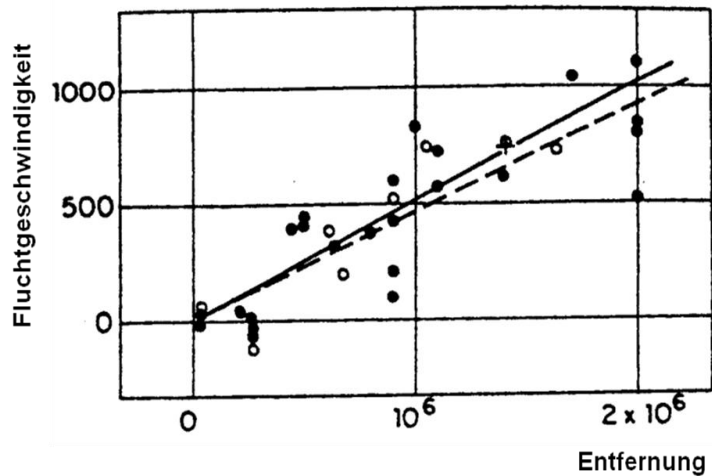
3. Zur Elektrodynamik bewegter Körper; von A. Einstein.

Daß die Elektrodynamik Maxwells — wie dieselbe gegenwärtig aufgefaßt zu werden pflegt — in ihrer Anwendung auf bewegte Körper zu Asymmetrien führt, welche den Phänomenen nicht anzuhäufen scheinen, ist bekannt. Man denke z. B. an die elektrodynamische Wechselwirkung zwischen einem Magneten und einem Leiter. Das beobachtbare Phänomen hängt hier nur ab von der Relativbewegung von Leiter und Magnet, während nach der üblichen Auffassung die beiden Fälle, daß der eine oder der andere dieser Körper der bewegte sei, streng voneinander zu trennen sind. Bewegt sich nämlich der Magnet und ruht der Leiter, so entsteht in der Umgebung des Magneten ein elektrisches Feld von gewissem Energiewerte, welches an den Orten, wo sich Teile des Leiters befinden, einen Strom erzeugt. Ruht aber der Magnet und bewegt sich der Leiter, so entsteht in der Umgebung des Magneten kein elektrisches Feld, dagegen im Leiter eine elektromotorische Kraft, welcher an sich keine Energie entspricht, die aber — Gleichheit der Relativbewegung bei den beiden ins Auge gefaßten Fällen vorausgesetzt — zu elektrischen Strömen von derselben Größe und demselben Verlaufe Veranlassung gibt, wie im ersten Falle die elektrischen Kräfte.

Beispiele ähnlicher Art, sowie die mißlungenen Versuche, eine Bewegung der Erde relativ zum „Lichtmedium“ zu konstatieren, führen zu der Vermutung, daß dem Begriffe der absoluten Ruhe nicht nur in der Mechanik, sondern auch in der Elektrodynamik keine Eigenschaften der Erscheinungen entsprechen, sondern daß vielmehr für alle Koordinatensysteme, für welche die mechanischen Gleichungen gelten, auch die gleichen elektrodynamischen und optischen Gesetze gelten, wie dies für die Größen erster Ordnung bereits erwiesen ist. Wir wollen diese Vermutung (deren Inhalt im folgenden „Prinzip der Relativität“ genannt werden wird) zur Voraussetzung erheben und außerdem die mit ihm nur scheinbar unverträgliche

