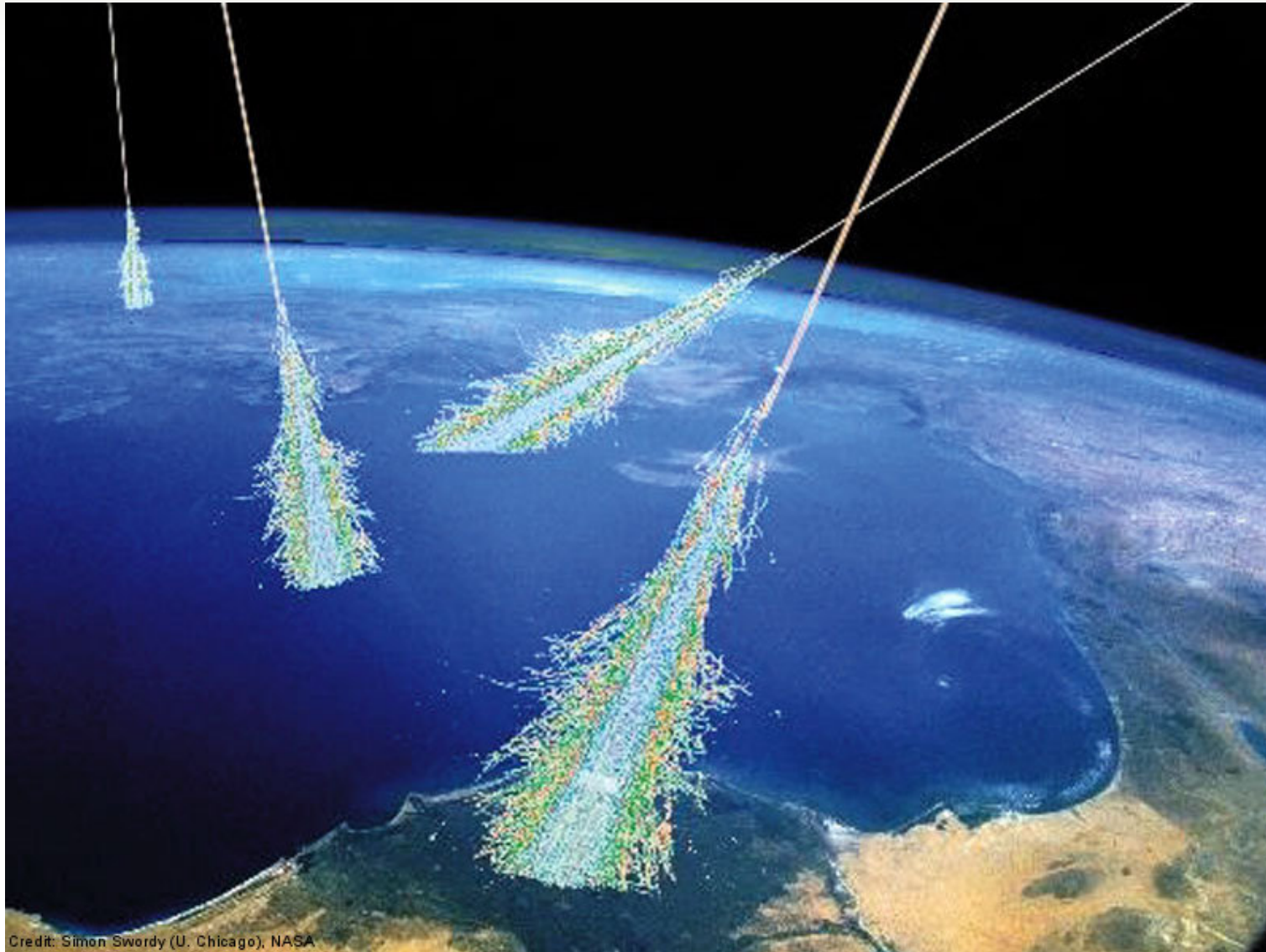


Tscherenkov-Strahlung
Doppler-Effekt
Mössbauer-Effekt
Exoplaneten
21cm Wasserstofflinie
Hubble-Konstante
Zwillingsparadoxon

Relativistischer Dopplereffekt

Thema Relativistischer Dopplereffekt Tscherenkov-Strahlung



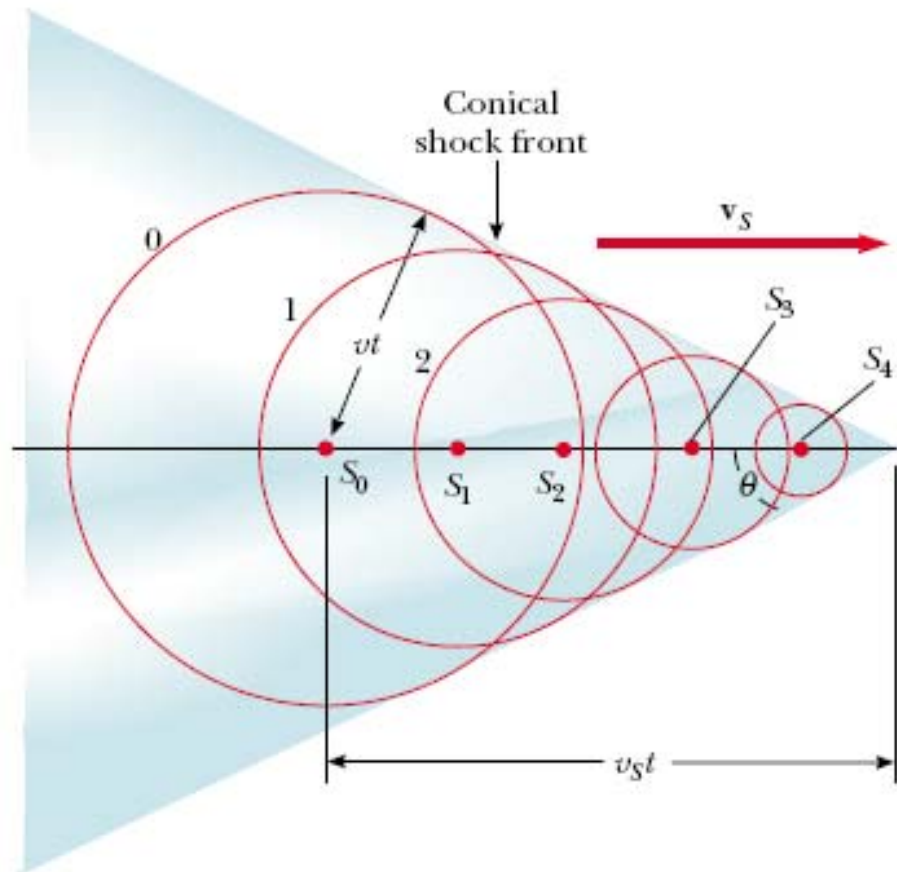
Credit: Simon Swordy (U. Chicago), NASA

Dopplereffekt Machkegel

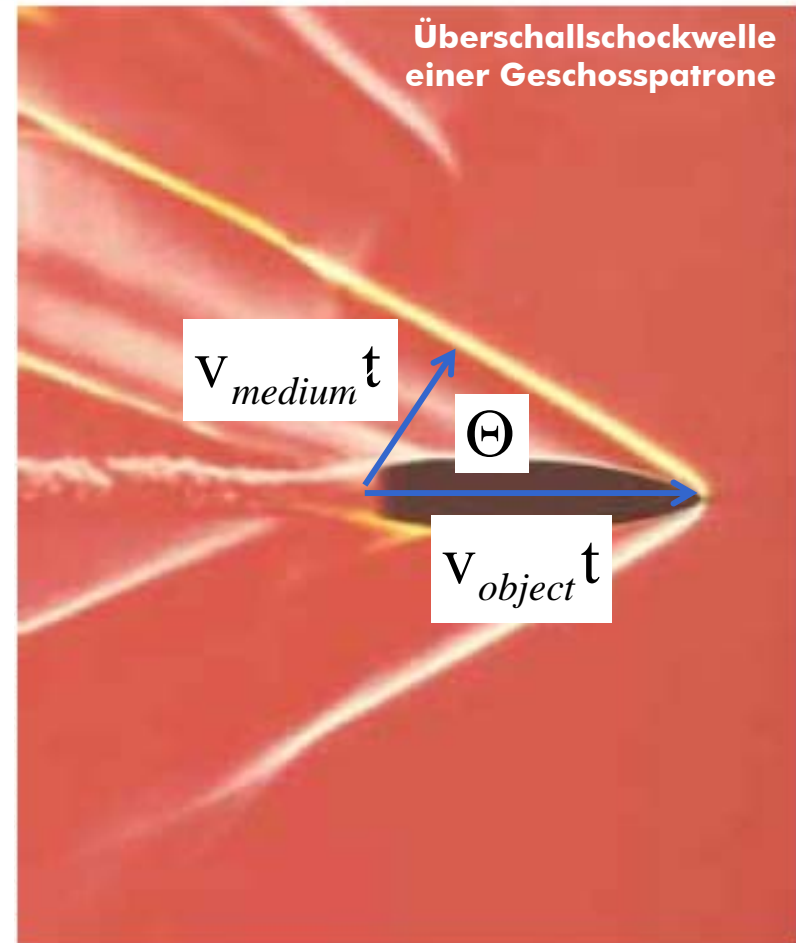
AKUSTIK

Symptome

Objekt bewegt sich schneller als Geschwindigkeit der Energieausbreitung



(a)



Diagnose

Winkel unter der sich Schockfront ausbreitet, gibt Auskunft über Geschwindigkeit Objekt

Charakterisierung der Schallausbreitung durch dimensionslose Größe

Mach - Zahl

$$M_{Mach} = \frac{\text{Trägheitskräfte}}{\text{elastische Kräfte}} = \frac{v_{source}}{v_{medium}}$$

Gesetz von Pythagoras
Winkel des Machkegels

$$\sin \Theta_{Mach} = \frac{v_{medium} t}{v_{source} t} = \frac{v_{medium}}{v_{source}}$$

$$\Theta_{Mach} = \arcsin \left(\frac{v_{medium}}{v_{source}} \right)$$



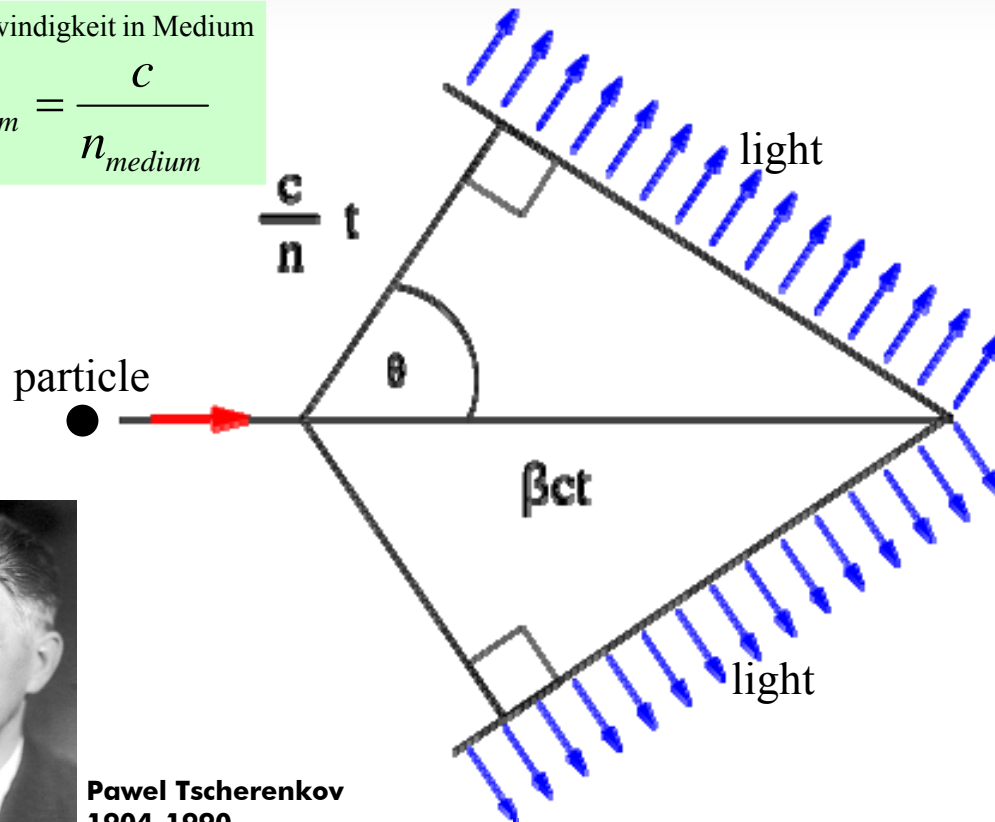
Teilchen, schneller als das Licht Tscherenkow-Strahlung

Symptome

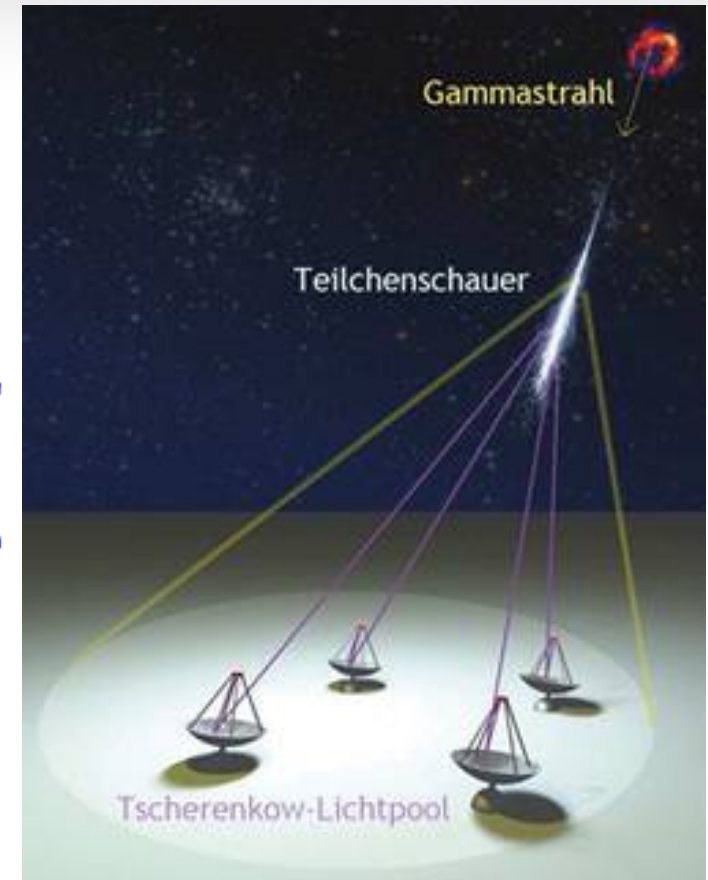
Licht breitet sich in Medium langsamer aus als im Vakuum

Lichtgeschwindigkeit in Medium

$$c_{\text{medium}} = \frac{c}{n_{\text{medium}}}$$



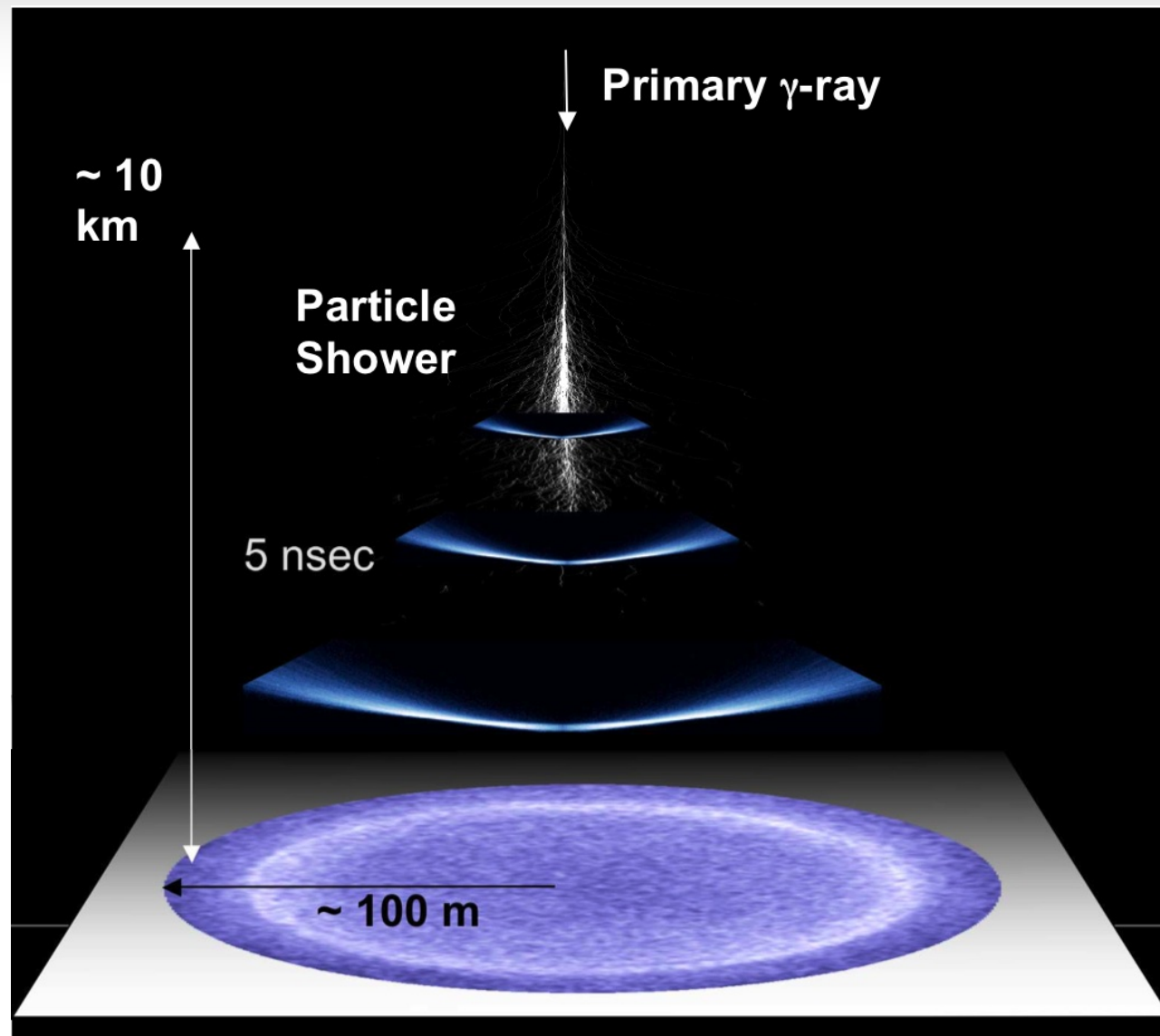
Pawel Tscherenkow
1904-1990



Diagnose

- kosmische Teilchenschauer haben Geschwindigkeiten knapp unter Licht
- Teilchen sind schneller als Licht im Medium, aber langsamer als Vakuum-Lichtgeschwindigkeit
- eng gebündelte, bläulich leuchtende Lichtimpulse bei inelastischen Stößen mit Luftmolekülen
- astronomische Beobachtung zur Identifizierung von Supernovaexplosionen

Teilchen, schneller als das Licht Tscherenkow-Strahlung



USER FRIENDLY by J.D. "Illiad" Frazer



I COME BACK TO MY DESK AFTER THREE SPOTTY HOURS OF HALF-SLEEP. I HAVEN'T WASHED. I'VE HAD NO FOOD IN A DAY. I HAVE A DEADLINE TO MEET AT NINE AS WELL AS A MEETING WITH THE CHIEF.



I GET THE SENSE YOU WANT PLAIN BLACK COFFEE.

OH NO. NOT JUST BLACK. BLACK-HOLE BLACK. WHEN THE COFFEE HAS A RING OF CERENKOV BLUE AROUND IT YOU'LL HAVE GOTTEN IT RIGHT.