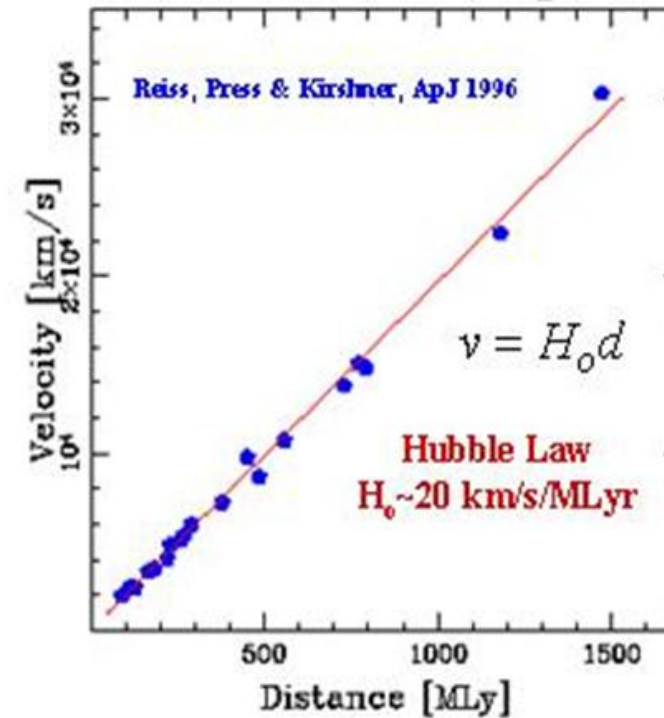
Hubble Diagramme

Hubbles Originaldiagramm,
aus Messungen an Cepheiden

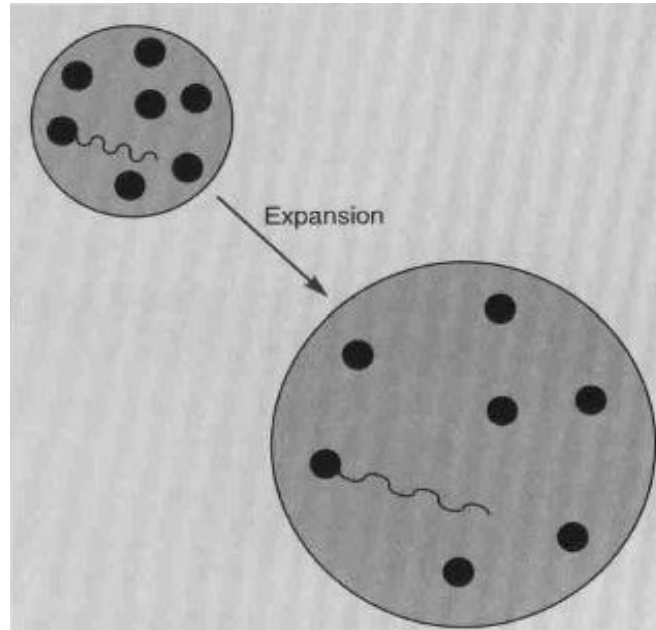


Die Geschwindigkeiten sind in km/s, die
Entfernungen in Parsec angegeben.
(1 Parsec = 3,26 Lichtjahre, die äußersten Punkte
haben eine Entfernung von 6,5 Mly.)

Moderne Messungen an Supernovae



Modell für ein expandierendes Universum



Die schwarzen Punkte stellen Galaxien dar. Während ihre Größe gleich bleibt, wachsen ihre Abstände. Mit eingezeichnet ist ein Wellenzug des Lichts, dessen Wellenlänge sich ebenfalls vergrößert.

9. Raum, Zeit und die Entstehung unseres Universums

- 9.1 Vorstellungen von Raum und Zeit vor Einstein
- 9.2 Das Experiment von Michelson und Morley
- 9.3 Die Spezielle Relativitätstheorie
- 9.4 Die Allgemeine Relativitätstheorie
- 9.5 Einsteins Kosmologie
- 9.6 Albert Einstein
- 9.7 Lemaître's Hypothese vom Urknall
- 9.8 Die Vermessung des Weltalls
- 9.9 Das Hubblesche Gesetz
- 9.10 **Edwin Hubble**
- 9.11 Die kosmische Hintergrundstrahlung