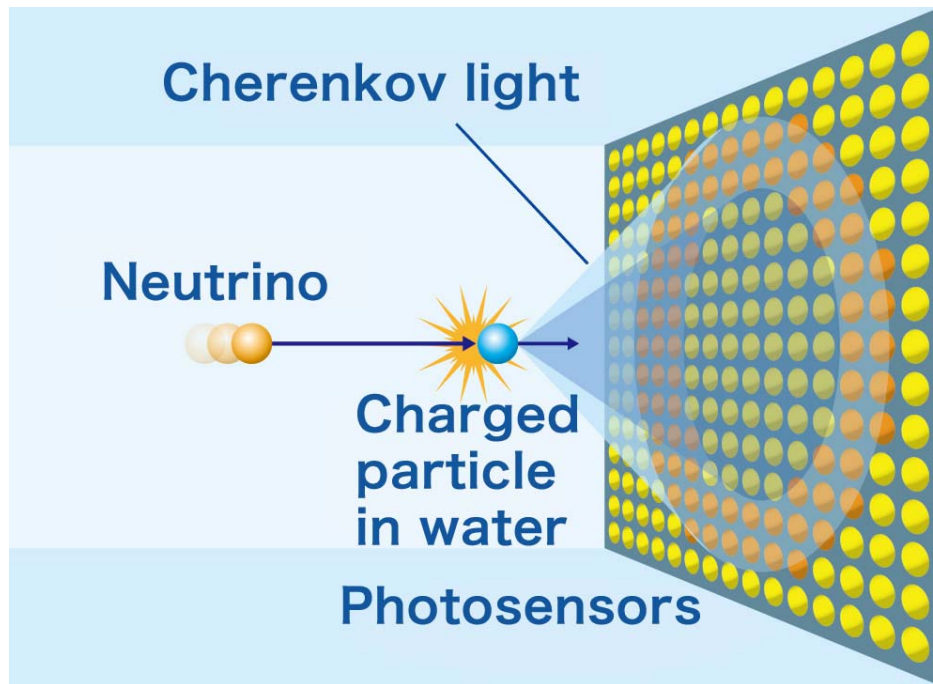
The Nobel Prize in Physics 1958 was awarded jointly to Pavel Alekseyevich Cherenkov, Il'ja Mikhailovich Frank and Igor Yevgenyevich Tamm for the discovery and the interpretation of the Cherenkov effect



Teilchen, schneller als das Licht Super-Komikande

Symptome

- Licht aus Fusion in Sonne benötigt 10^5 Jahre um an Oberfläche zu gelangen
- Neutrinos aus Sonne geben Auskunft über momentane Fusionsrate der Sonne
- Tank mit 50 000 t hochreinen Wassers
- Wechselwirkung von Neutrinos mit Wasser erzeugt Myonen und Elektronen
- 11 200 Photodetektoren weisen Tscherenkow-Strahlung schneller Elektronen nach



Diagnose

- Flavor ist für Neutrinos möglicherweise keine Erhaltungsgröße der schwachen Wechselwirkung
- Hinweis gibt geringe Rate (33%) erwarteter sogenannter Sonnenneutrinos
- Nachweis von Oszillationen wäre Hinweis darauf, dass Neutrinos Masse haben



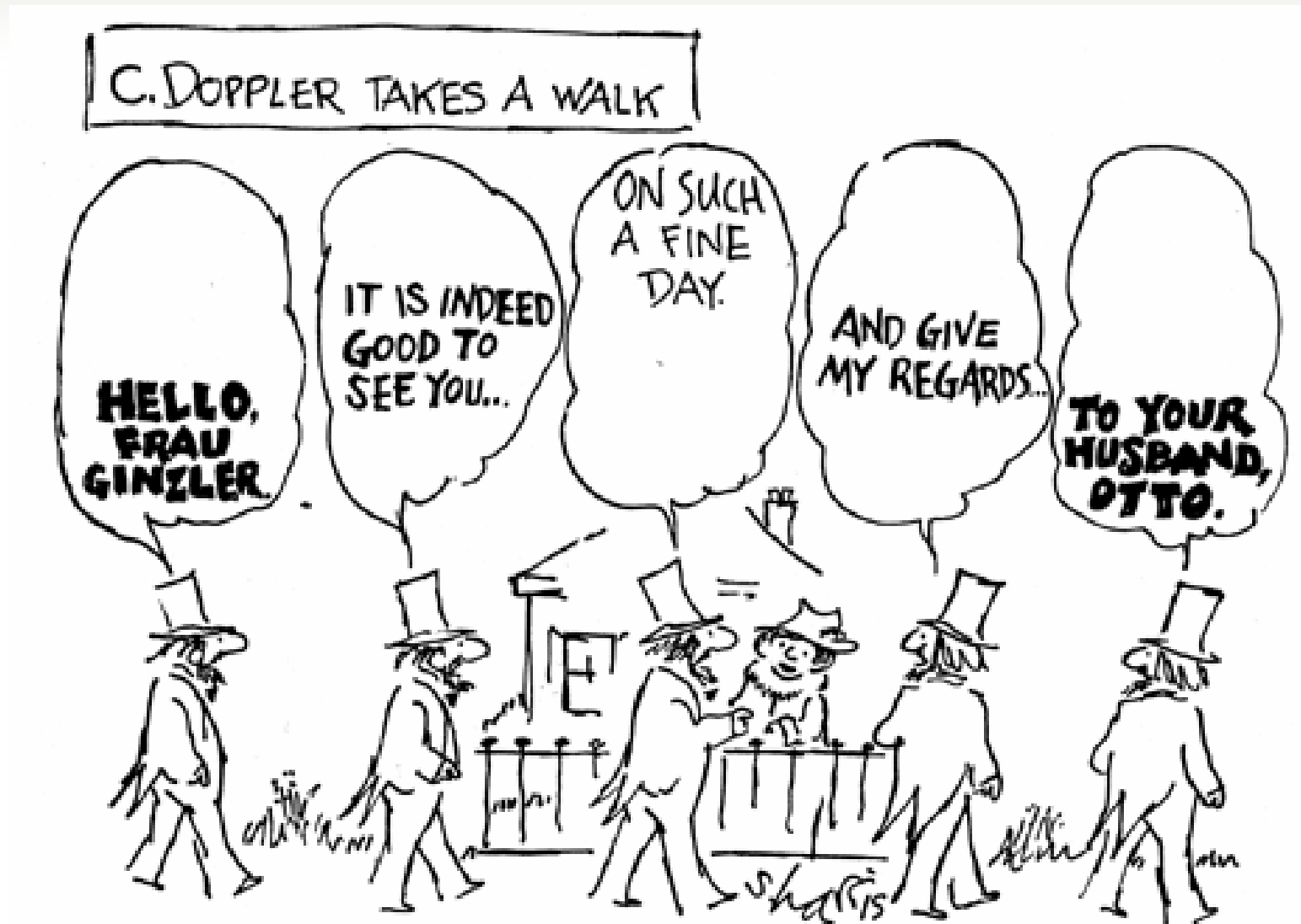
**The Nobel Prize in Physics 2015
was awarded jointly to Takaaki Kajita and Arthur B. McDonald
for the discovery of neutrino oscillations, which shows that neutrinos have mass**



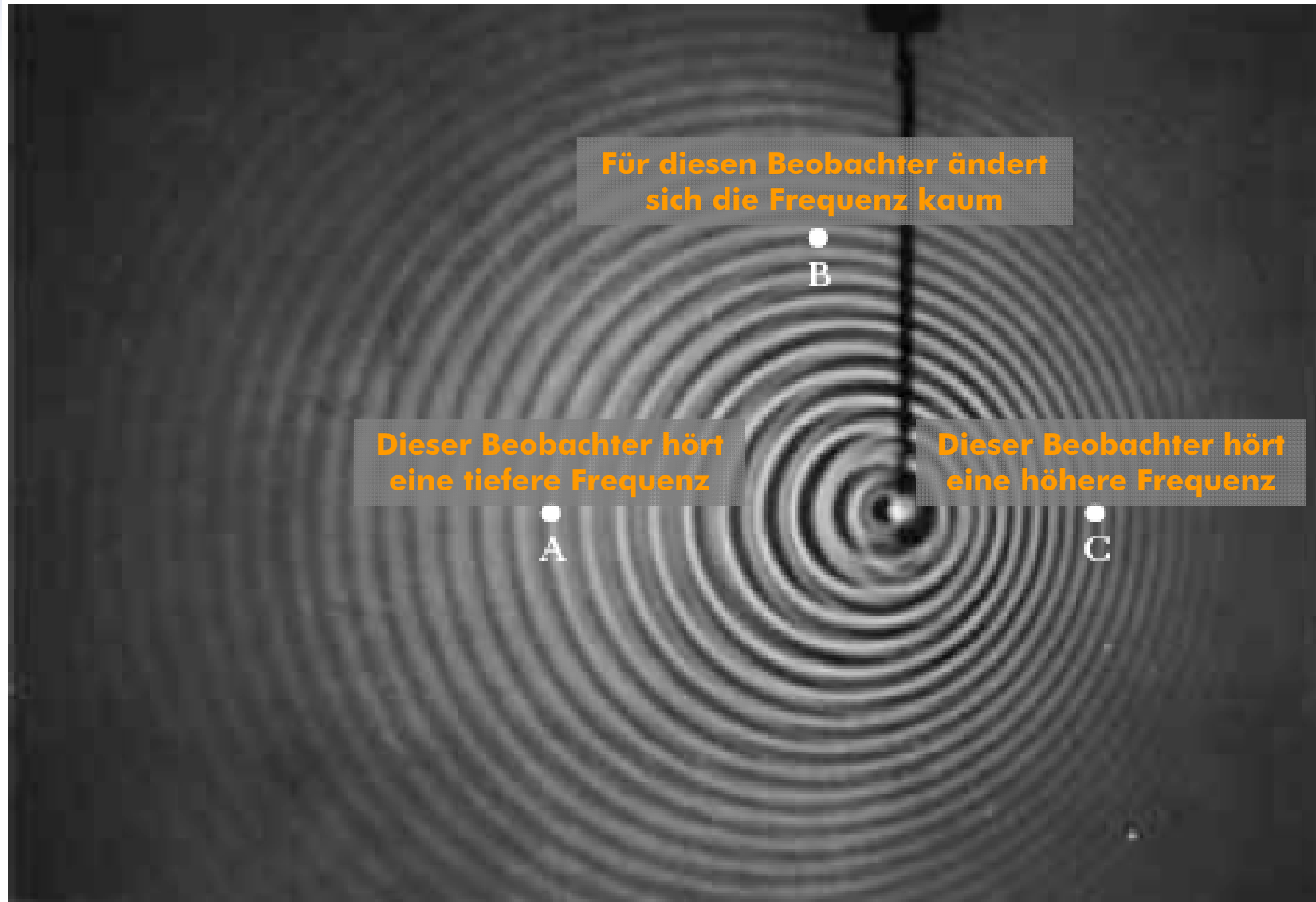
**Erzeugung schneller Partikel in Kernzerfällen
führt in Atomreaktoren zu Tscherenkow-Strahlung**

Thema Relativistischer Dopplereffekt

Doppler-Effekt 1



Dopplereffekt bei bewegter Schallquelle



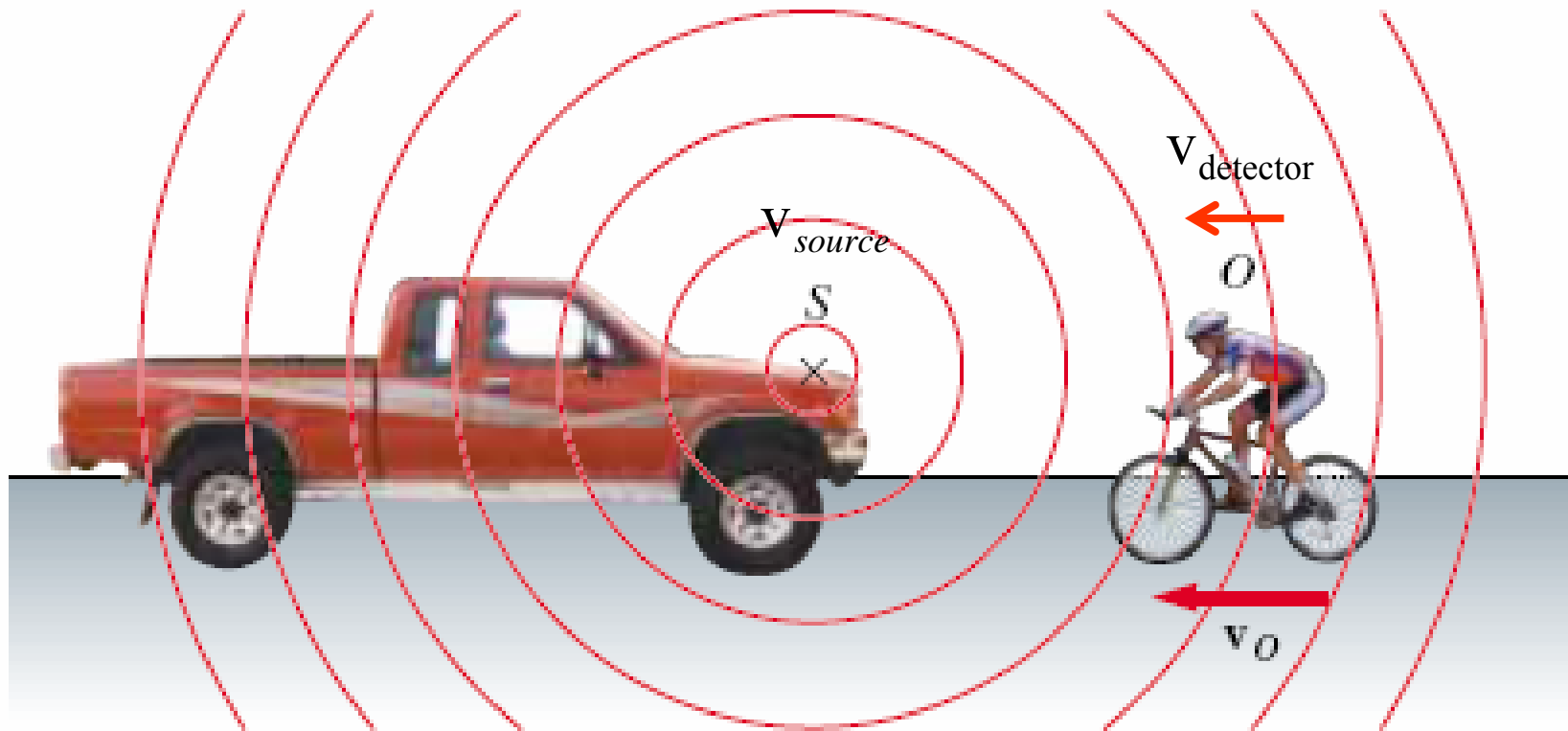
Schallausbreitung Dopplereffekt

Doppler Effect: Police Siren



Diagnose
Schallquelle bewegt sich auf ruhenden Beobachter zu

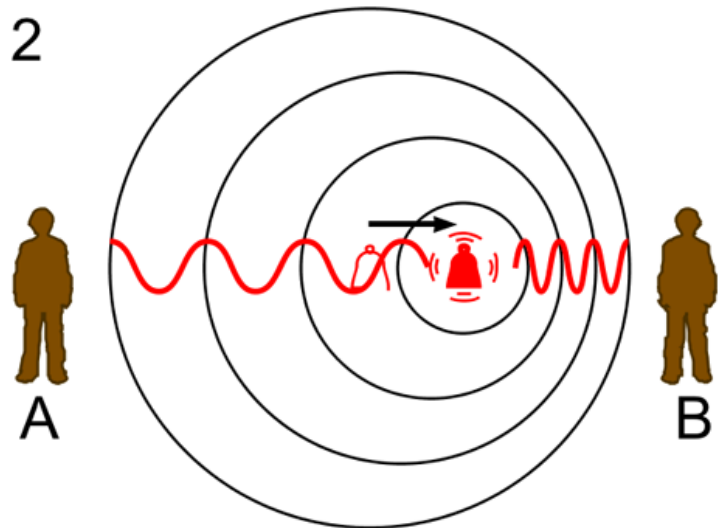
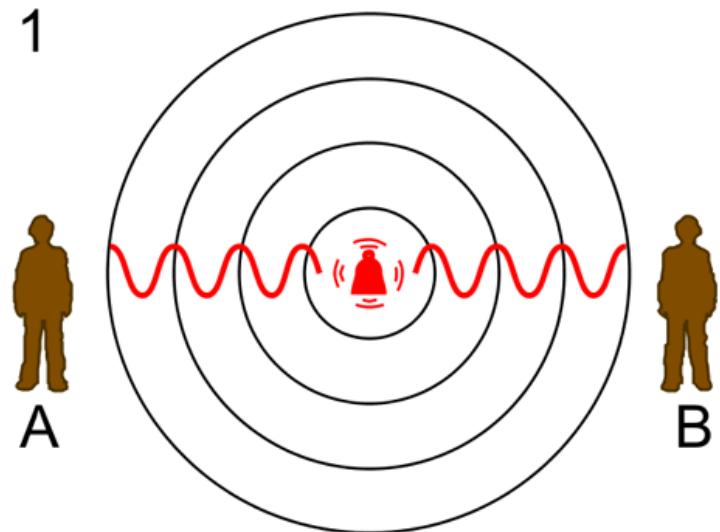
Schallausbreitung Dopplereffekt



Diagnose
Beobachter bewegt sich auf ruhende Schallquelle zu

Fallunterscheidung Dopplereffekt

AKUSTIK



oberes Vorzeichen
Objekte bewegen sich
aufeinander zu

Allgemeine Formel für den Dopplereffekt

$$f_{\text{Doppler}} = \left(\frac{v_{\text{medium}} \pm v_{\text{detector}}}{v_{\text{medium}} \mp v_{\text{source}}} \right) f_{\text{source}}$$

unteres Vorzeichen
Objekte entfernen
sich voneinander

v_{source} : Geschwindigkeit Quelle

v_{detektor} : Geschwindigkeit Detektor

v_{medium} : Ausbreitungsgeschwindigkeit Medium

Diagnose

- Frequenz der Schallquelle ändert sich durch **BEWEGTE** Quelle
- Frequenz der Schallquelle ändert sich bei **RUHENDER** Quelle **NICHT**
- in beiden Fällen ergibt sich eine Dopplerverschiebung der Frequenz



medizinisch betrachtet

Doppler-Sonographie

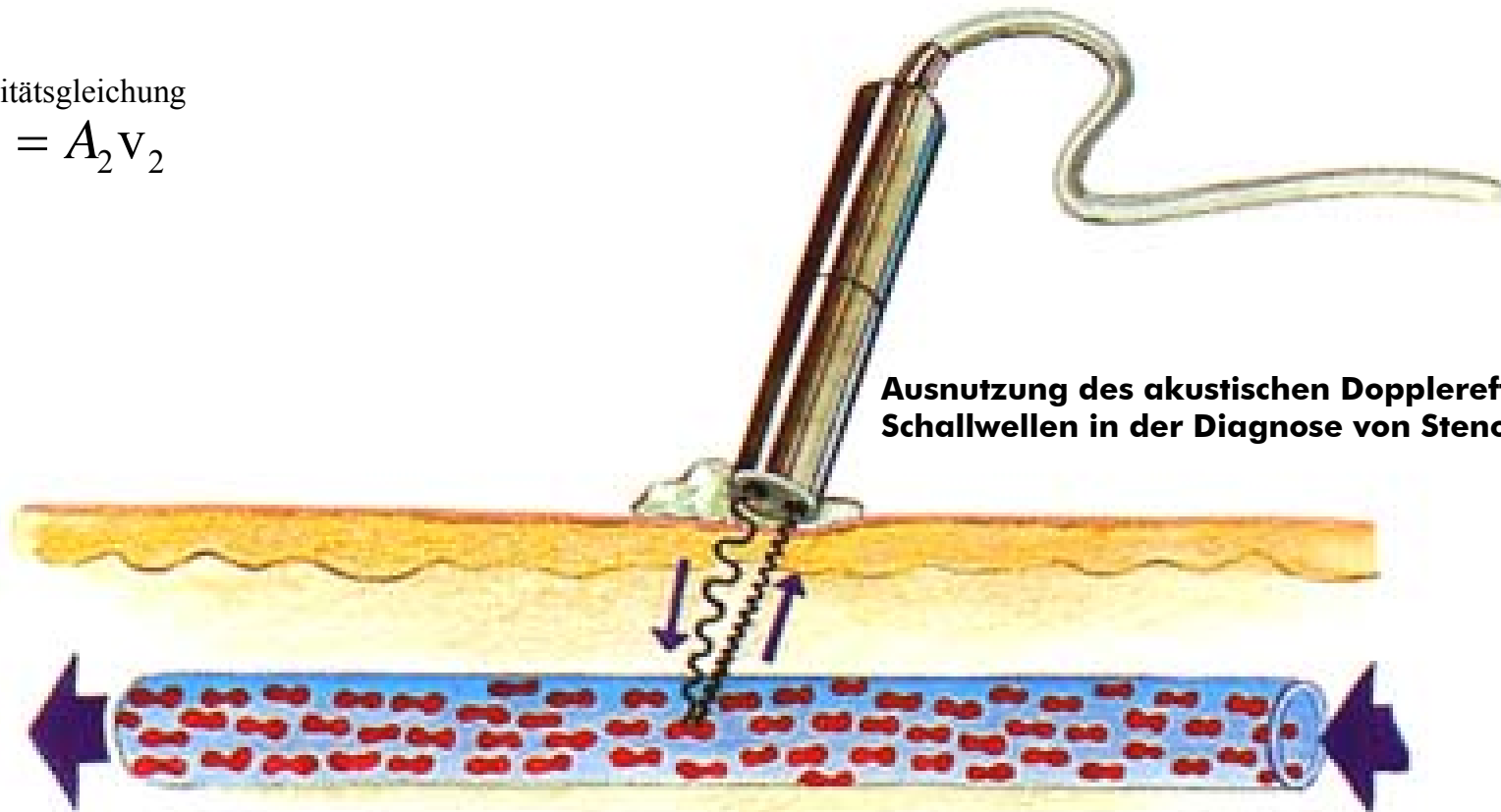


Symptome

Rote Blutkörperchen reflektieren Ultraschall und geben Auskunft über Fließgeschwindigkeit

Kontinuitätsgleichung

$$A_1 v_1 = A_2 v_2$$



Ausnutzung des akustischen Dopplereffekts für Schallwellen in der Diagnose von Stenosen

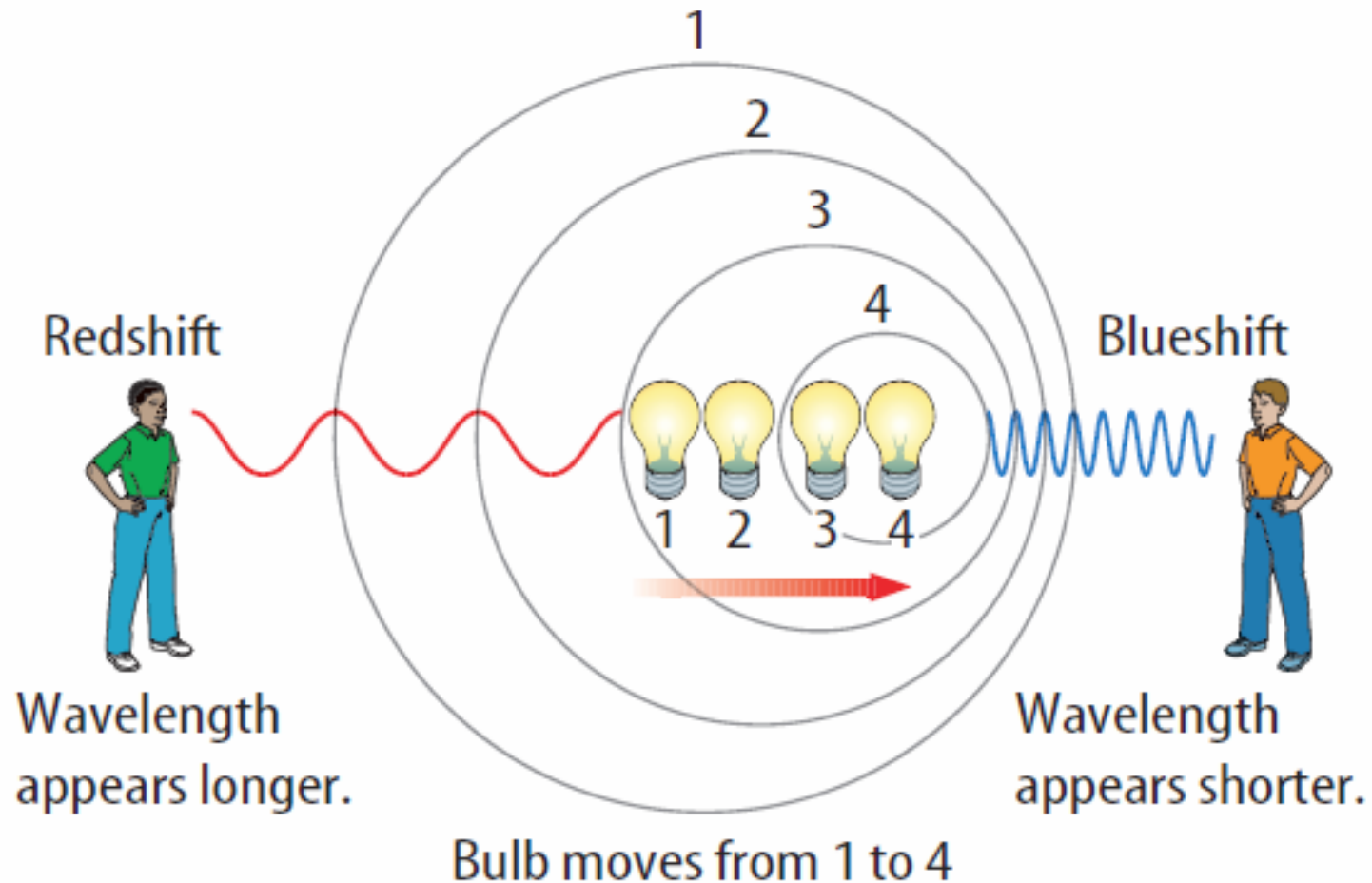


Dopplereffekt

Diagnose

- nach Kontinuitätsgleichung fließt Flüssigkeit in Verengung schneller
- rückgestreute Schallwelle hat durch Dopplereffekt andere Frequenz

relativistische Phänomene Rot und Blau

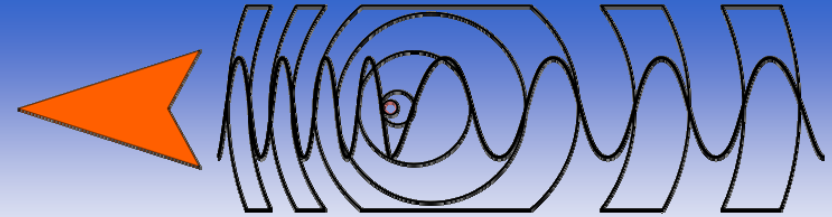


Diagnose

- Dopplereffekt ausgelöst durch bewegte Schallquelle ist wohlbekanntes Alltagsphänomen
- die Frage ist, ob es einen ähnlichen Effekt auch für Lichtwellen gibt?



relativistisch betrachtet Dopplereffekt



Symptome

Phänomen Dopplerverschiebung für Licht erst bei relativistischen Geschwindigkeiten erwartet



relativistische Dopplerverschiebung führt zu Frequenzerhöhung

$$v_{bewegt} = v_{ruhend} \sqrt{\frac{1 + \beta_{SRT}}{1 - \beta_{SRT}}}$$

größer EINS
Objekt nähert sich dem Beobachter

relativistische Dopplerverschiebung führt zu Frequenzerniedrigung

$$v_{bewegt} = v_{ruhend} \sqrt{\frac{1 - \beta_{SRT}}{1 + \beta_{SRT}}}$$

kleiner EINS
Objekt entfernt sich vom Beobachter

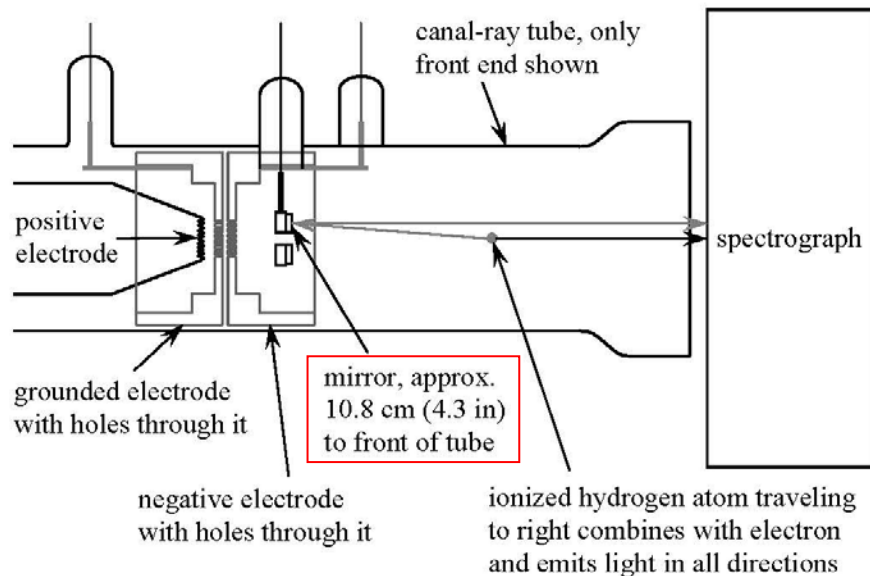
Diagnose

- Frequenz Lichtquelle wird in ruhendem Bezugssystem bei anderer Frequenz wahrgenommen
- sich entfernendes Objekt sendet Licht geringerer Frequenz aus
- sich annäherndes Objekt sendet Licht höherer Frequenz aus

Arbeitsblatt
Extra

Experimental Study of the Rate of a Moving Atomic Clock

HERBERT E. IVES AND G. R. STILWELL
Bell Telephone Laboratories, Inc., New York, N. Y.
 (Received April 12, 1938)



Frequenz der Emission

$$v_{\text{in Flugrichtung}} = v_{\text{Atom}} \sqrt{\frac{1 + \beta_{SRT}}{1 - \beta_{SRT}}}$$

Frequenz der Emission

$$v_{\text{entgegen Flugrichtung}} = v_{\text{Atom}} \sqrt{\frac{1 - \beta_{SRT}}{1 + \beta_{SRT}}}$$

$$v_{\text{in Flugrichtung}} \cdot v_{\text{entgegen Flugrichtung}} = v_{\text{Atom}}^2$$

Diagnose

- schnelles Ion rekombiniert mit Elektron und sendet Fluoreszenzlicht aus (isotrop)
- in Flugrichtung Erhöhung der Frequenz
- entgegen Flugrichtung (Nachweis über Spiegel) Erniedrigung der Frequenz
- Ives und Stilwell bestätigen mit diesem Experiment den relativistischen Dopplereffekt



Ueber das farbige Licht der Doppelsterne

und anderer anderer

Gestirne des Himmels.

Versuch einer das Bradley'sche Aberrations - Theorem als integrierenden Theil in sich schliessenden allgemeineren Theorie.

Von

Christian Doppler

erschienen 1848

Potenzreihenentwicklung für $v \ll c$ oder $\beta_{SRT} \ll 1$

$$v_{bewegt} = v_{ruhend} \left(1 - \beta_{SRT} + \frac{1}{2} \beta_{SRT}^2 - \dots \right)$$

Licht-Dopplereffekt bei niedrigen Geschwindigkeiten $v \ll c$

$$v_{bewegt} \approx v_{ruhend} \left(1 - \frac{v}{c} \right)$$

relativistisch betrachtet Dopplereffekt

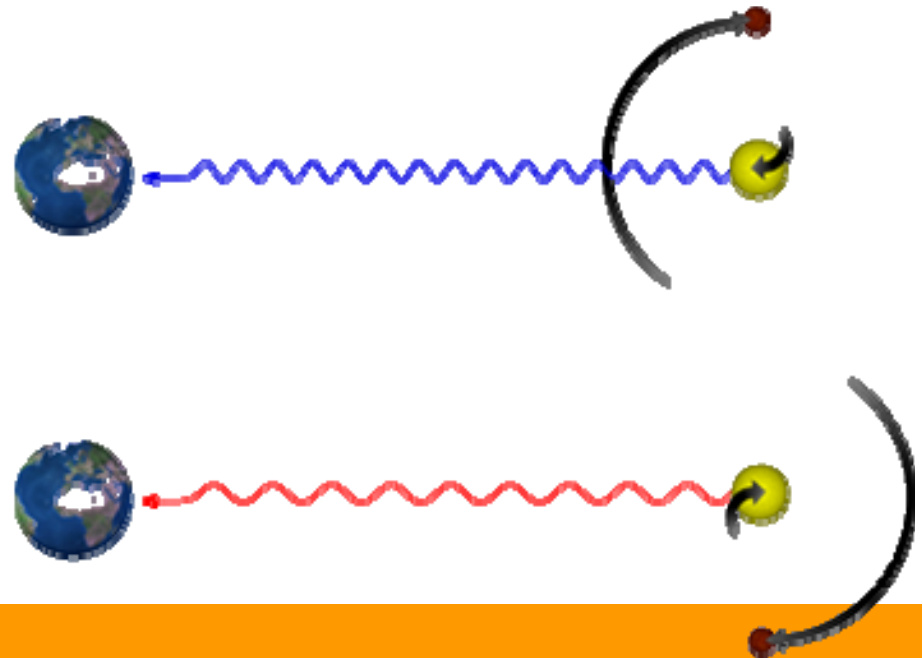


relativistische Dopplerverschiebung

$$v_{bewegt} = v_{ruhend} \sqrt{\frac{1 - \beta_{SRT}}{1 + \beta_{SRT}}}$$

kleiner EINS

Objekt entfernt sich vom Beobachter



Diagnose

- Potenzreihenentwicklung liefert Formel für klassischen Dopplereffekt
- allerdings beschreibt die Formel die Verschiebung der Lichtfrequenz



relativistisch betrachtet Dopplereffekt

Symptome

Objekt entfernt sich mit geringer Geschwindigkeit

Licht-Dopplereffekt bei Geschwindigkeiten $v \ll c$

$$v_{bewegt} = v_{ruhend} \left(1 - \frac{v_{Stern}}{c} \right)$$

$$v_{bewegt} = \frac{c}{\lambda_{bewegt}} \approx \frac{c}{\lambda_{ruhend}} (1 - \beta_{SRT})$$

$$\lambda_{bewegt} = \frac{\lambda_{ruhend}}{1 - \beta_{SRT}} \stackrel{\text{Potenzreihe}}{\approx} \lambda_{ruhend} (1 + \beta_{SRT})$$

Wissenschaftsjahr 2008
Mathematik
Alles, was zählt

Näherungen für $|\alpha| \ll 1$

$$\frac{1}{1 - \alpha} \approx 1 + \alpha$$

$$\beta_{SRT} = \frac{v_{stern}}{c} = \frac{\lambda_{bewegt} - \lambda_{ruhend}}{\lambda_{ruhend}}$$

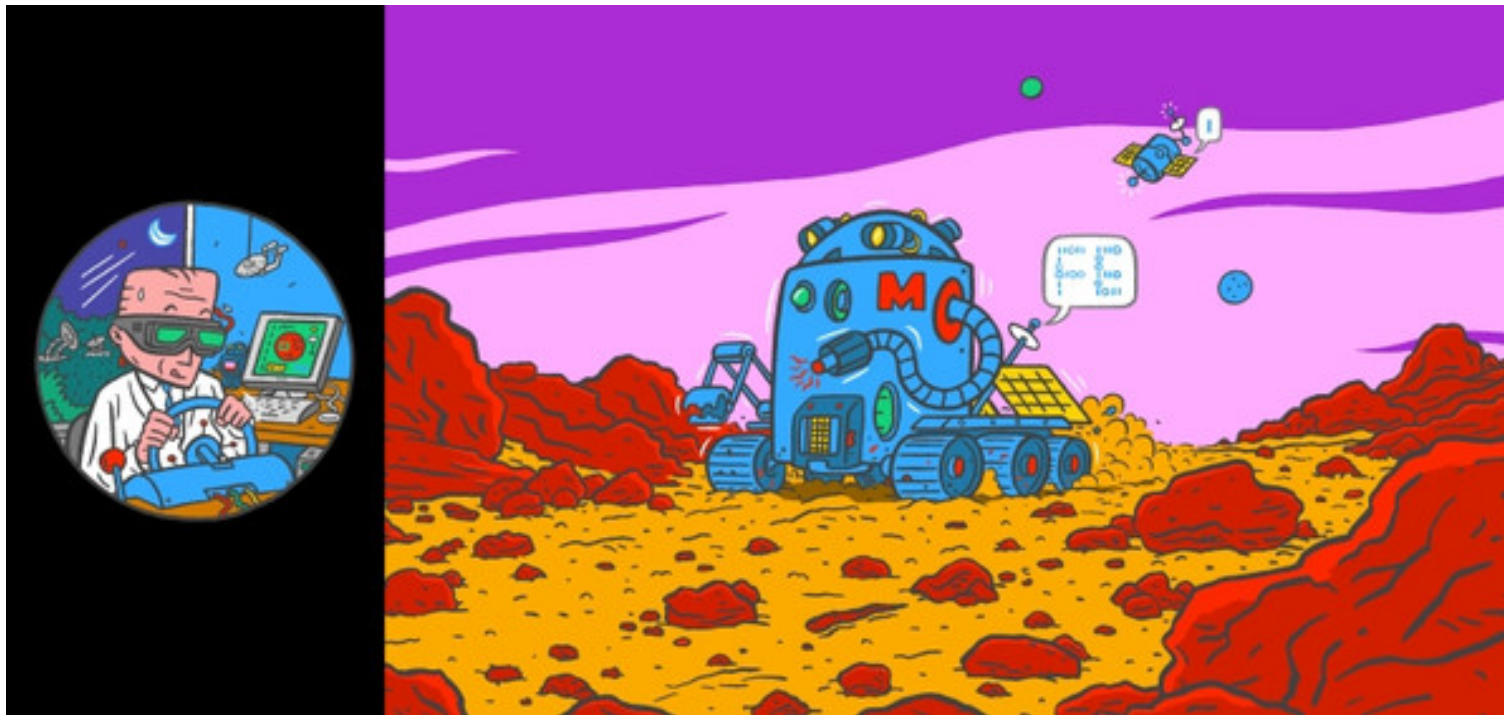
$$v_{stern} = \frac{\Delta \lambda_{SRT}}{\lambda_{ruhend}} c$$



Diagnose

- Objekte, die sich von entfernen, senden Licht längerer Wellenlänge aus
- Objekte, die sich auf uns zu bewegen, senden Licht kürzerer Wellenlänge aus

Thema Relativistischer Dopplereffekt Mössbauer-Effekt



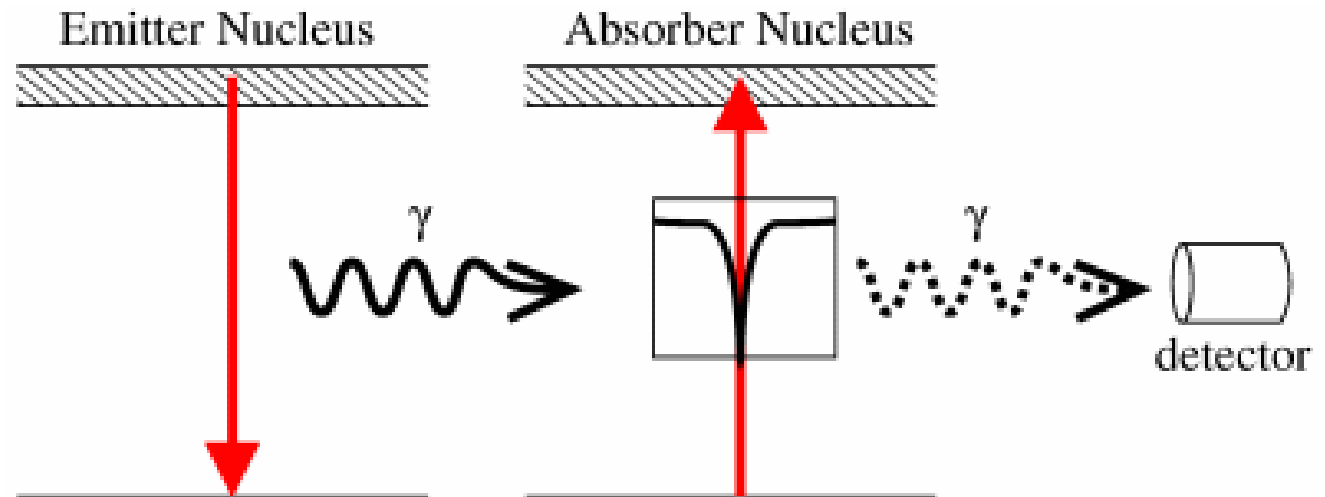
Messmethode der Festkörperphysik

Mößbauer-Effekt



Symptome

- γ -Quanten sind energiereiche Lichtteilchen, genannt Photonen
- γ -Photonen werden aus angeregten Atomkernen emittiert
- ausgesendete Strahlung ist extrem schmalbandig (monochromatisch)
- dadurch können geringste Abweichungen in der Wellenlänge nachgewiesen werden
- Kern erfährt bei γ -Emission nicht zu vernachlässigenden Rückstoß
- Photonen haben KEINE Ruhemasse, aber einen Impuls
- auf Kern wirkende Rückstoß bewirkt Verringerung der Energie des γ -Photons
- Emission von Energie reduziert Masse des Kerns ($E=mc^2$), wie wir noch sehen werden

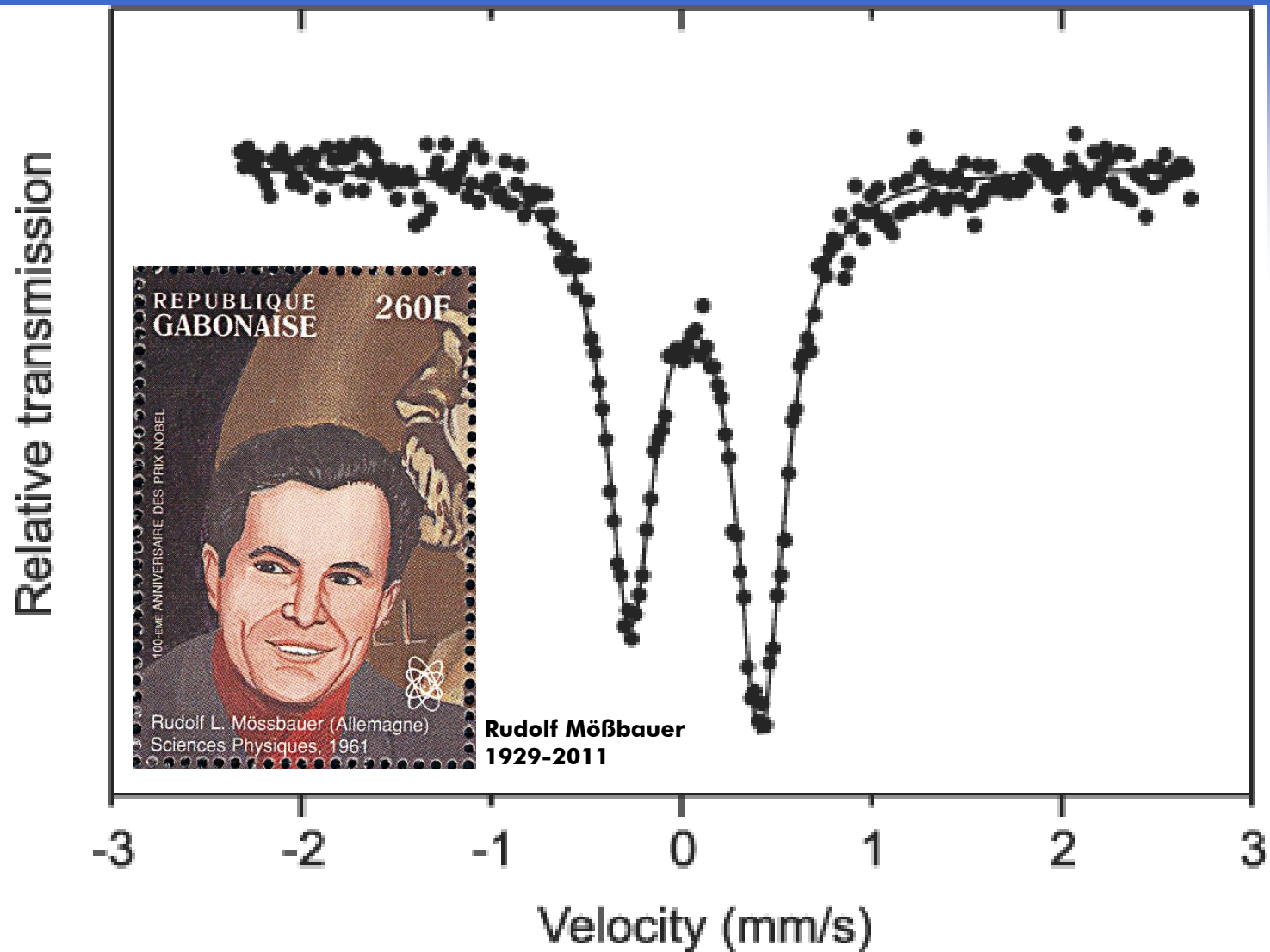


Energie des Photons

$$E_{\gamma} = \Delta E - \frac{(\Delta E)^2}{2m_{nucleus}c^2}$$

Diagnose

- Betrachtung aus Sicht bewegenden Beobachters
- Doppler-Frequenzverschiebung muss berücksichtigt werden
- anderer Kern absorbiert Photon bei Annäherung mit doppelter Rückstoßgeschwindigkeit

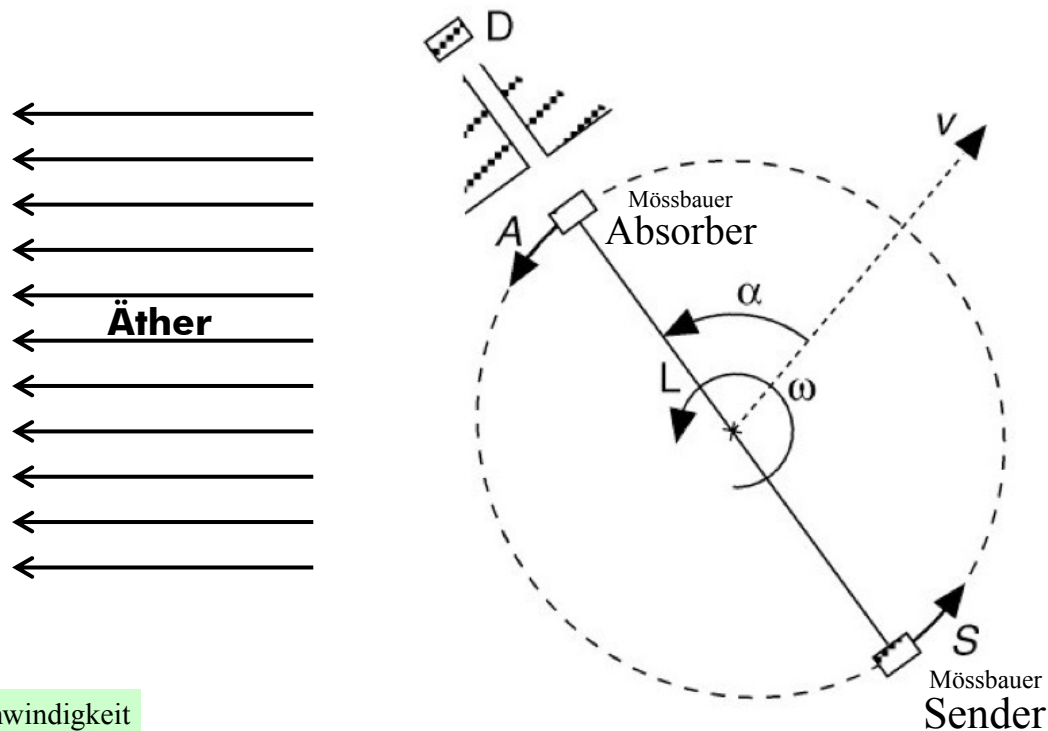


**The Nobel Prize in Physics 1961 was divided equally between ...
... and Rudolf Ludwig Mössbauer
for his researches concerning the resonance absorption of gamma radiation and
his discovery in this connection of the effect which bears his name**

Messung Äthergeschwindigkeit mit Mößbauer Effekt Champeney 1963

Symptome

- Sender und Absorptionsglied rotieren mit Winkelgeschwindigkeit ω .
- Detektor misst Absorption nur bei genau einer Winkelstellung
- Winkel zur Richtung der Bewegung des Mediums der Wellenausbreitung.