3. Zur Elektrodynamik bewegter Körper; von A. Einstein.

Daß die Elektrodynamik Maxwells — wie dieselbe gegenwärtig aufgefaßt zu werden pflegt — in ihrer Anwendung auf bewegte Körper zu Asymmetrien führt, welche den Phänomenen nicht anzuhängen scheinen, ist bekannt. Man denke z. B. an die elektrodynamische Wechselwirkung zwischen einem Magneten und einem Leiter. Das beobachtbare Phänomen hängt hier nur ab von der Relativbewegung von Leiter und Magnet, während nach der üblichen Auffassung die beiden Fälle, daß der eine oder der andere dieser Körper der bewegte sei, streng voneinander zu trennen sind. Bewegt sich nämlich der Magnet und ruht der Leiter, so entsteht in der Umgebung des Magneten ein elektrisches Feld von gewissem Energiewerte, welches an den Orten, wo sich Teile des Leiters befinden, einen Strom erzeugt. Ruht aber der Magnet und bewegt sich der Leiter, so entsteht in der Umgebung des Magneten kein elektrisches Feld, dagegen im Leiter eine elektromotorische Kraft, welcher an sich keine Energie entspricht, die aber — Gleichheit der Relativbewegung bei den beiden ins Auge gefaßten Fällen vorausgesetzt — zu elektrischen Strömen von derselben Größe und demselben Verlaufe Veranlassung gibt, wie im ersten Falle die elektrischen Kräfte.

Beispiele ähnlicher Art, sowie die mißlungenen Versuche, eine Bewegung der Erde relativ zum „Lichtmedium“ zu konstatieren, führen zu der Vermutung, daß dem Begriffe der absoluten Ruhe nicht nur in der Mechanik, sondern auch in der Elektrodynamik keine Eigenschaften der Erscheinungen entsprechen, sondern daß vielmehr für alle Koordinatensysteme, für welche die mechanischen Gleichungen gelten, auch die gleichen elektrodynamischen und optischen Gesetze gelten, wie dies für die Größen erster Ordnung bereits erwiesen ist. Wir wollen diese Vermutung (deren Inhalt im folgenden „Prinzip der Relativität“ genannt werden wird) zur Voraussetzung erheben und außerdem die mit ihm nur scheinbar unverträgliche

Edwin Hubble (1889 – 1953)



- 1889 Geboren in Marshfield, Missouri
- 1906 Studium der Mathematik,
Naturwissenschaften, Englisch und Latein
- 1910 Jurastudium in Oxford
- 1914 Doktorarbeit in Astronomie an der Universität
von Chicago
- 1919 Arbeit am Observatorium auf dem Mount
Wilson
- 1929 Hubblesches Gesetz
- 1953 Gestorben in San Marino, Kalifornien

9. Raum, Zeit und die Entstehung unseres Universums

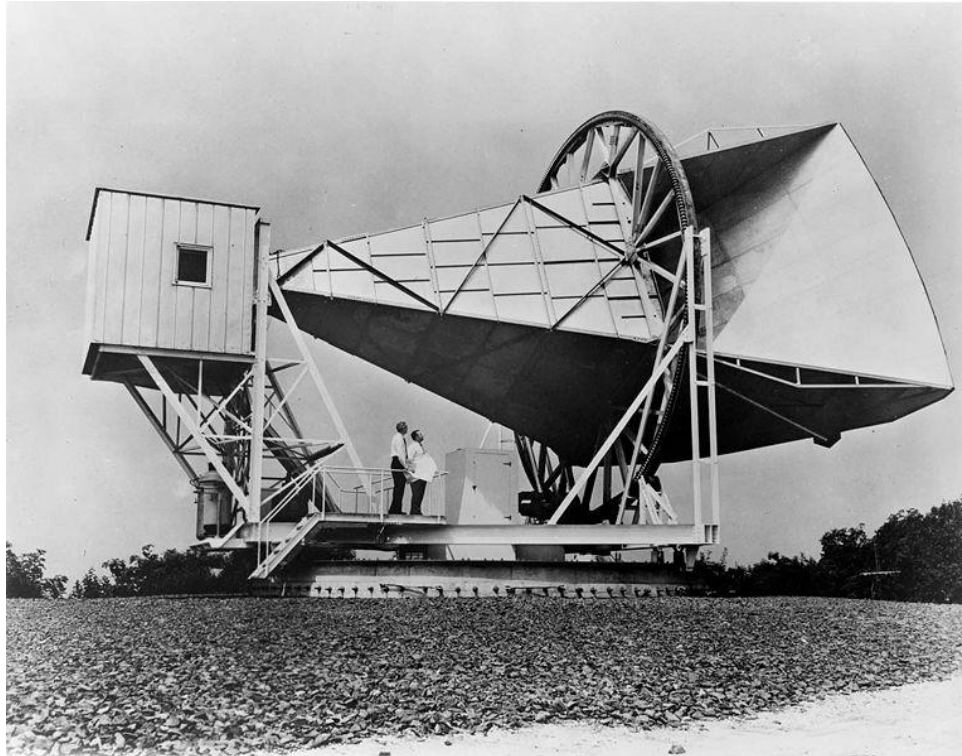
- 9.1 Vorstellungen von Raum und Zeit vor Einstein
- 9.2 Das Experiment von Michelson und Morley
- 9.3 Die Spezielle Relativitätstheorie
- 9.4 Die Allgemeine Relativitätstheorie
- 9.5 Einsteins Kosmologie
- 9.6 Albert Einstein
- 9.7 Lemaître's Hypothese vom Urknall
- 9.8 Die Vermessung des Weltalls
- 9.9 Das Hubblesche Gesetz
- 9.10 Edwin Hubble
- 9.11 Die kosmische Hintergrundstrahlung