Äthergeschwindigkeit
 $v_{\text{Äther}} < 4 \text{ m/s}$

Genauigkeit des Experiments

$$\frac{v_{\text{Äther}}}{c} < 10^{-10}$$

Diagnose

- Bewegung im Äther unterliegt Doppler-Effekt und bewirkt messbare Frequenzverschiebung
- Mößbauer-Messmethode setzt obere Grenze von 4 m/s für Geschwindigkeit des Äthers

Extrablatt

Miniaturisiertes Mößbauer Spektrometer

MIMOS II

Symptome

Kombination aus Mikroskop, α -Teilchen- und Mößbauer-Spektrometer

ermöglicht Analyse von Gesteins- und Bodenproben, geologischer Struktur und Atmosphäre



Diagnose

- **Nachweis bestimmter Eisenminerale gibt Auskunft über Vorhandensein von Wasser**
- **mineralogische Struktur gibt Aufschluss über Entstehung und Verwitterung von Gestein**

Mößbauer Effekt Ton Steine Scherben

Symptome

- eisenhaltige Mineralien sind Bestandteil aller Arten von Ton
- Zusammensetzung ist oft spezifisch für Lagerstätte

Ceramics from the Celtic Oppidum of Manching and Its Influence in Central Europe

Abstract. We present an overview on an extended study of Celtic ceramics from the oppidum of Manching and from some contemporary Celtic sites. The results of neutron activation analysis, thin section microscopy and Mössbauer spectroscopy are combined with the existing detailed archaeological typology to provide information on the provenance of Celtic pottery and on details of its production. The data indicate that there was only very limited exchange of material but far reaching transfer of technology.

Diagnose

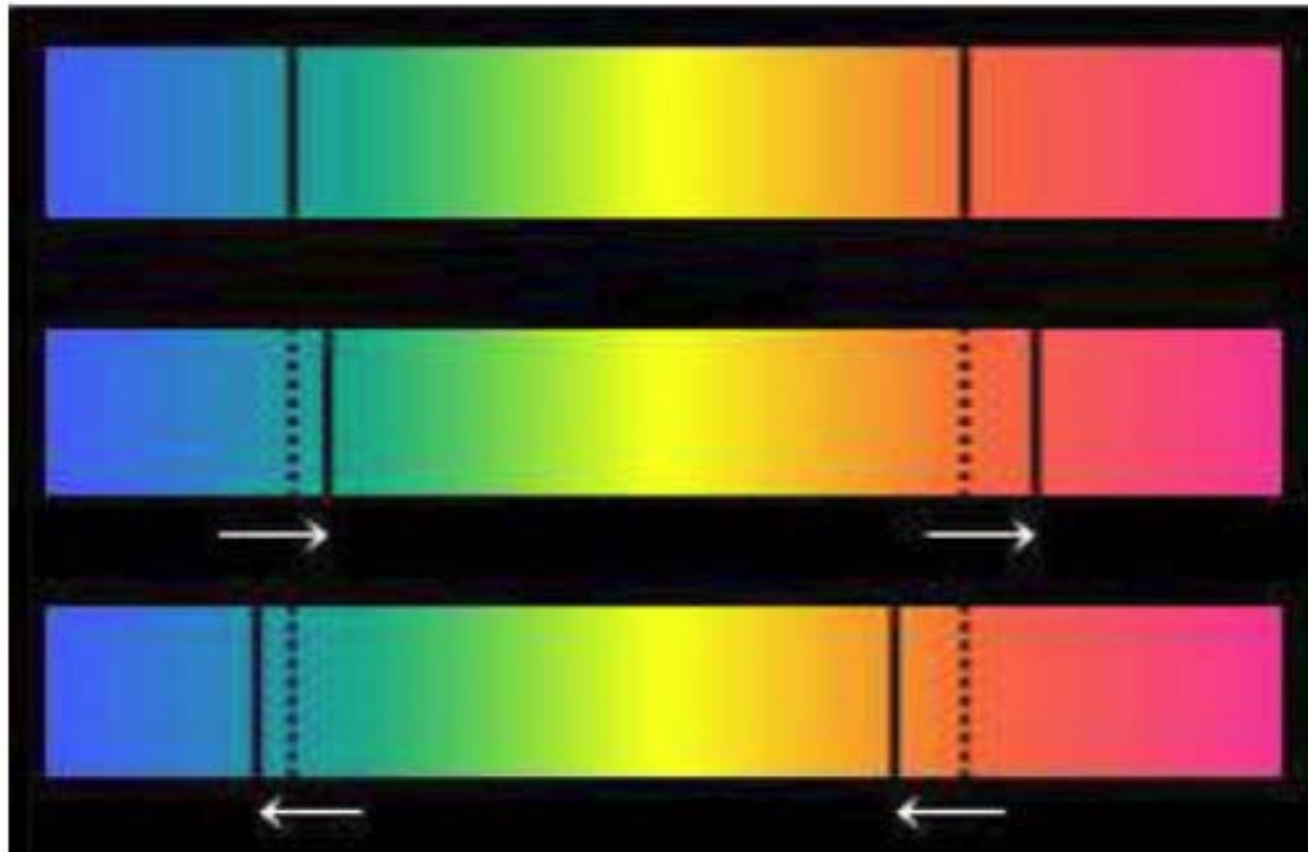
- beim Brennvorgang ändert sich chemischer Zustand in charakteristischer Weise
- Temperatur und Luftzufuhr sind dabei wichtige Parameter
- Mößbauer-Spektroskopie bestimmt Chemie der Eisenverbindungen

Thema Relativistischer Dopplereffekt

Exoplaneten



Relativistischer Dopplereffekt Sonne



Laborspektrum

Gas bewegt sich vom Beobachter weg.

Gas bewegt sich auf Beobachter zu

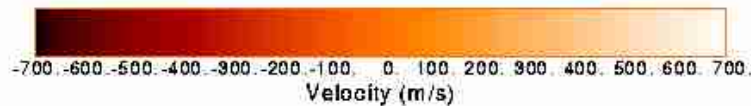
Diagnose

Geschwindigkeit der Gase auf Sonnenoberfläche verschiebt Linienposition über Dopplereffekt

Extrablatt

Average Dopplergram Minus Polynomial Fit

45 images averaged (30-Mar-96 19:26 to 30-Mar-96 20:17)



Relativistischer Dopplereffekt Sonne

Diagnose

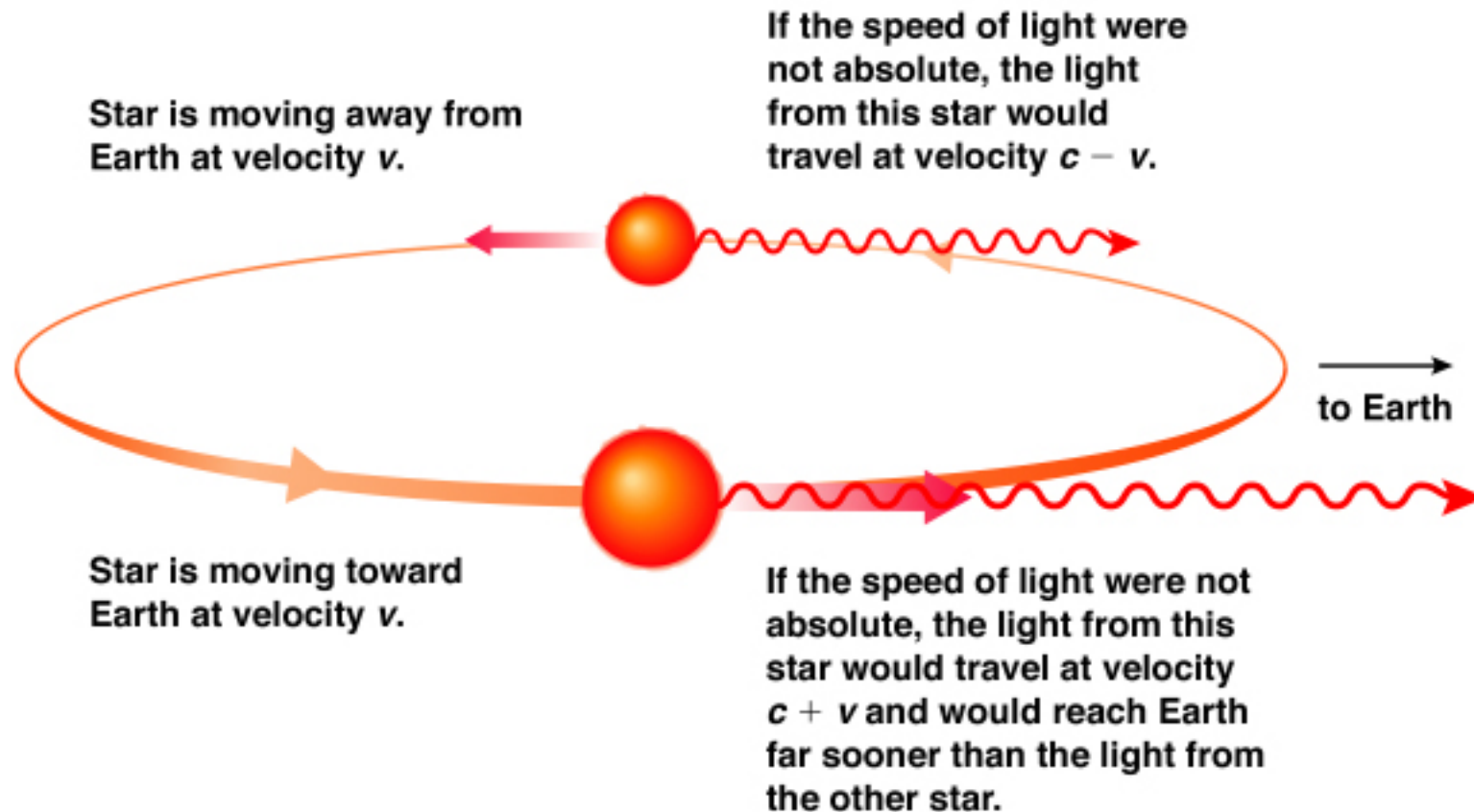
- körnige Struktur zeigt unterschiedliche Geschwindigkeiten des Plasmas auf Sonnenoberfläche
- Unterschiede in der Geschwindigkeit der Gasmoleküle betragen bis zu 1400 m/s



relativistisch betrachtet Wackelsterne

Symptome

Keplerbahnen führen zu Änderung der Geschwindigkeiten für entfernte Beobachter



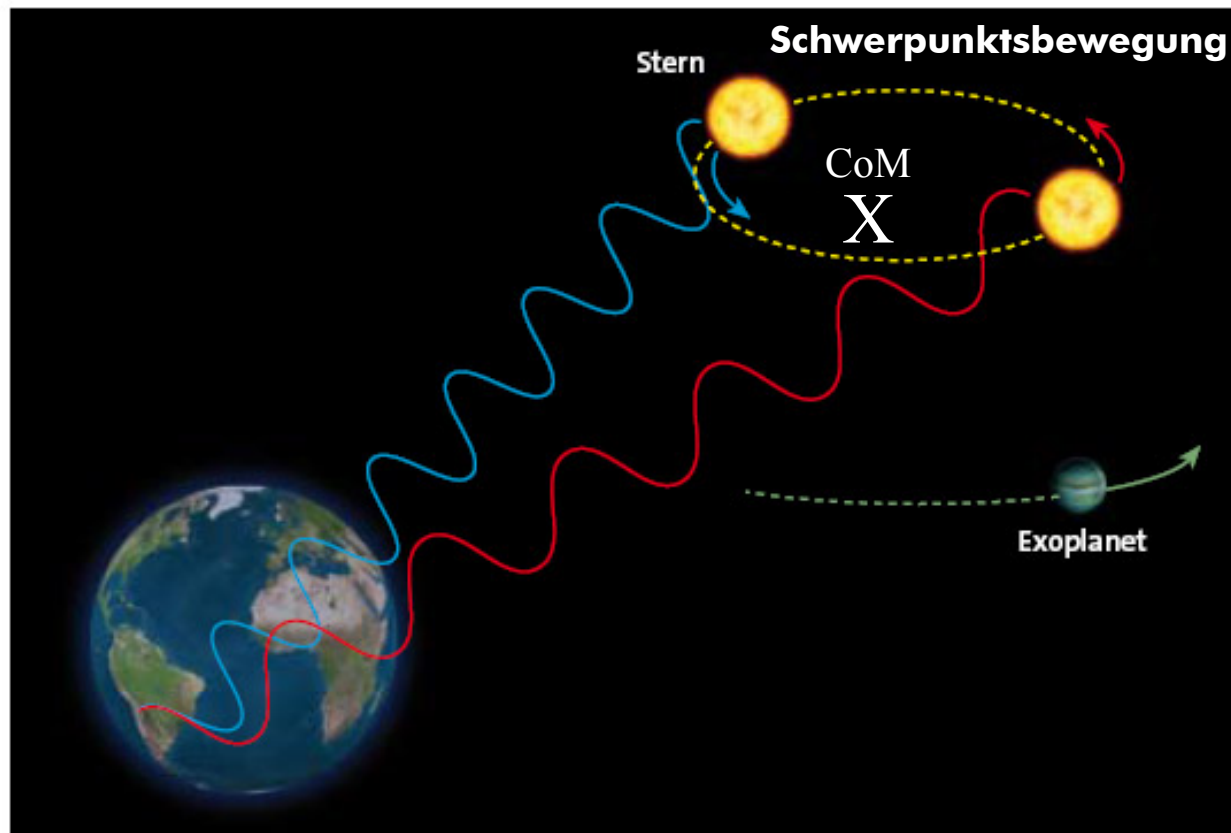
Diagnose

Bewegung eines Sterns auf der Sichtachse zur Erde führt zu Frequenzverschiebung

relativistische Entdeckungen Exoplaneten

Symptome

- Planet um ferne Sonne beeinflusst die Bahnbewegung des Sterns
- Schwerpunkt des Systems nicht mehr Zentrum der Sonne



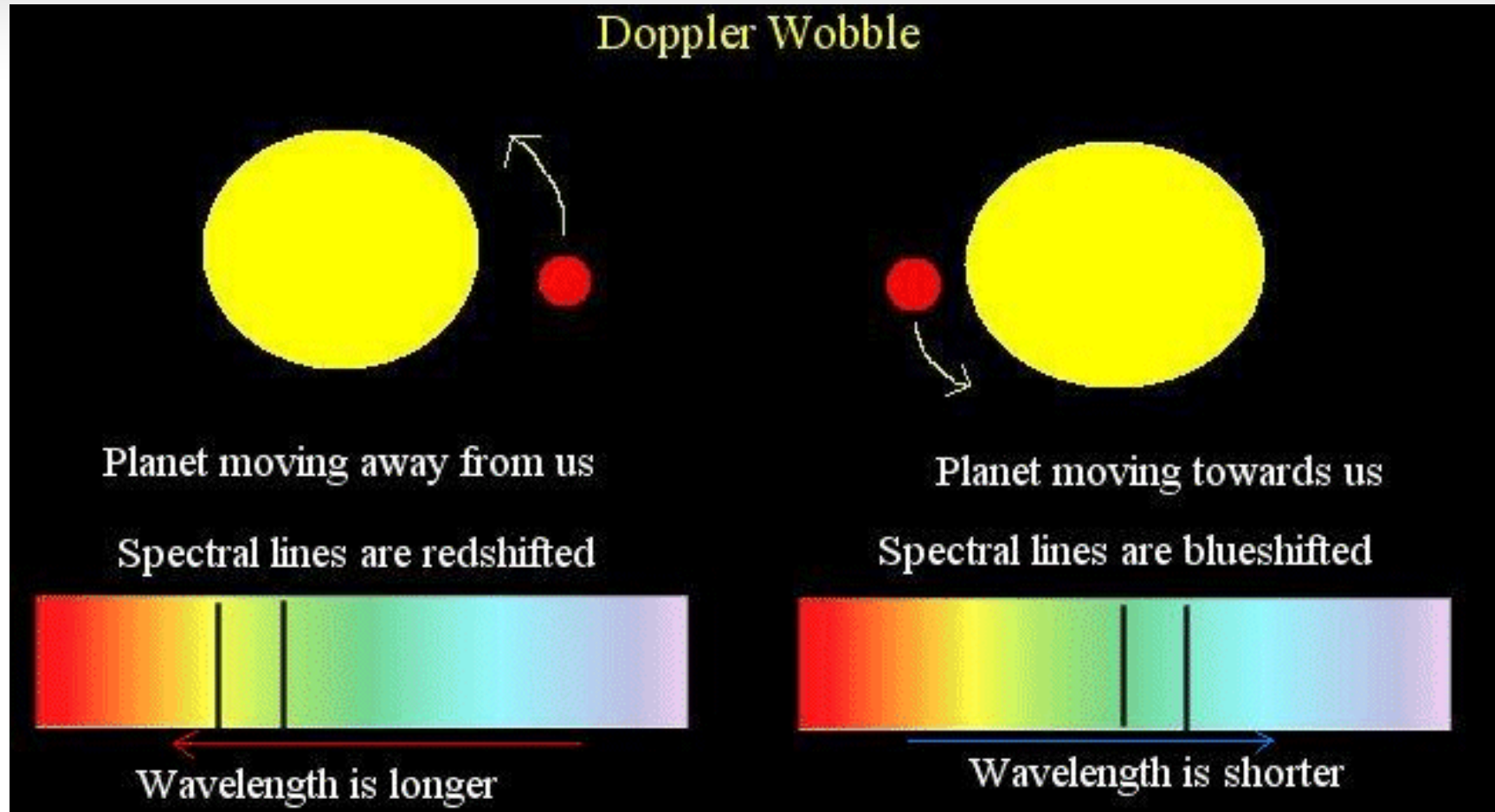
Massenschwerpunkt Stern-Exoplanet

$$\mu_{\text{CoM}} = \frac{m_{\text{star}} r_{\text{star}} + m_{\text{exo}} r_{\text{exo}}}{m_{\text{star}} + m_{\text{exo}}}$$

Diagnose

- Bewegung des Sterns um Massenschwerpunkt führt zu Geschwindigkeitsunterschieden
- atomare Emissionslinien zeigen Phänomen relativistischer Dopplerverschiebung

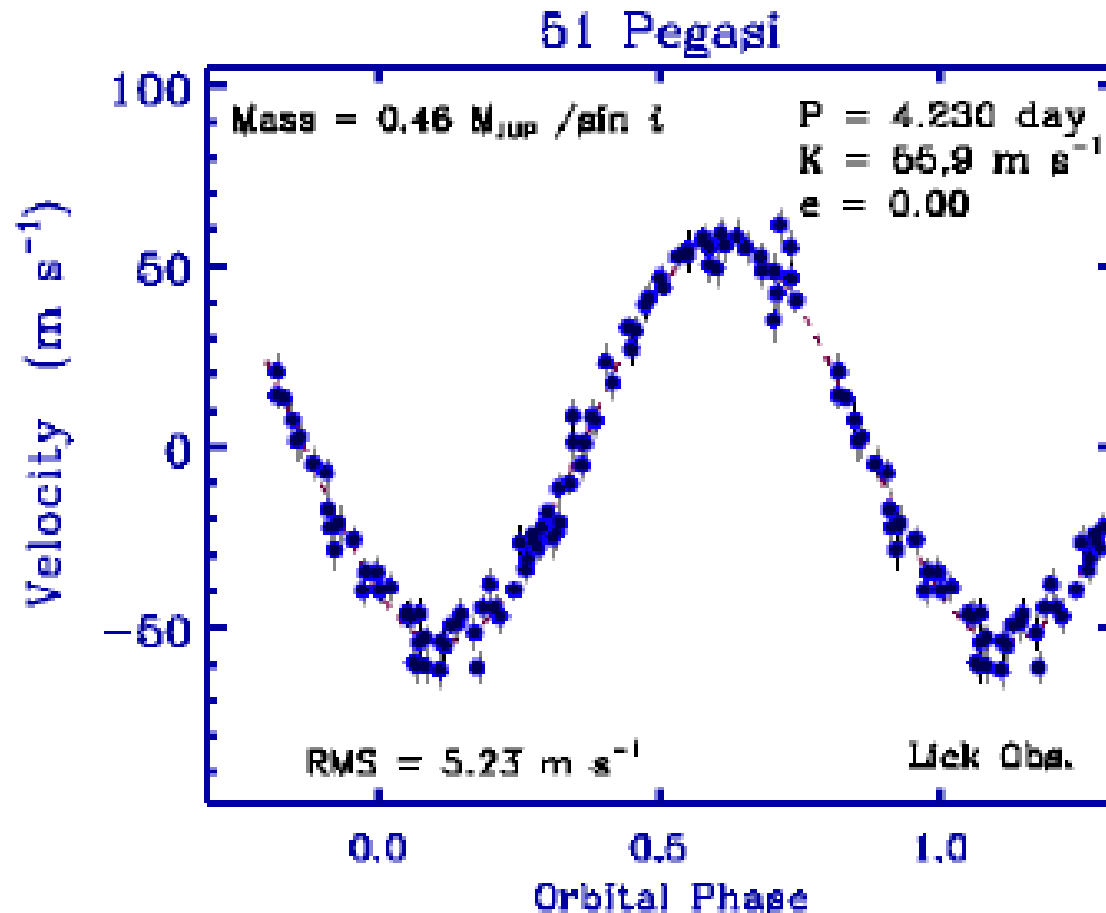
relativistische Entdeckungen Exoplaneten



Diagnose der Sonne

- Linie blauverschoben bei Bewegung in Richtung Erde (höhere Frequenz, geringere Wellenlänge)
- Linie rotverschoben bei Bewegung von Erde weg (niedrigere Frequenz, längere Wellenlänge)

relativistische Entdeckungen Exoplaneten

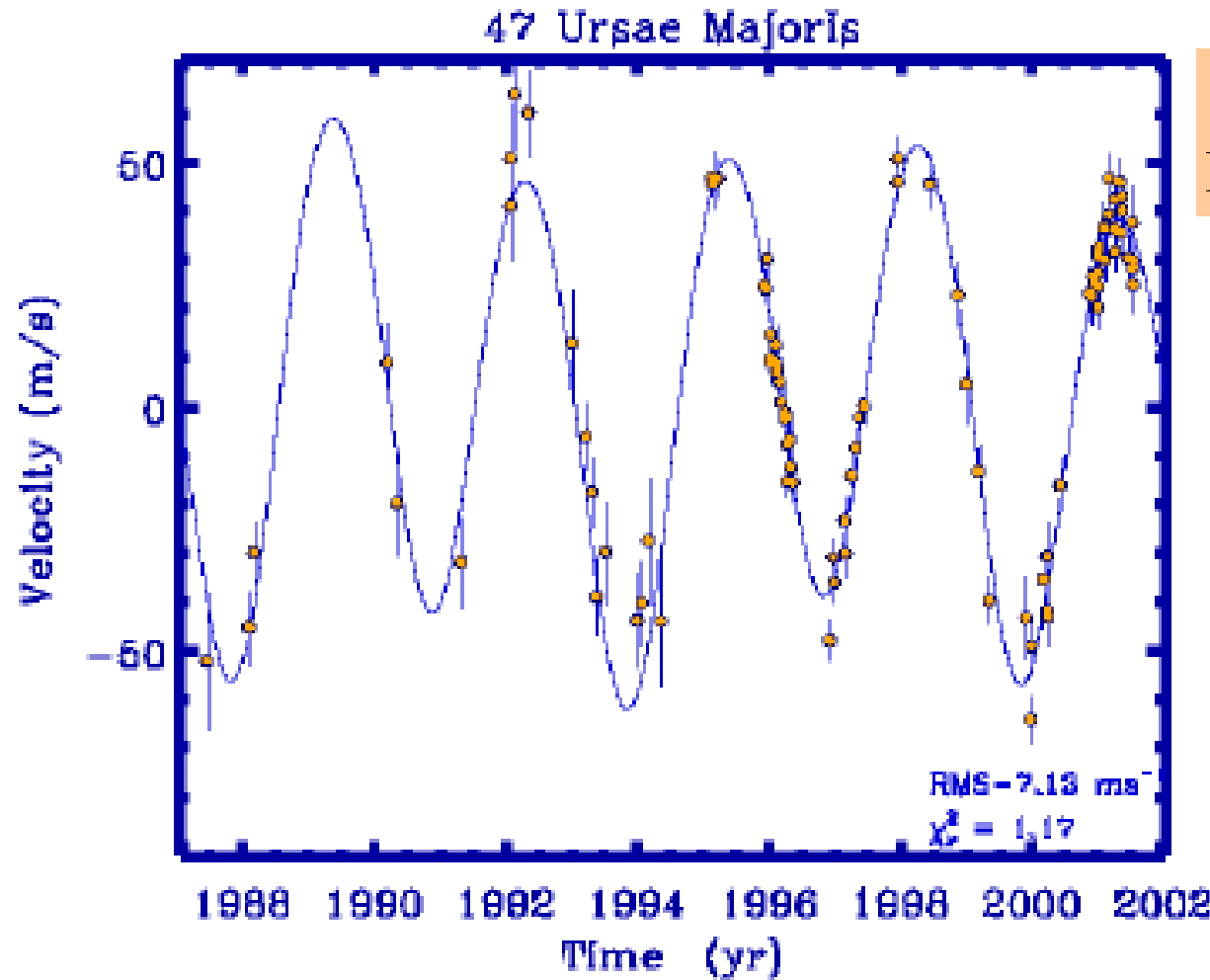


Entfernung zu 51 - Pegasi
51 Lichtjahre

Diagnose

- 51-Pegasi war erster nachgewiesener Exoplanet (1995)
- Dopplerverschiebung zeigt einfache Sinusabhängigkeit
- bei 51-Pegasi handelt es sich um einen Stern mit EINEM einzelnen Planeten

relativistische Entdeckungen Exoplaneten



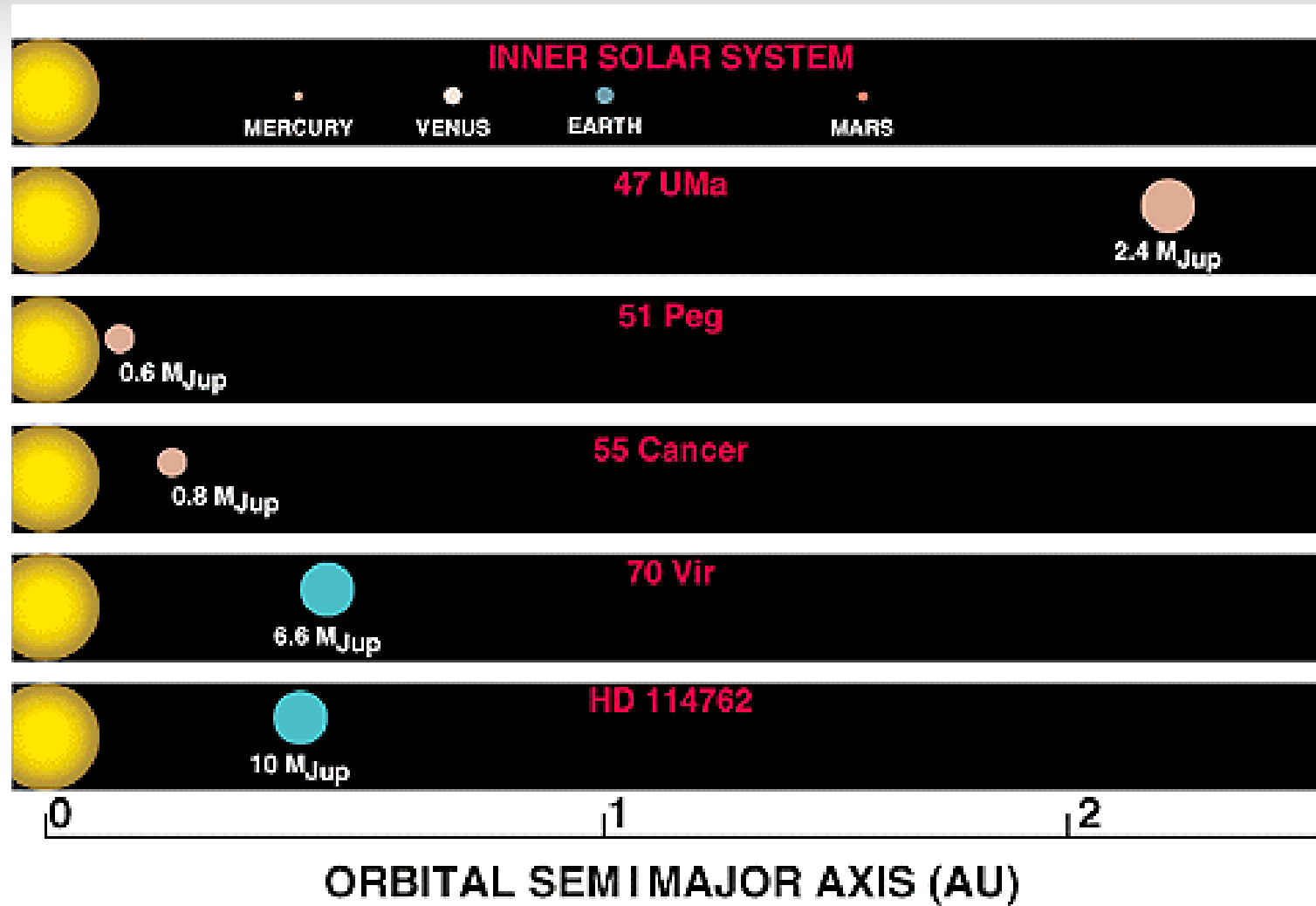
Ursae Majoris
Entfernung 46 Lichtjahre

Stimmgabel
Schwebung



Diagnose
47 Ursae Majoris hat mehrere Planeten und zeigt komplexeres Signal

Exoplaneten



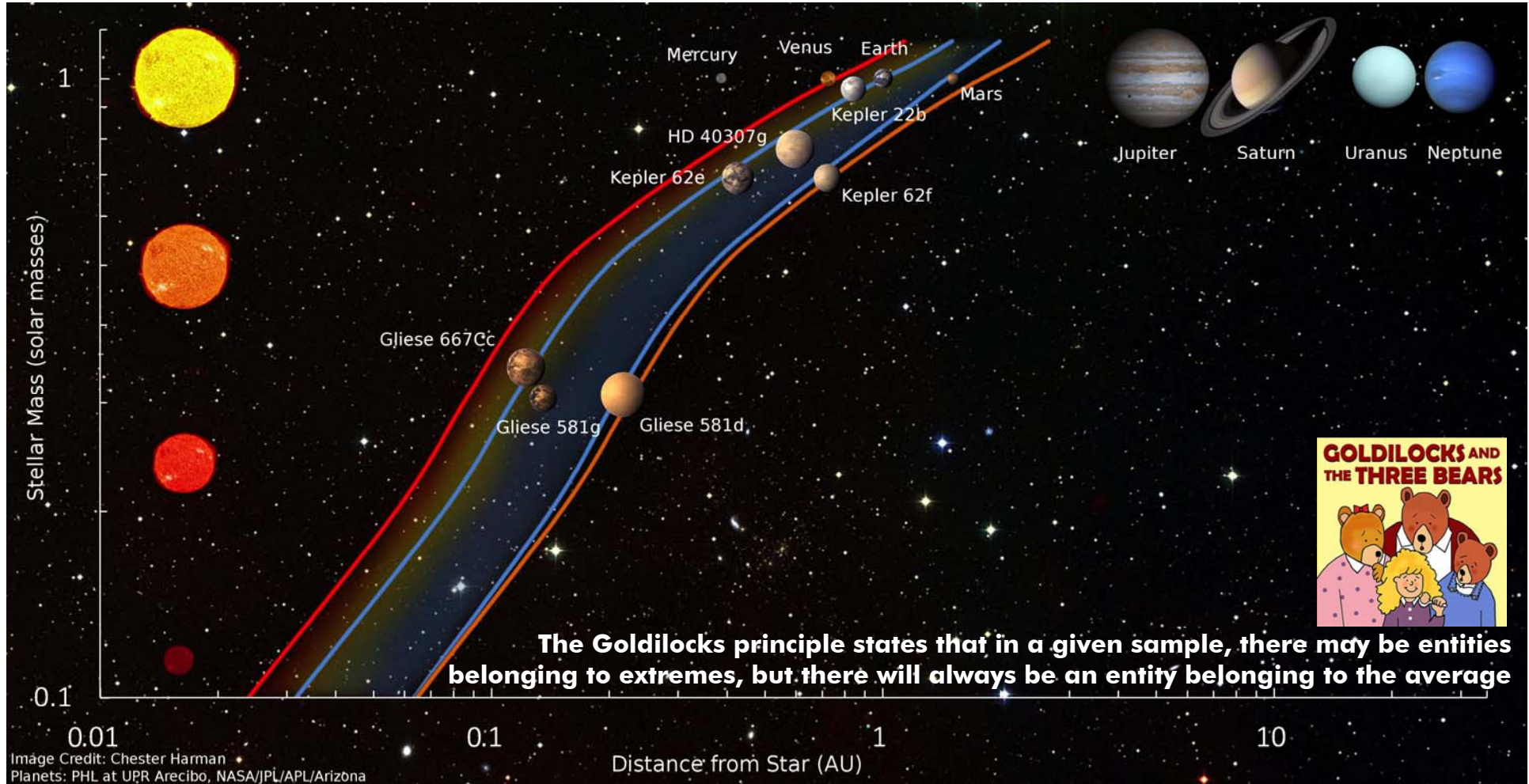
Diagnose

Einige mit relativistischem Dopplereffekt und anderen Methoden entdeckte Exoplaneten

Goldilocks Principle Habitable Zone

Symptome

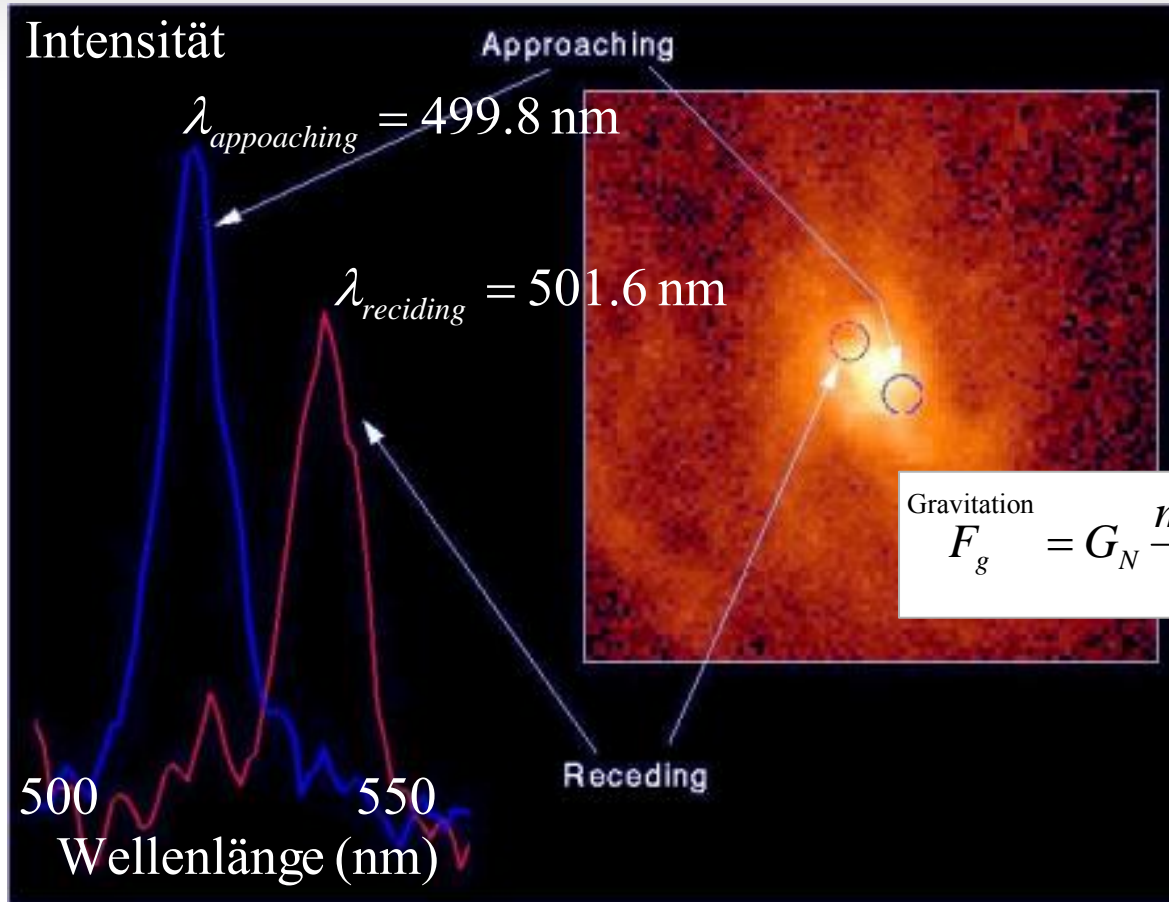
Für Leben muss Wasserdampf auf Oberfläche des Planeten vorhanden sein



Diagnose

Strahlungsleistung der Sonne entscheidend für Abstand zu habitabler Zone

Staubmantel M87



unverschobene Position
 $\lambda_0 = 500.7 \text{ nm}$
 $\Delta\lambda_{SRT} = 0.9 \text{ nm}$
 relativistische Dopplerverschiebung

$$v_{dust} = \frac{\Delta\lambda_{SRT}}{\lambda_0} c = 5.39 \cdot 10^5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$\text{Gravitation } F_g = G_N \frac{m_{dust} \cdot M_{hole}}{r_{dust}^2} = m_{dust} \frac{v_{dust}^2}{r_{dust}} = \text{Zentripetalkraft } F_R$$

Masse Schwarzes Loch

$$M_{hole} = \frac{v_{dust}^2 r_{dust}}{G_N} = 4.12 \cdot 10^{39} \text{ kg}$$

Masse der Sonne $1.99 \cdot 10^{30} \text{ kg}$

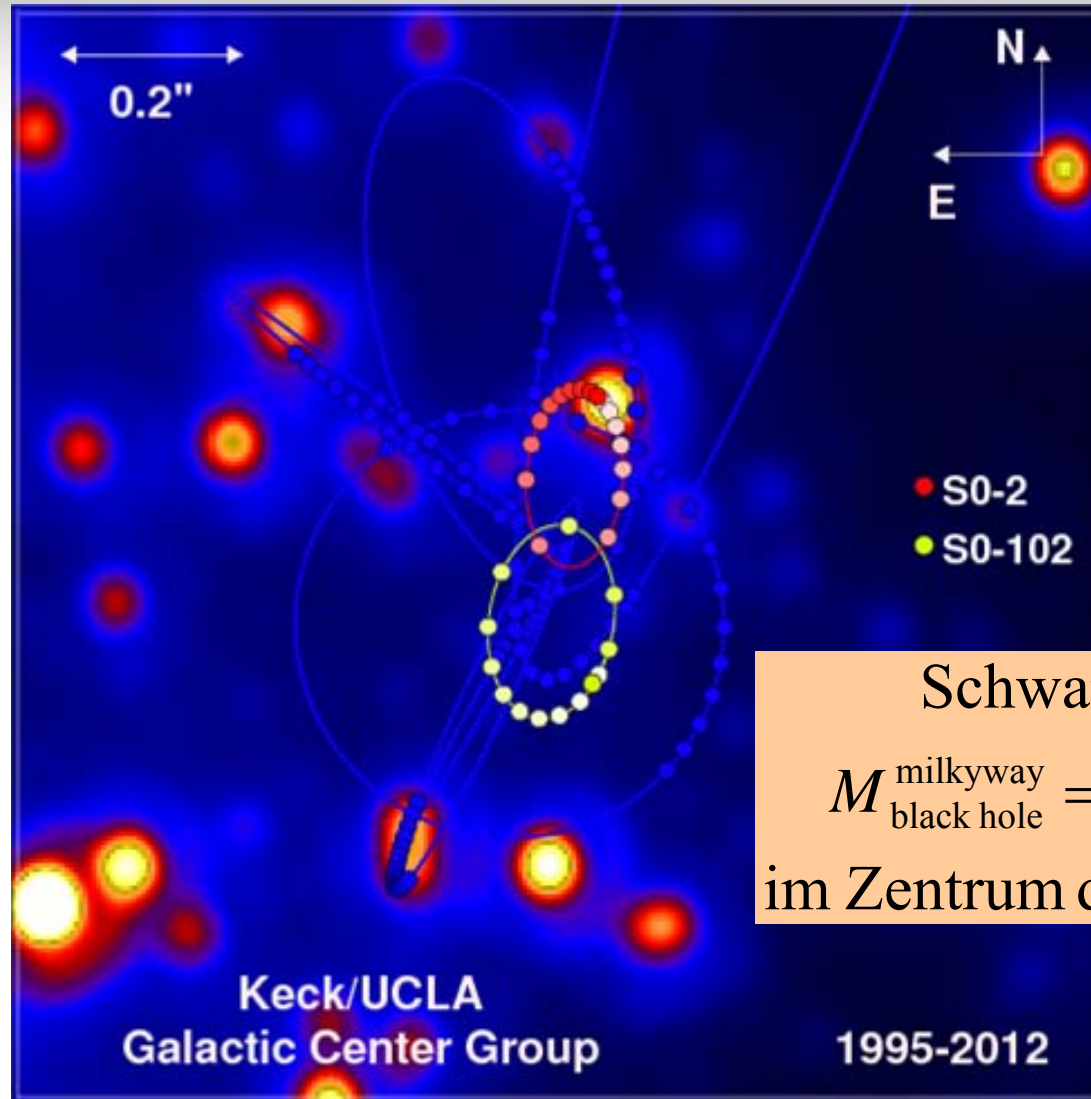
- Diagnose**
- im Zentrum der Galaxis M87 befindet sich Schwarzes Loch
 - Masse ist extrem hoch mit 2×10^9 Sonnenmassen
 - Objekt in M87 Faktor 1000 schwerer als schwarzes Loch im Zentrum Milchstrasse