3. Zur Elektrodynamik bewegter Körper; von A. Einstein.

Daß die Elektrodynamik Maxwells — wie dieselbe gegenwärtig aufgefaßt zu werden pflegt — in ihrer Anwendung auf bewegte Körper zu Asymmetrien führt, welche den Phänomenen nicht anzuhäufen scheinen, ist bekannt. Man denke z. B. an die elektrodynamische Wechselwirkung zwischen einem Magneten und einem Leiter. Das beobachtbare Phänomen hängt hier nur ab von der Relativbewegung von Leiter und Magnet, während nach der üblichen Auffassung die beiden Fälle, daß der eine oder der andere dieser Körper der bewegte sei, streng voneinander zu trennen sind. Bewegt sich nämlich der Magnet und ruht der Leiter, so entsteht in der Umgebung des Magneten ein elektrisches Feld von gewissem Energiewerte, welches an den Orten, wo sich Teile des Leiters befinden, einen Strom erzeugt. Ruht aber der Magnet und bewegt sich der Leiter, so entsteht in der Umgebung des Magneten kein elektrisches Feld, dagegen im Leiter eine elektromotorische Kraft, welcher an sich keine Energie entspricht, die aber — Gleichheit der Relativbewegung bei den beiden ins Auge gefaßten Fällen vorausgesetzt — zu elektrischen Strömen von derselben Größe und demselben Verlaufe Veranlassung gibt, wie im ersten Falle die elektrischen Kräfte.

Beispiele ähnlicher Art, sowie die mißlungenen Versuche, eine Bewegung der Erde relativ zum „Lichtmedium“ zu konstatieren, führen zu der Vermutung, daß dem Begriffe der absoluten Ruhe nicht nur in der Mechanik, sondern auch in der Elektrodynamik keine Eigenschaften der Erscheinungen entsprechen, sondern daß vielmehr für alle Koordinatensysteme, für welche die mechanischen Gleichungen gelten, auch die gleichen elektrodynamischen und optischen Gesetze gelten, wie dies für die Größen erster Ordnung bereits erwiesen ist. Wir wollen diese Vermutung (deren Inhalt im folgenden „Prinzip der Relativität“ genannt werden wird) zur Voraussetzung erheben und außerdem die mit ihm nur scheinbar unverträgliche

Die Entdeckung der Kosmischen Hintergrundstrahlung (1965)



Hornantenne, mit der die kosmische Hintergrundstrahlung entdeckt wurde.