Staubmantel M87



Strahlung relativistischer Elektronen aus Schwarzem Loch in M87

Zentrum der Milchstrasse Black Hole



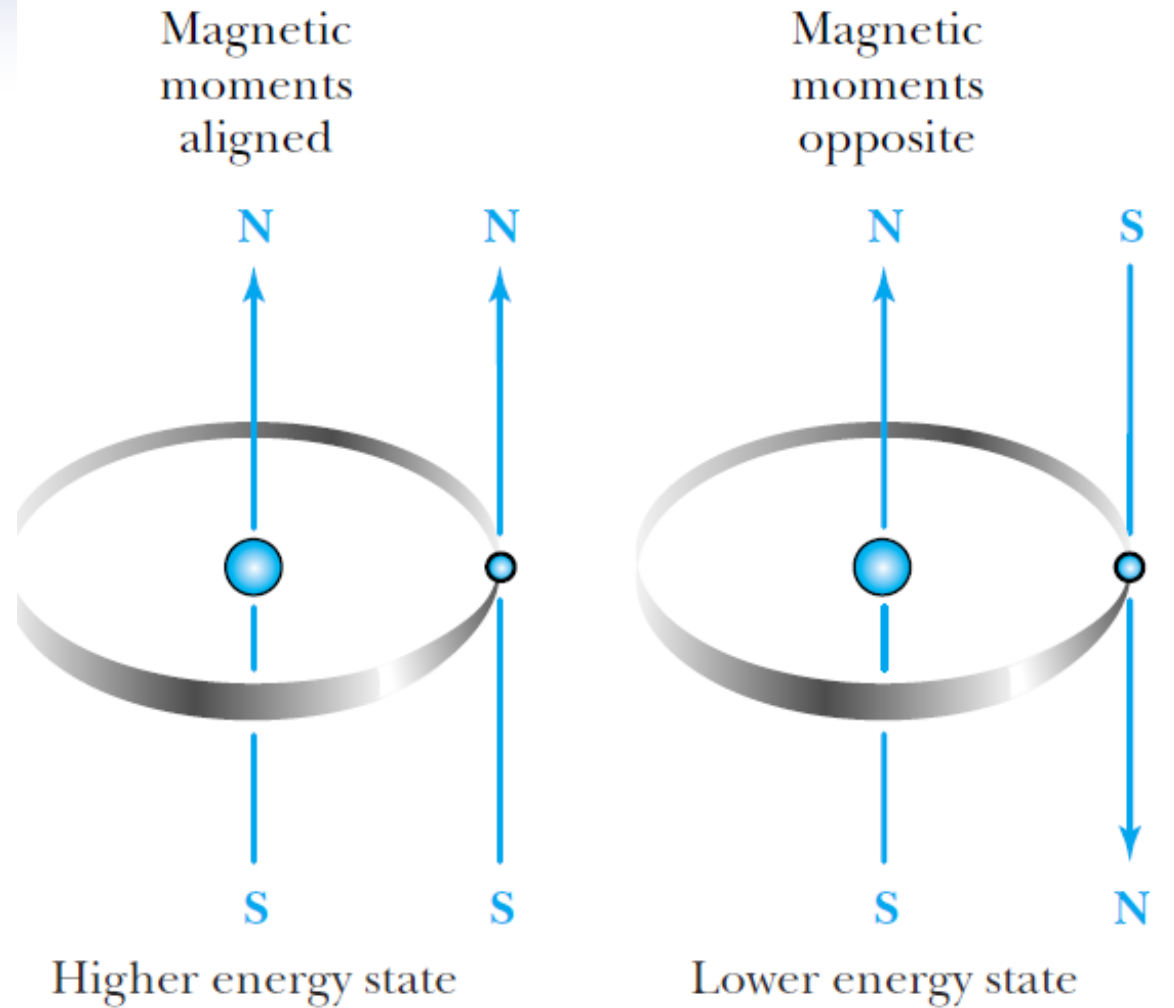
Schwarzes Loch

$$M_{\text{black hole}}^{\text{milkyway}} = 4 \cdot 10^6 M_{\text{Sonne}}$$

im Zentrum der Milchstrasse



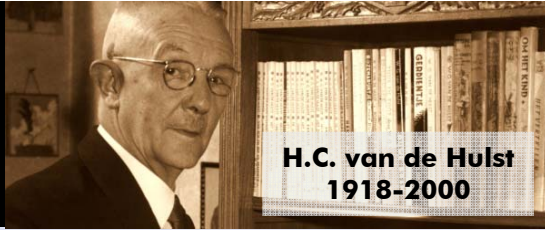
Kern- und Elektronenspin



elektro



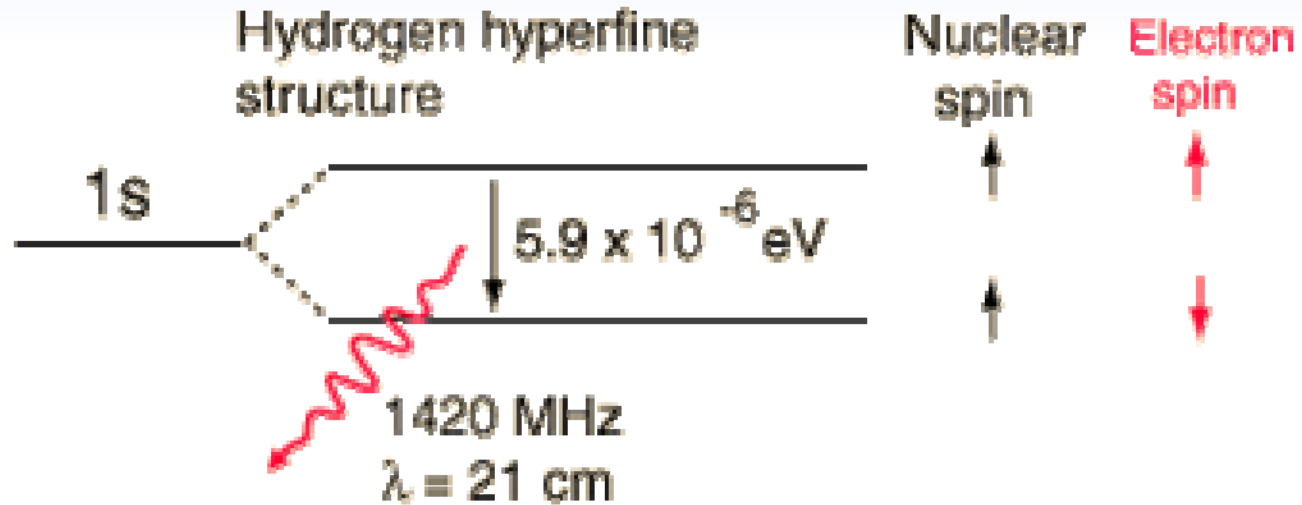
Diagnose
Im Wasserstoffatom können Kernspin und Elektronenspin zwei Einstellungen einnehmen



H.C. van de Hulst
1918-2000

Idee 1944

21-cm Wasserstofflinie



Energieunterschied

$$\Delta E_{spin-flip} = E_{\uparrow\uparrow} - E_{\uparrow\downarrow} = 5.9 \cdot 10^{-6} \text{ eV}$$

Unterschied in Frequenz und Wellenlänge

$$\Delta \nu_{spin-flip} = 1420 \text{ MHz}$$

$$\Delta \lambda_{spin-flip} = 21.1 \text{ cm}$$

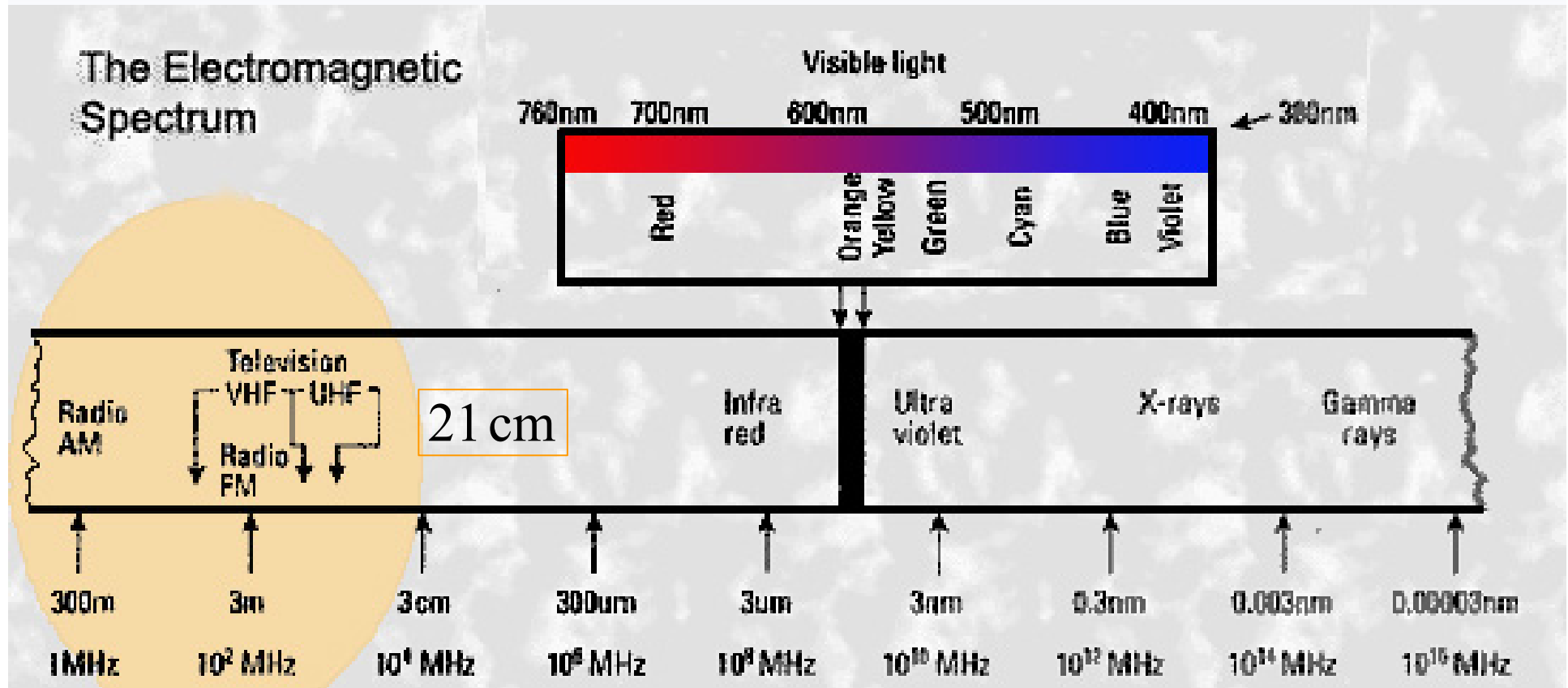
Faustformel

$$\text{Photonenenergie [eV]} = \frac{1240 \text{ nm}}{\text{Wellenlänge [nm]}}$$

Diagnose

- Energieniveau bei paralleler Einstellung geringfügig höher
- beim *spin-flip* Übergang wird Photon im Radiobereich bei 21 cm abgestrahlt

Elektromagnetisches Spektrum



Nachweis Ewen und Purcell 1951

21-cm Wasserstofflinie

Symptome

- interstellares Medium besteht zu **90%** aus Wasserstoff
- Dichte atomaren Wasserstoff in Milchstrasse beträgt **1 Atom/cm³** bei Temperaturen von **500 K**



Radioantenne, die von Ewen und Purcell verwendet wurde, um die 21cm Emissionslinie des *spin-flip* Übergangs in atomaren Wasserstoff zu beobachten

Diagnose

- langlebiger Zustand hat enorm hohe Lebensdauer von **10⁷ Jahren**
- Linienbreite der 21 cm Linie dadurch extrem gering (mehr dazu später bei Thema Heisenberg)
- geeignet für hochgenaue Messung Dopplerverschiebung

Observation of a Line in the Galactic Radio Spectrum: Radiation from Galactic Hydrogen at 1,420 Mc./sec
H. I. Ewen and E.M. Purcell Nature 168, 356 (1951)

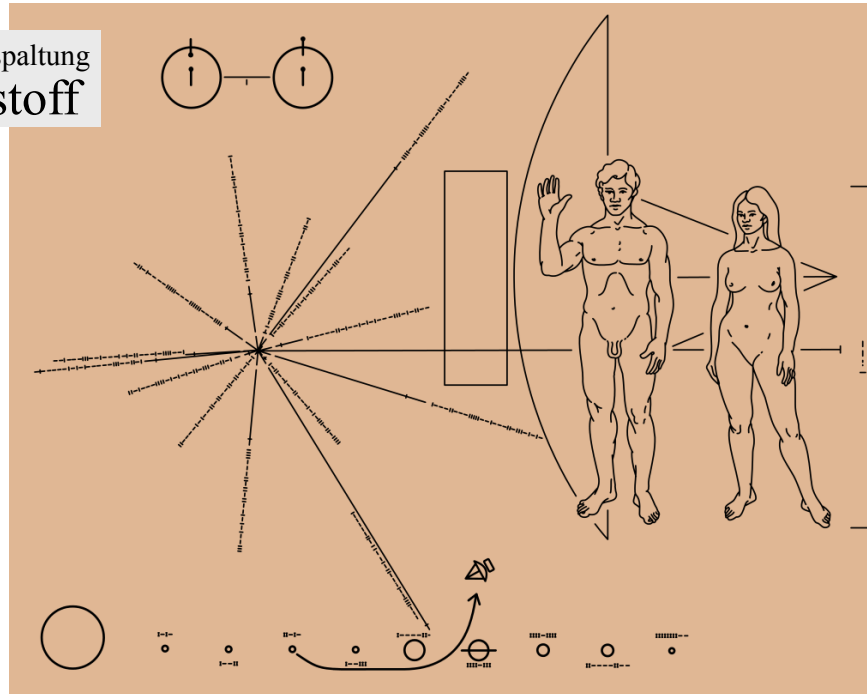


21-cm Wasserstofflinie Pionier-Plaketten

Symptome

- Platten an Bord der interstellaren Raumsonden Pioneer 10 und Pioneer 11 in 1972
- später auch angebracht an Voyager 1 und Voyager 2
- Informationen über Menschheit und ihre Position im Universum

Hyperfeinaufspaltung
Wasserstoff



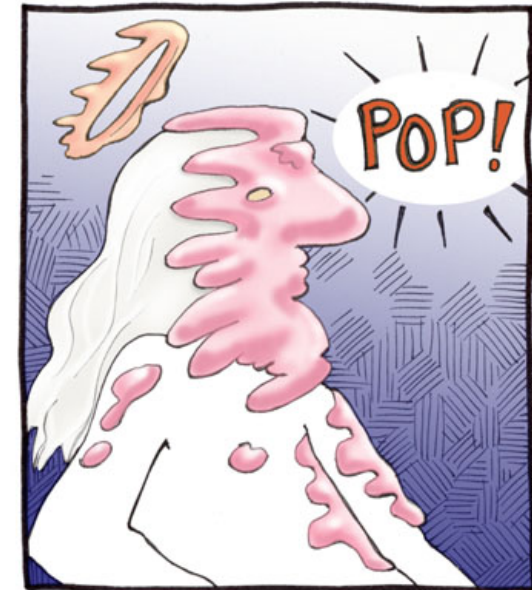
Diagnose

- Darstellung Sonnensystems mit neun Planeten
- Reiseroute Raumsonde
- Position Sonne bezogen auf 14 Pulsare und Zentrum Milchstraße
- Hyperfeinstrukturüberganges Wasserstoffatom

Thema Relativistischer Dopplereffekt

Hubble-Konstante

Parallel



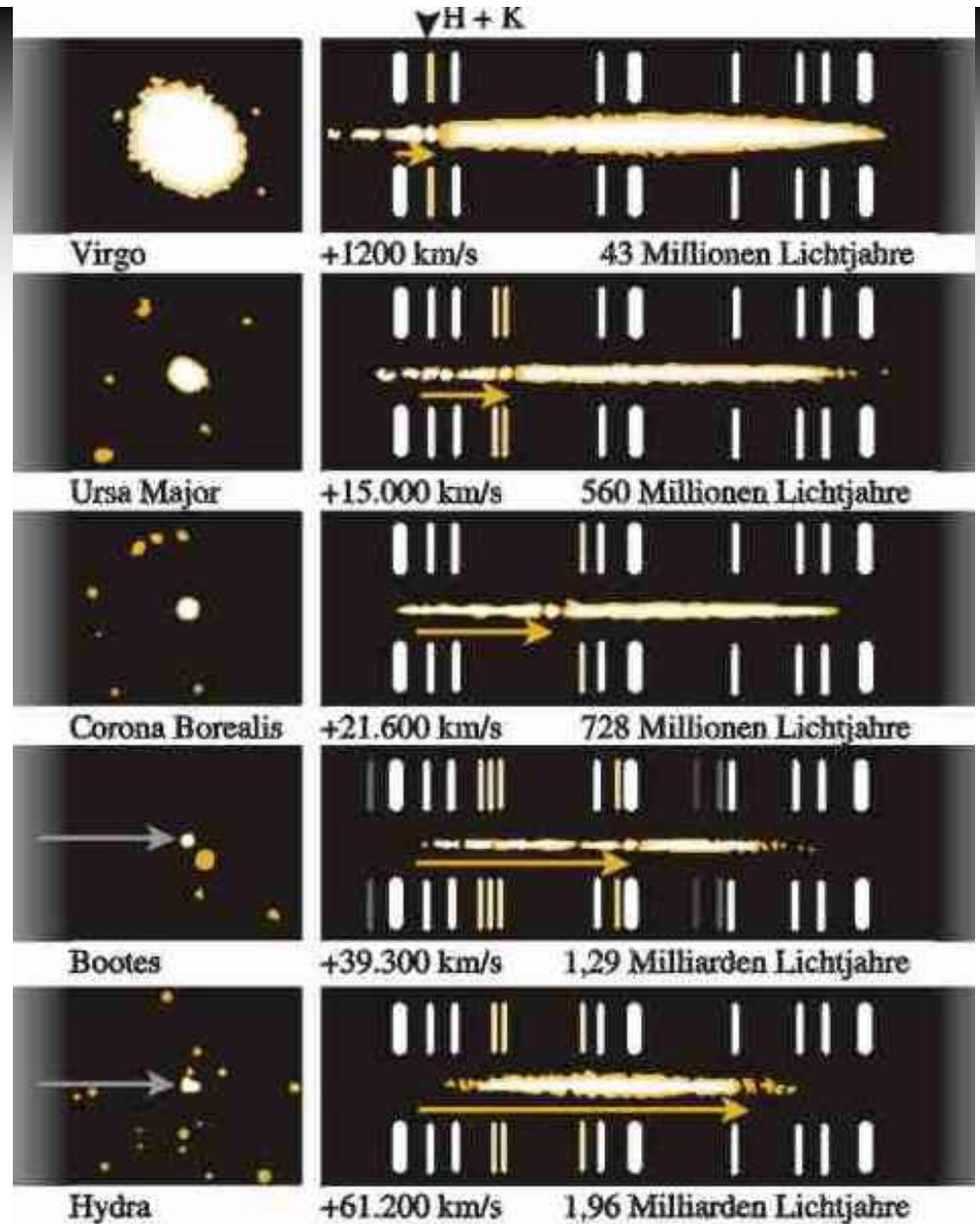
relativistisch betrachtet
Dopplereffekt

Symptome
 Messung der Rotverschiebung von
 Absorptionslinien des Elements Kalzium



Geschwindigkeit des Sterns

$$v_{stern} = \frac{\Delta \lambda_{SRT}}{\lambda_{ruhend}} c$$



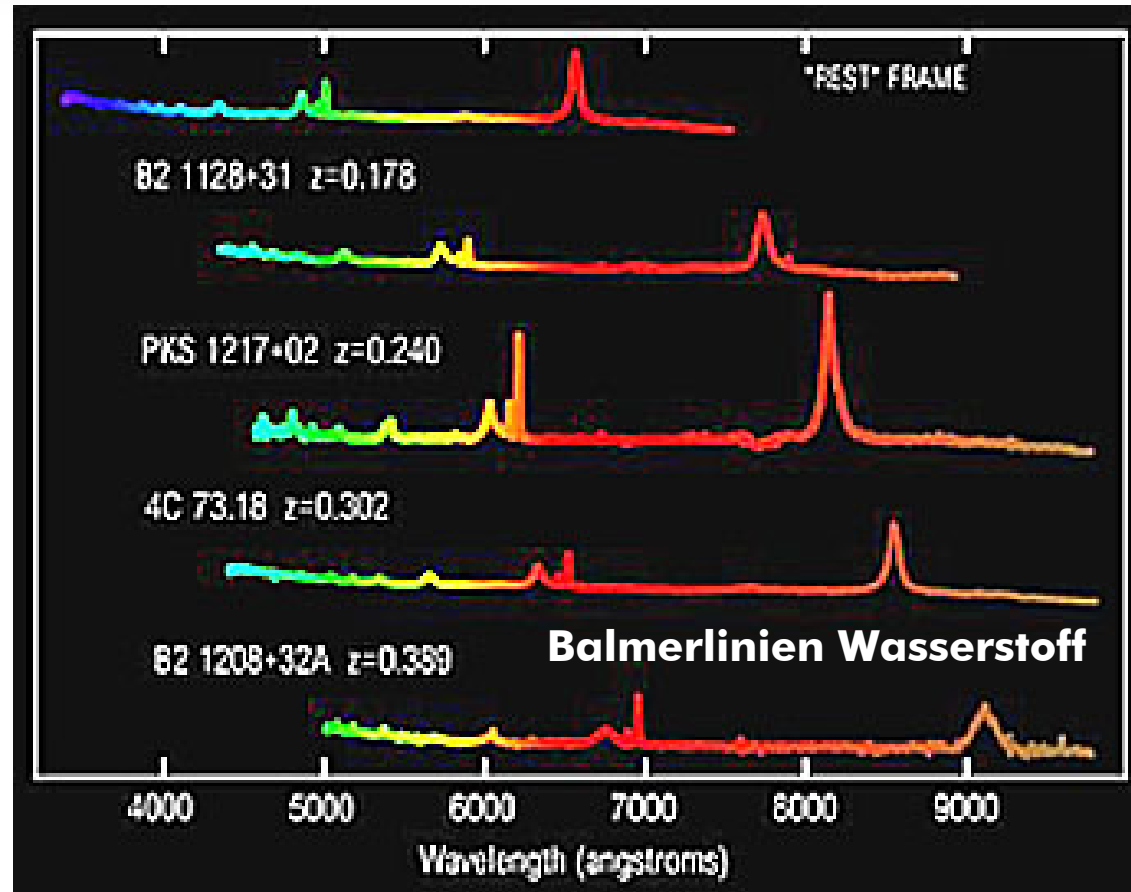
Diagnose

- Emissionslinien bestimmter Sterne sind für Beobachter stark ins Infrarote verschoben (Pfeil)
- aus Frequenzverschiebung kann auf Geschwindigkeit des Sterns geschlossen werden

Atomare Spektrallinien

Symptome

Atomare Emission wie Balmerreihe von Wasserstoff sind Fingerabdruck der Elemente



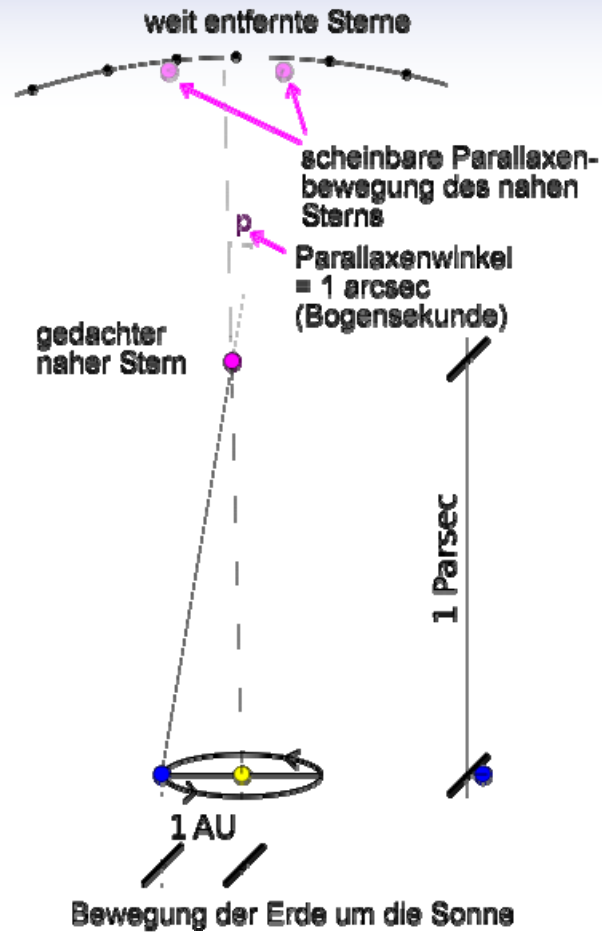
kosmologische Rotverschiebung

$$z_{SRT} = \frac{\lambda_{observed} - \lambda_0}{\lambda_0}$$

Diagnose

- Emission entfernter Sterne zeigen durch relativistischen Dopplereffekt
- Frequenzverschiebung möglicherweise Maß für astronomische Entfernung

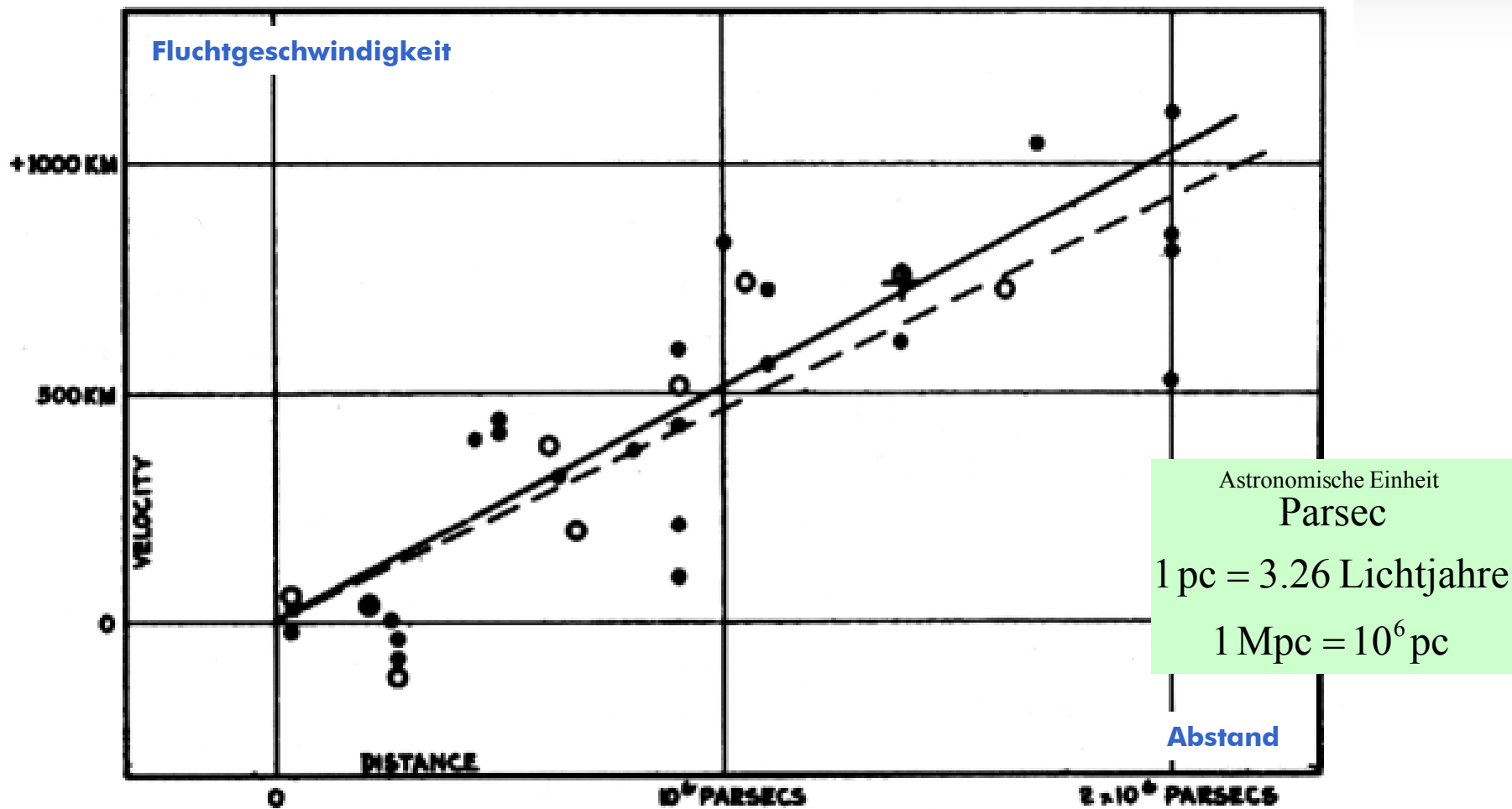
Astronomisches Längenmaß Parsec



Diagnose

- Parsec (*parallax second*) ist astronomisches Längenmaß
- Entfernung, aus der der mittlere Erdbahnradius unter Winkel von einer Bogensekunde erscheint
- diese Distanz entspricht etwa 3.26 Lichtjahren

Beobachtungen von Hubble (1929) Expansion des Universums



Diagnose

Erste Messungen zeigen linearen Zusammenhang zwischen Entfernung und Rotverschiebung



Expansion des Universums

Hubble-Konstante

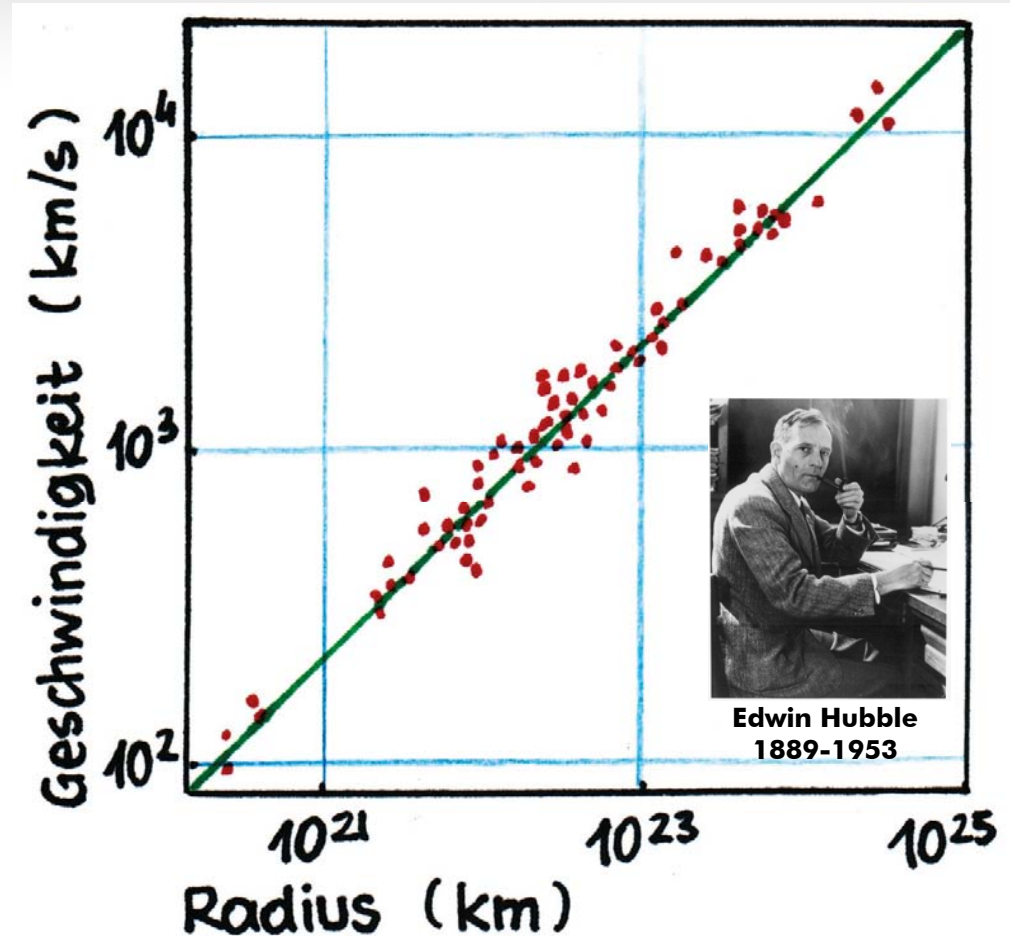
$$H_0 = \frac{\text{Hubble-Konstante} \cdot \text{Fluchtgeschwindigkeit}}{\text{Entfernung}}$$

Dimensionskontrolle

$$[H_0] = \left[\frac{\text{m}}{\text{s} \cdot \text{m}} \right]$$

Steigung der Geraden
Hubble Konstante

$$H_0 = 74.3 \frac{\text{km}}{\text{s} \cdot \text{Mpc}}$$

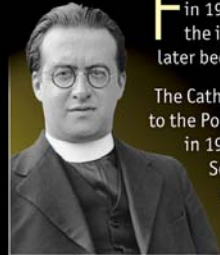


Diagnose

- nach dem Urknall hat sich Universum ständig ausgedehnt
- nach Analyse Daten beschleunigte Expansion
- größere Abstände verhindern Sternbildung (Entropietod des Universums)

Georges Lemaître

(1894-1966) Astronomer, Physicist, Catholic Priest
FATHER OF THE BIG-BANG & MODERN COSMOLOGY



Fr Georges Lemaître, a Belgian priest and astrophysicist, published a paper in 1927 in the *Annals of the Scientific Society of Brussel* that first presented the idea of an expanding cosmos. In 1931, Fr Lemaître proposed what later became known as the Big Bang theory of the origin of the universe.

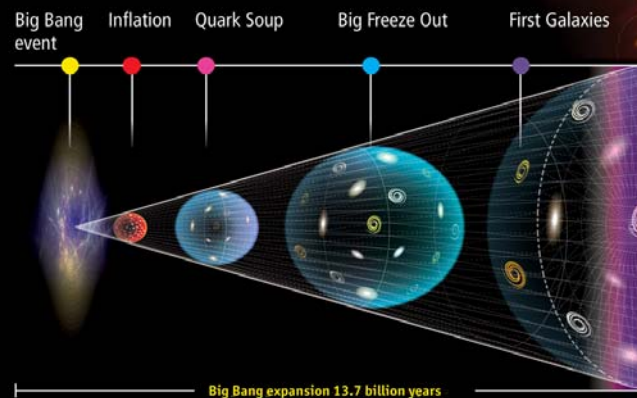
The Catholic Church honoured Fr Lemaître's work. He was elected to the Pontifical Academy of Sciences in 1936 and named prelate in 1960. By contrast, in 1948, astronomers in the atheist Soviet Union were urged to condemn the Big Bang as a reactionary theory helping clericalism, a hostility shared by many scientists and philosophers worldwide until the 1960s.

Besides showing the compatibility of faith and science, the case of Fr Lemaître illustrates the way in which minds and cultures shaped by the belief that God is a Trinity of reason and love have proved fruitful in perceiving order in the universe. Moreover, it is arguable that belief in God who is beyond creation has freed us to theorise about the causation and change of the cosmos as a whole, rather than simply accepting the totality of material reality as an eternal, unchanging given.

“Scientific progress is the discovery of a more and more comprehensive simplicity.”

Fr Georges Lemaître

Diagram of 'BIG BANG' showing stages of the universe expansion



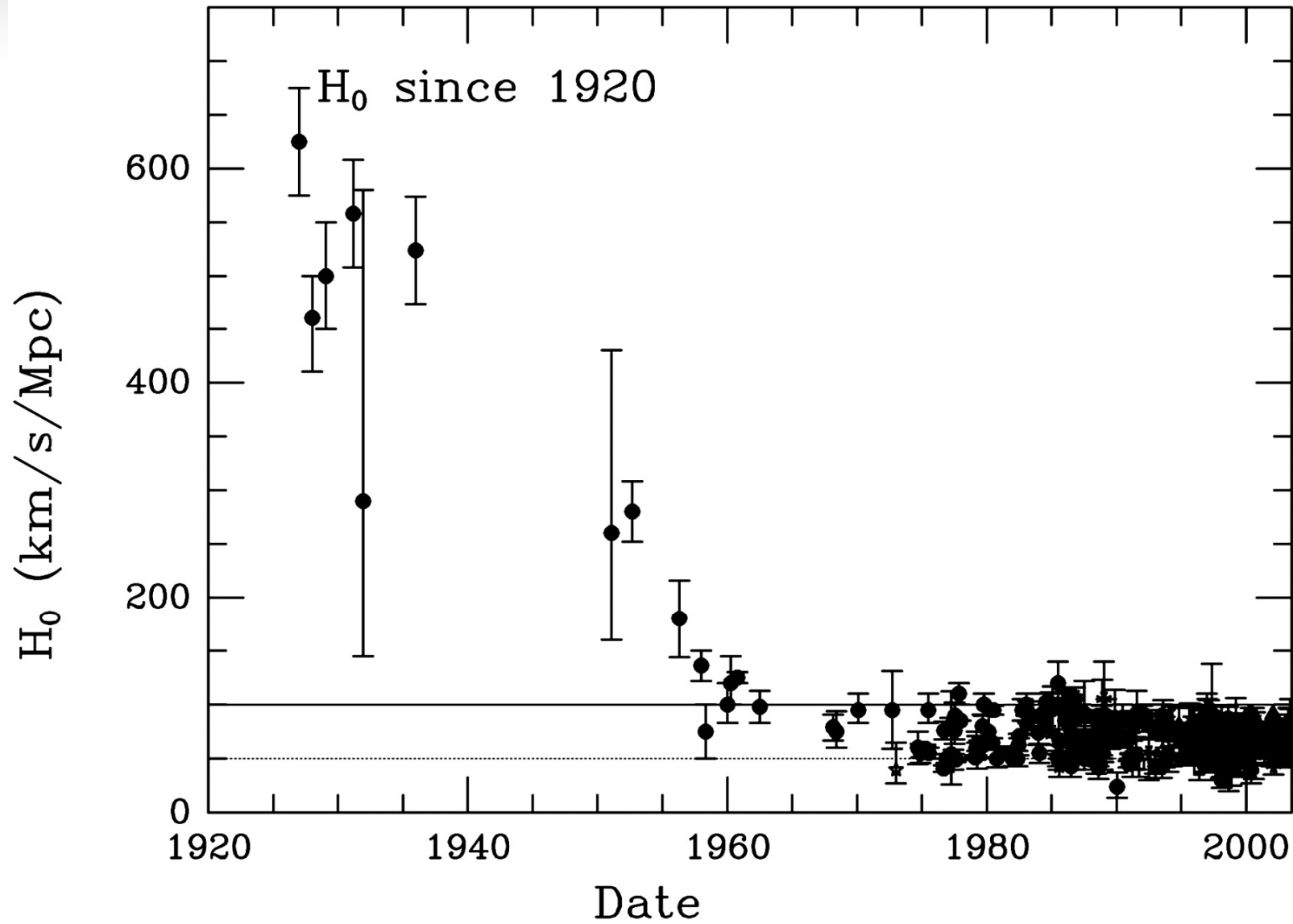
Key Feature:

Fr Lemaître predicted in 1927 that the recessional velocity of distant galaxies would increase in proportion to their distance, like the separation of spots on an expanding balloon. Two years later Edwin Hubble confirmed the existence of that law, which has since been validated by space-based telescopes to a high degree of accuracy.

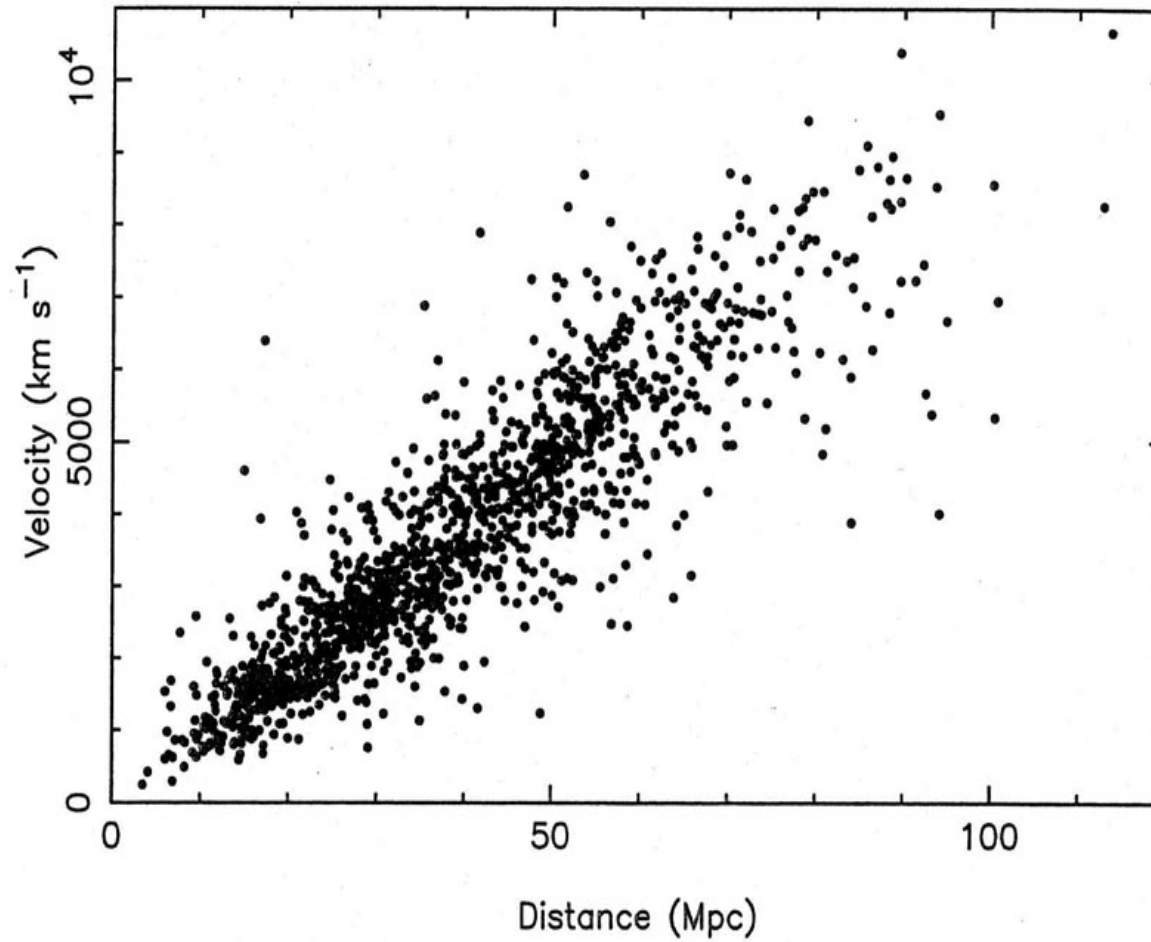
Diagnose

Historisch gesehen fand Priester George Lemaitre 1927 als erster das Hubble-Gesetz

Expansion des Universums Hubble-Konstante

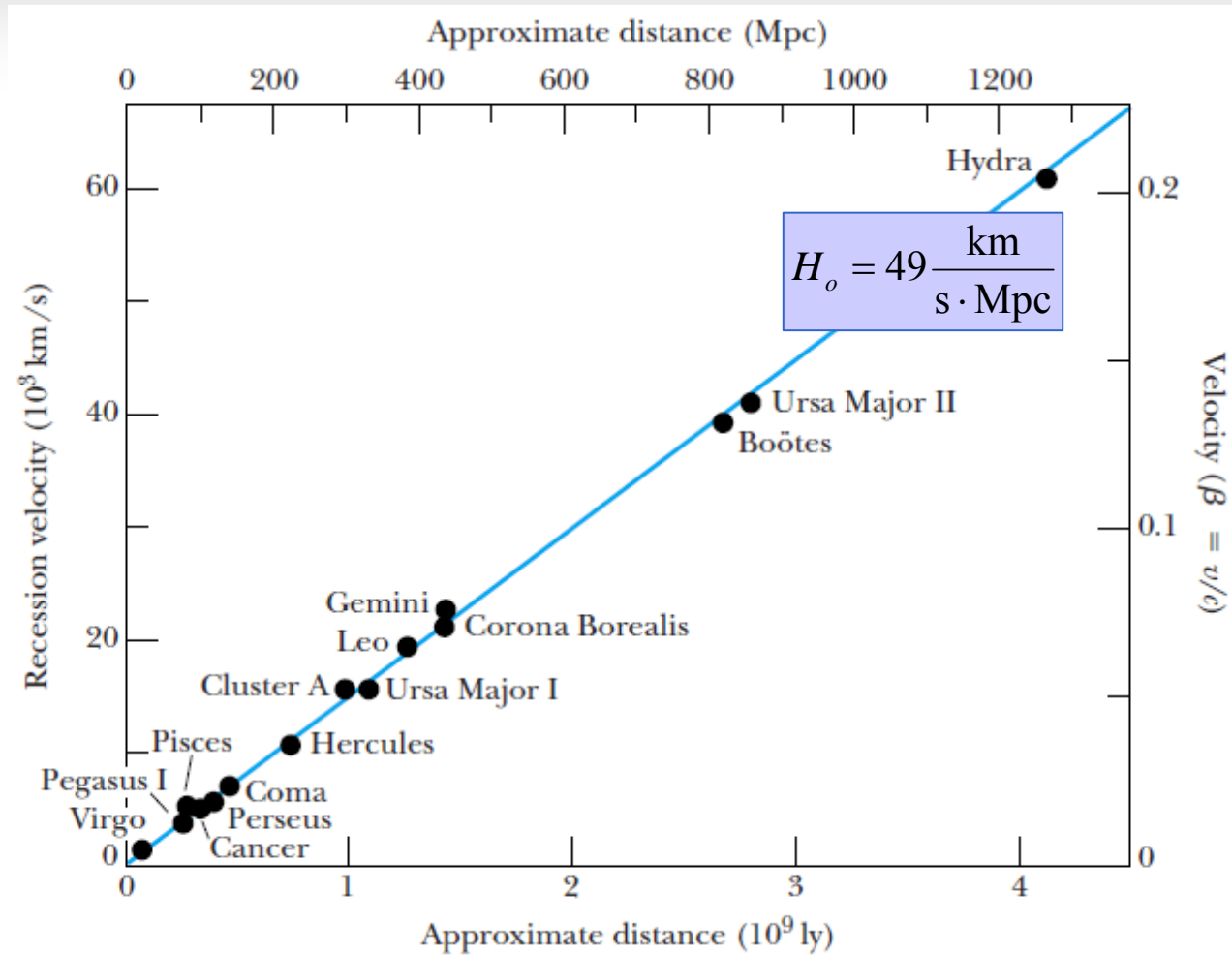


Expansion des Universums



Diagnose
Analyse der Hubble-Konstanten für 1355 Galaxien

Expansion des Universums



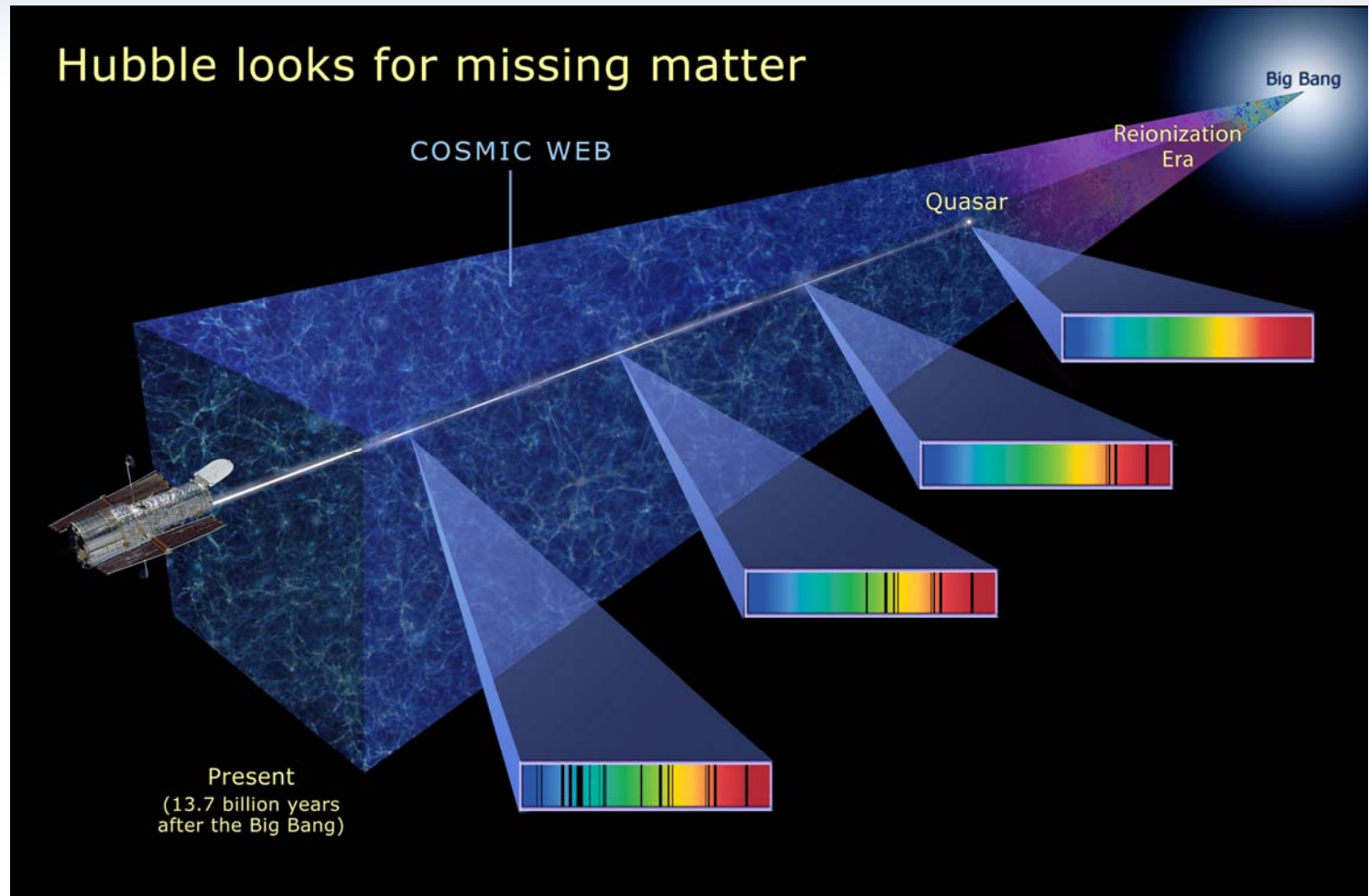
Diagnose

Analyse für 15 Galaxien ergibt eine Hubble-Konstante von $49 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$