Rechts: Arnold Allen Penzias (* 1933) und links: Robert Woodrow Wilson (* 1936)
Physik-Nobelpreis 1978

Kosmische Hintergrundstrahlung

1948 von Gamow vorhergesagt

1965 von Penzias und Wilson zufällig entdeckt

Es handelt sich um Wärmestrahlung von 2,725 K

Sie ist das früheste Signal vom Urknall und wurde ca. 400.000 a danach, als der Kosmos durchsichtig wurde und noch eine Temperatur von 3000 K besaß, ausgesandt. Durch die Expansion des Universums ist sie um den Faktor 1100 rotverschoben.

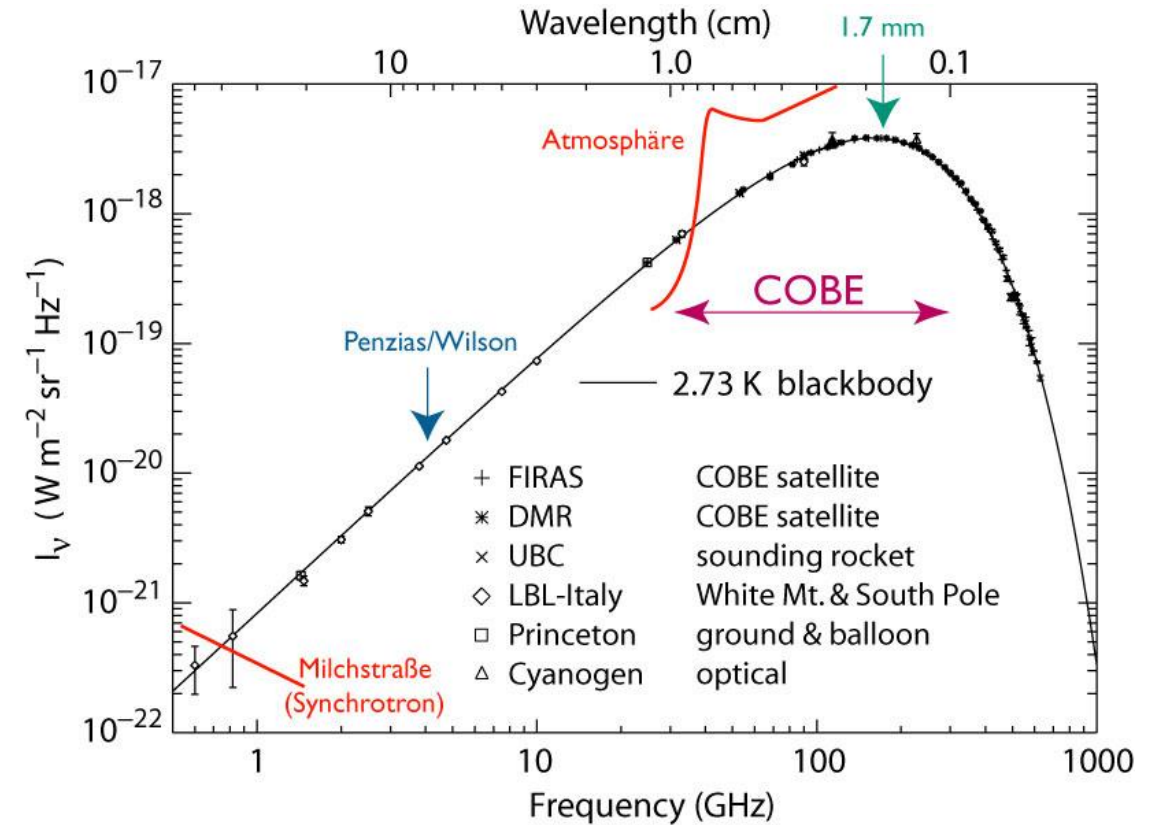
Weitere Messungen des Spektrums durch

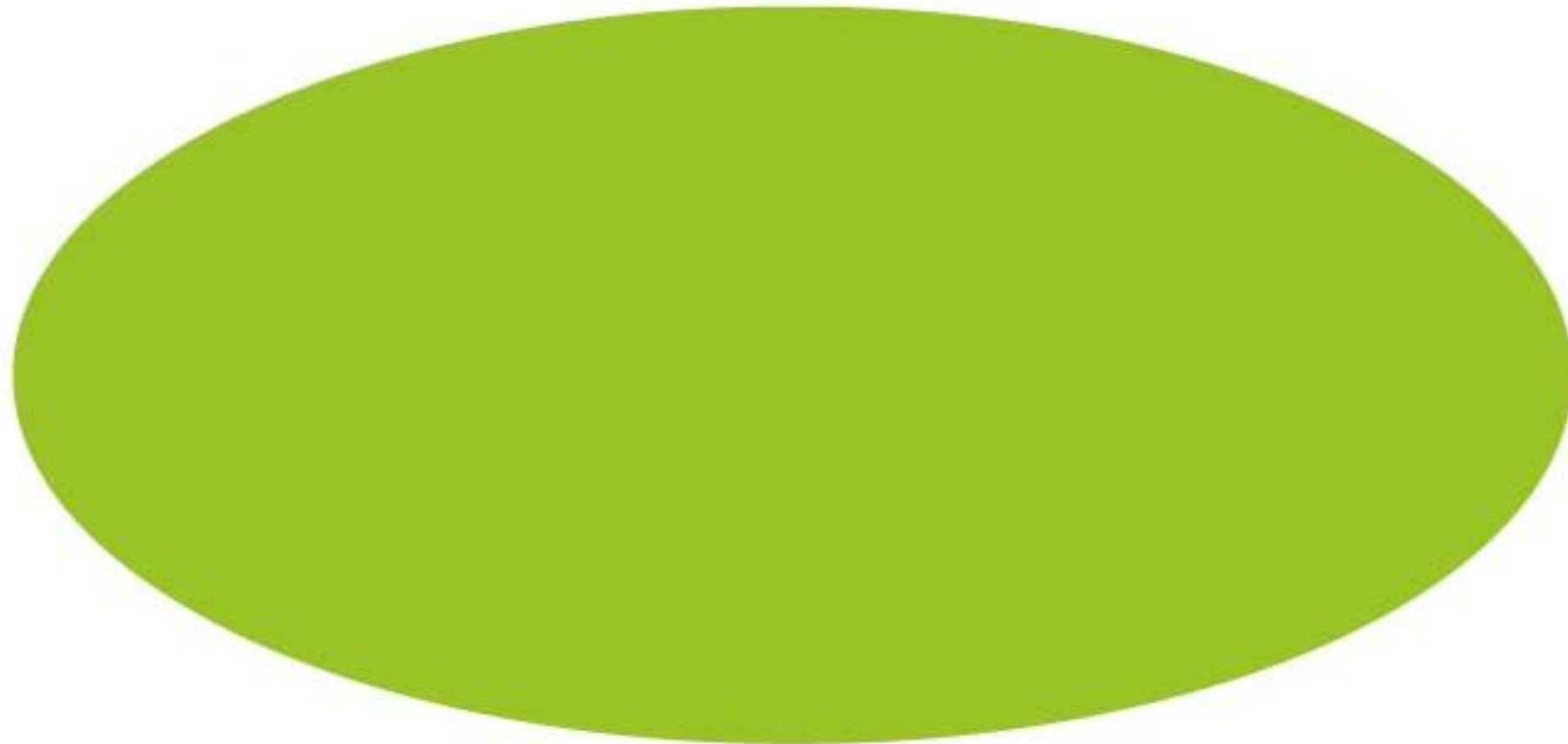
Weltraumteleskope mit wachsender räumlicher Auflösung:

COBE 1989 - 1993

WMAP 2001 - 2010

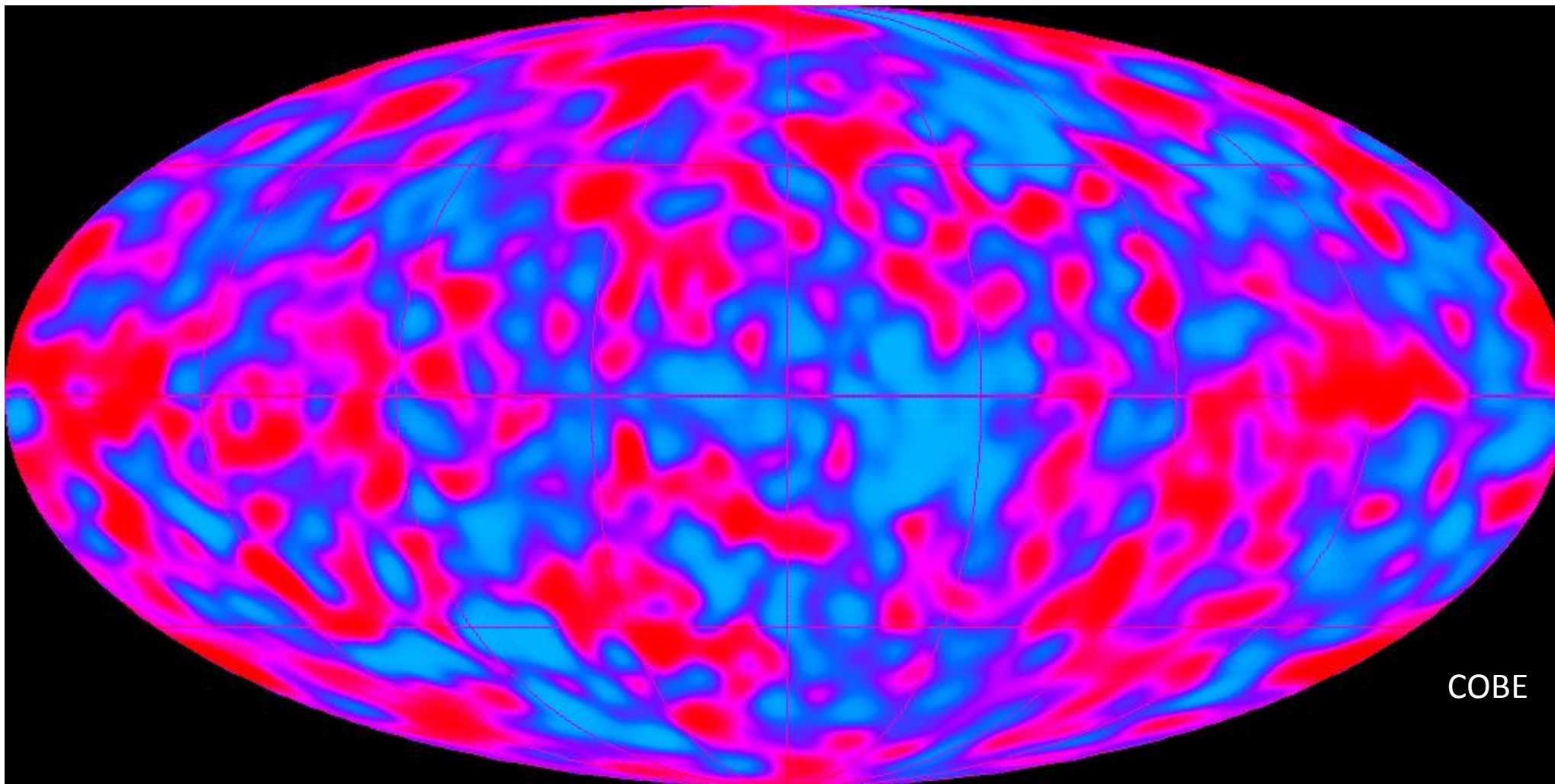
Planck 2009 - 2013



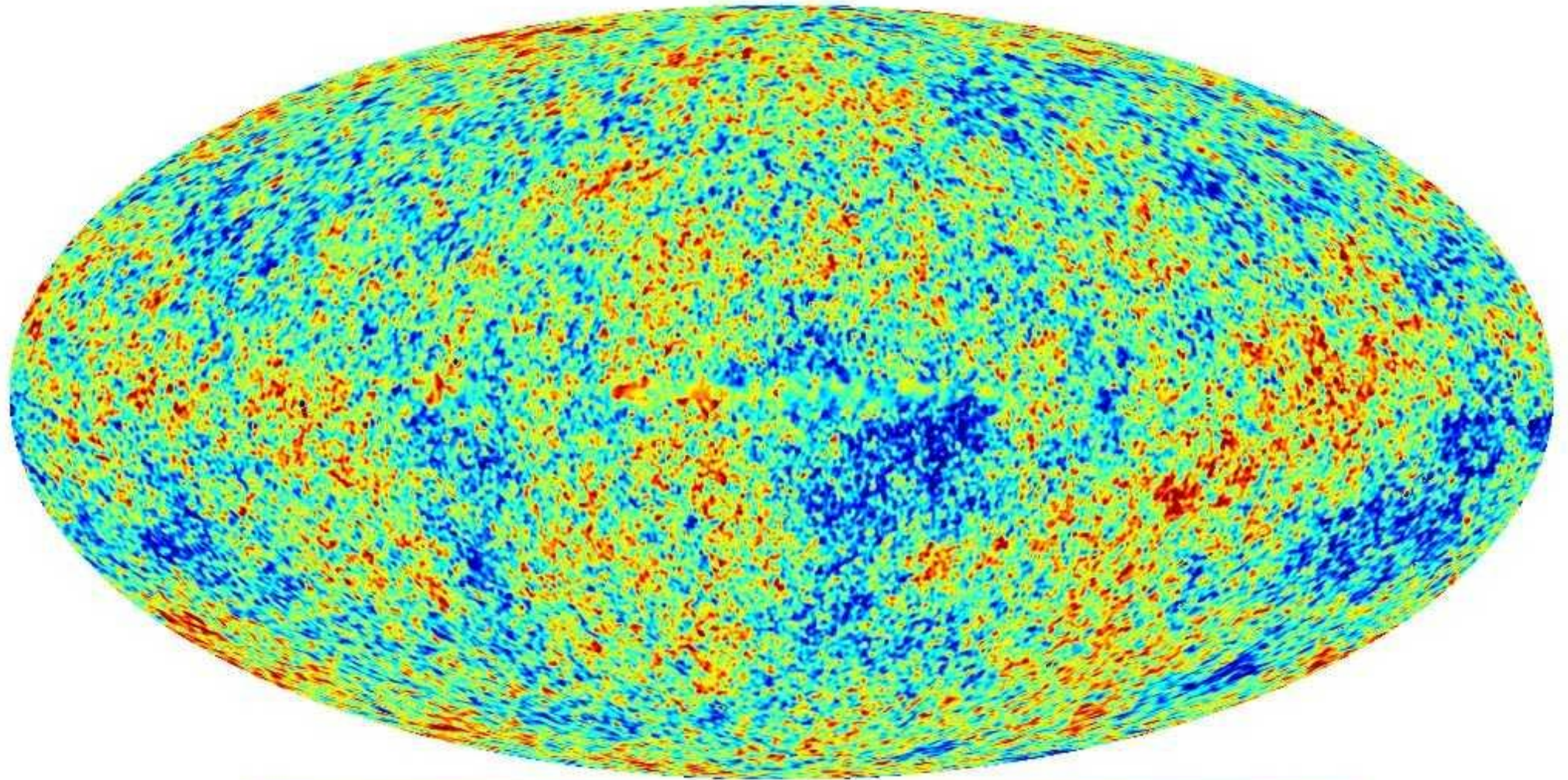


Räumliche Verteilung der Temperatur der Hintergrundstrahlung am Himmel bei grober räumlicher Auflösung

Temperaturverteilung an verschiedenen Orten der Himmelskugel (COBE)



Temperaturverteilung an verschiedenen Orten der Himmelskugel (WMAP)



-200 μ K  200 μ K