Quasare

Atomare Spektrallinien

Extrablatt



Diagnose

- je tiefer man ins Universum schaut, desto größer ist Rotverschiebung der Emissionslinien
- Einblicke in Frühphase des Universums



Expansion des Universums

Hubble-Zeit

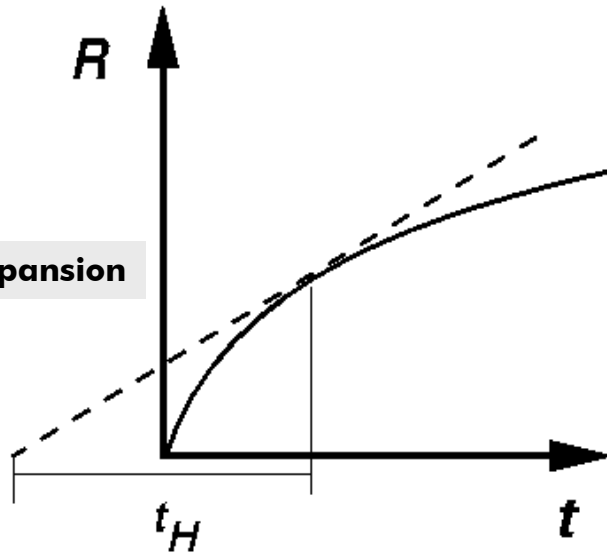
Dimensionskontrolle

$$[H_0] = \left[\frac{\text{m}}{\text{s} \cdot \text{m}} \right] = \left[\frac{1}{\text{s}} \right]$$
$$[t_{H_0}] = \left[\frac{1}{H_0} \right] = [\text{s}]$$

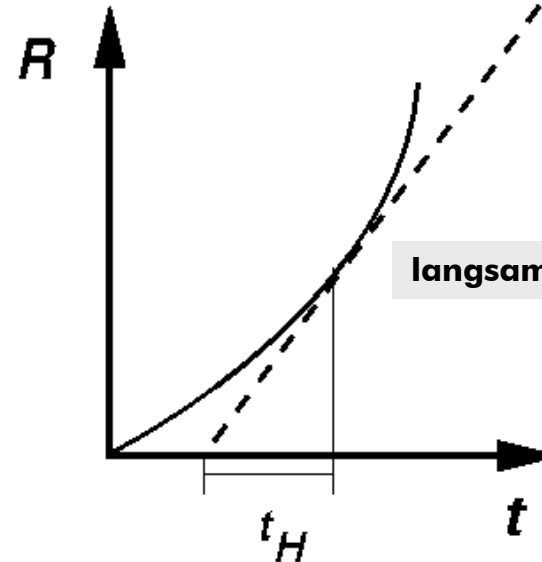
Hubble - Zeit
aktuelles Alter des Universums

$$t_{Hubble} = \frac{1}{H_0} = 1.37 \cdot 10^{10} \text{ Jahre}$$

schnelle Expansion



langsame Expansion

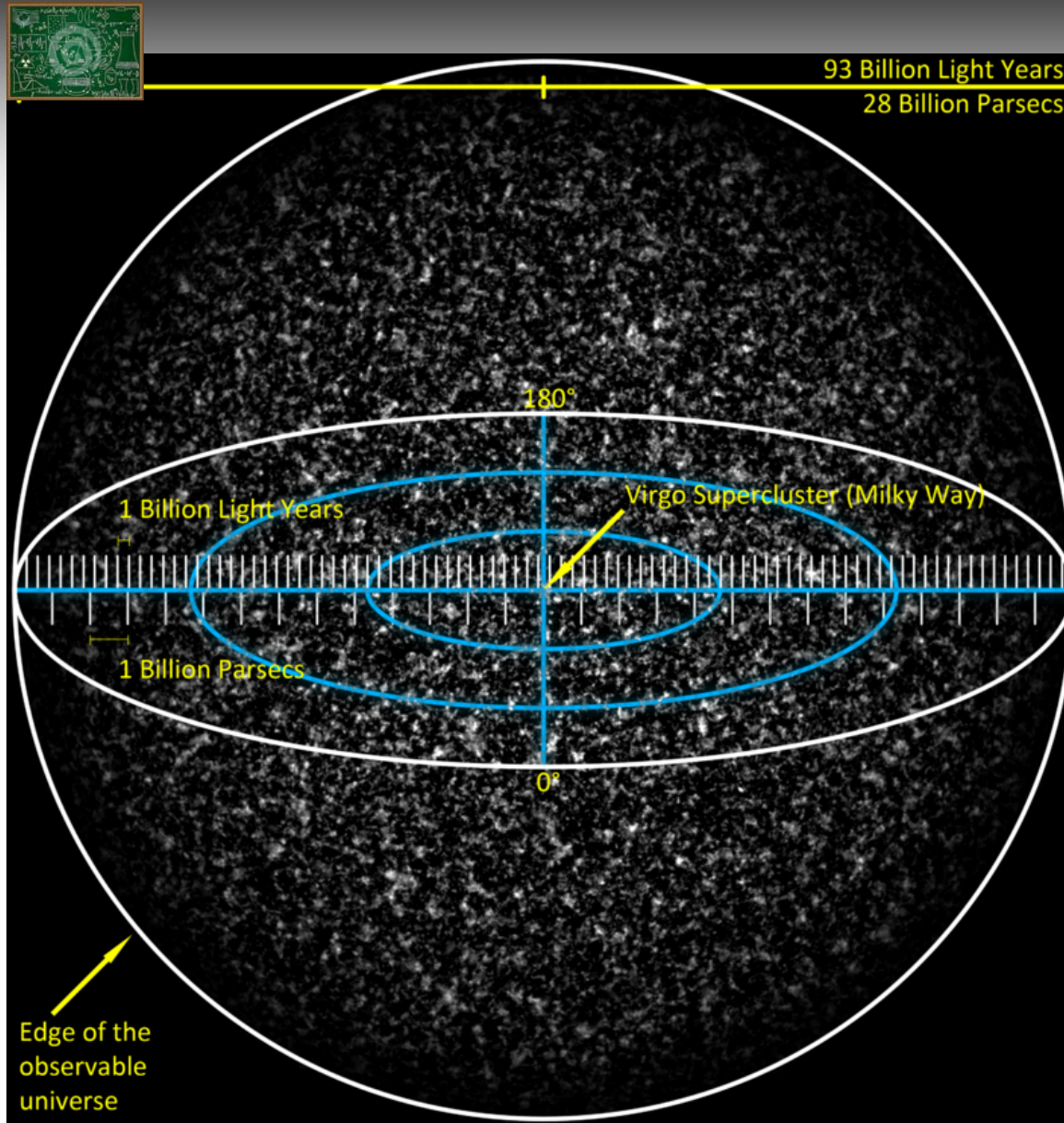


Diagnose

- aufgrund homogener Massenverteilung ergibt sich keine kontinuierliche Expansion
- Hubblezeit ist Schätzwert für Alter des Universums bei konstanter Expansionsrate
- je nach Modell unter oder überschätzt Hubble-Zeit deshalb das Alter des Universums

Expansion des Universums

Hubble-Länge



Dimensionskontrolle

$$[H_0] = \left[\frac{\text{m}}{\text{s} \cdot \text{m}} \right] = \left[\frac{1}{\text{s}} \right]$$

$$[H_L] = \left[\frac{c}{H_0} \right] = \left[\text{s} \frac{\text{m}}{\text{s}} \right] = [\text{m}]$$

Hubble - Länge

aktueller Radius des Universums

$$H_L = \frac{c}{H_0} = 1.23 \cdot 10^{23} \text{ km}$$

Diagnose

Hubble-Länge gibt Schätzwert für Radius des beobachtbaren Universums ab



Expansion des Universums

Symptome

Aufblasen eines Luftballons als vereinfachtes Model Expansion Universum



Diagnose

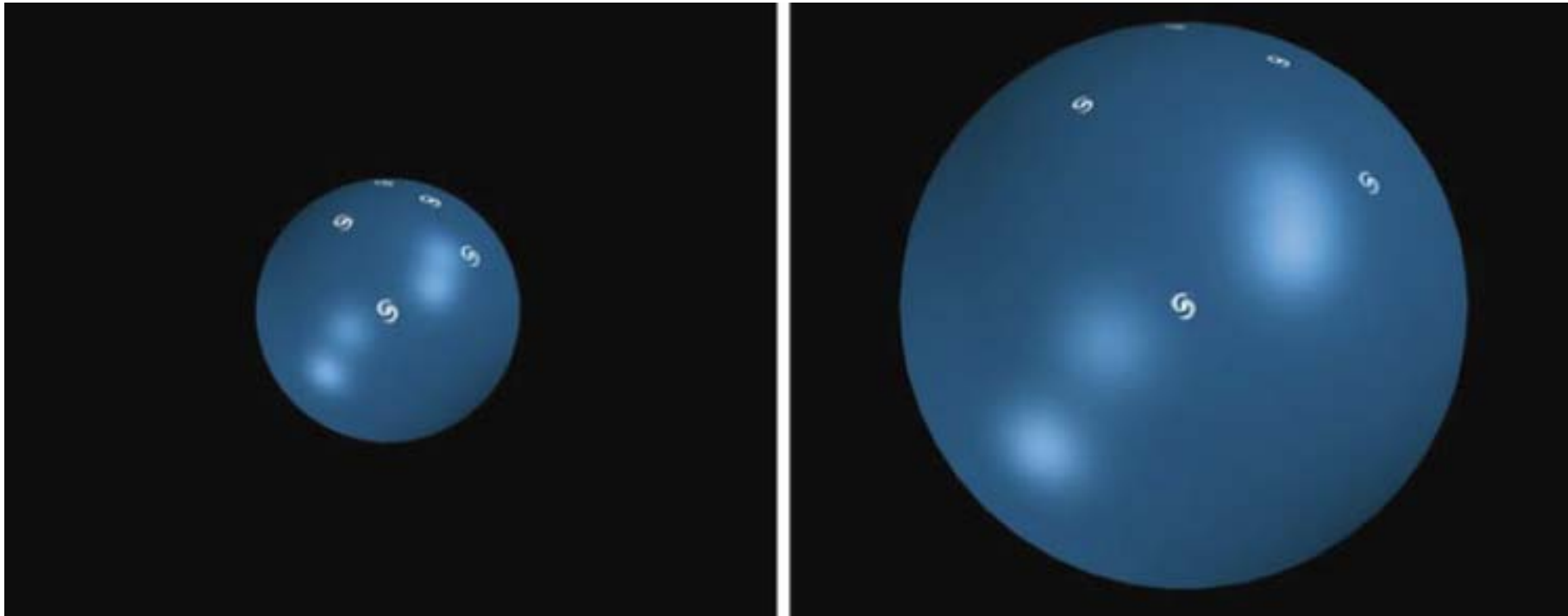
Es ist nicht notwendig im Zentrum des Universums zu sein, um Expansion zu beobachten



Expansion des Universums

Symptome

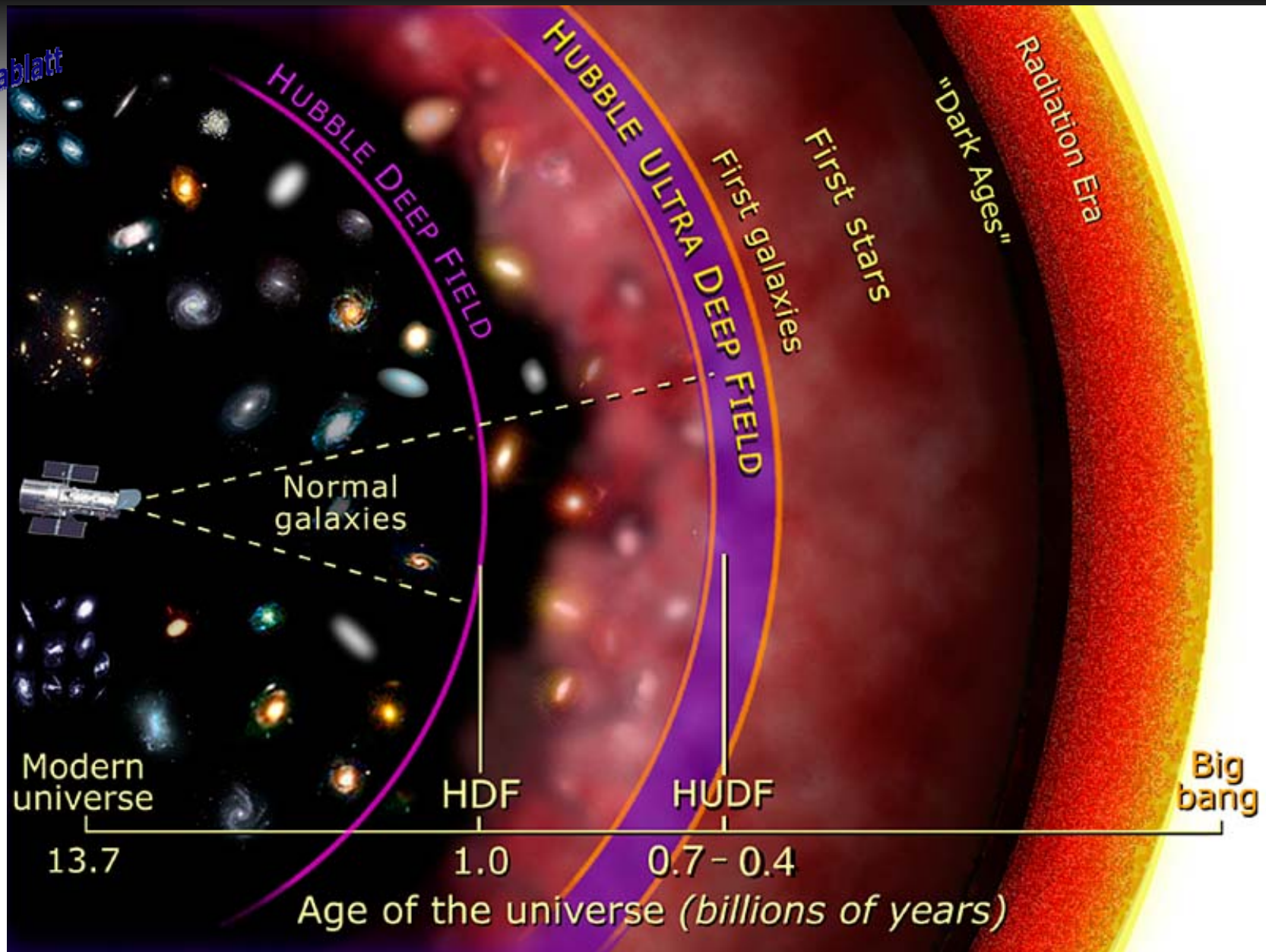
- Modell beschreibt Verhalten nur richtig für die Oberfläche und nicht für Außen- und Innenraum
- dreidimensionales Model am ehesten vergleichbar mit aufgehendem Hefeteig



Diagnose

Im expandieren Universum vergrößern sich Galaxienabstände proportional zu ihrem Abstand

Extrablatt



Diagnose

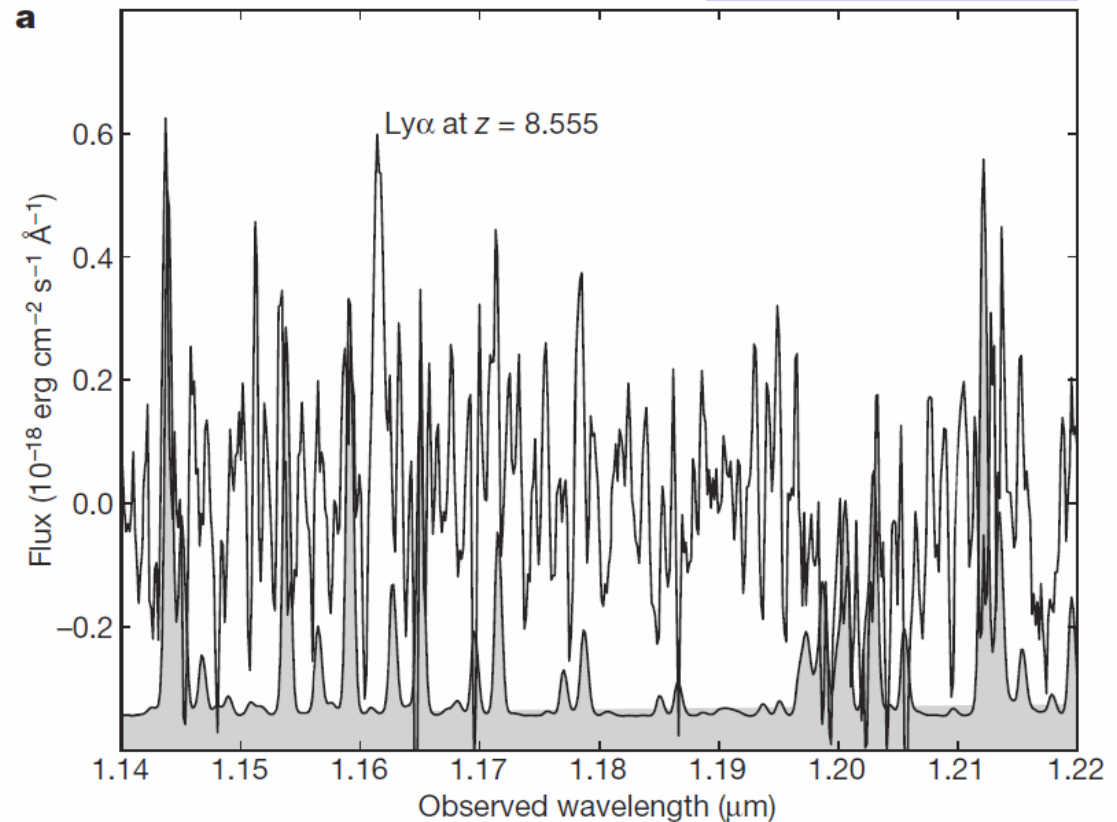
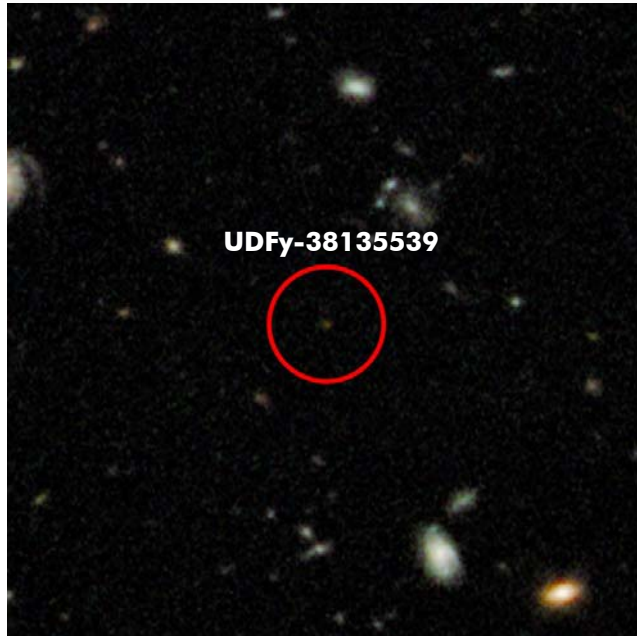
Entdeckung der entferntesten Galaxie UDFy-38135539 im *Hubble-Ultra-Deep-Field*

Kurz nach dem Urknall UDFy-38135539

Symptome

Entdeckung der entferntesten Galaxie im *Hubble-Ultra-Deep-Field*

$$\lambda_{Ly\alpha}^{ruhend} = 121.6 \text{ nm}$$



Berechnung der Rotverschiebung

$$z_{SRT} = \frac{\lambda_{Galaxy} - \lambda_0}{\lambda_0}$$

Diagnose

- Analyse der Wasserstoffemission ergab Rotverschiebung von $z=8.6$
- Licht benötigt 13.1 Milliarden Jahre um Erde zu erreichen
- Galaxie entstand nur 600 Millionen Jahre nach dem Urknall

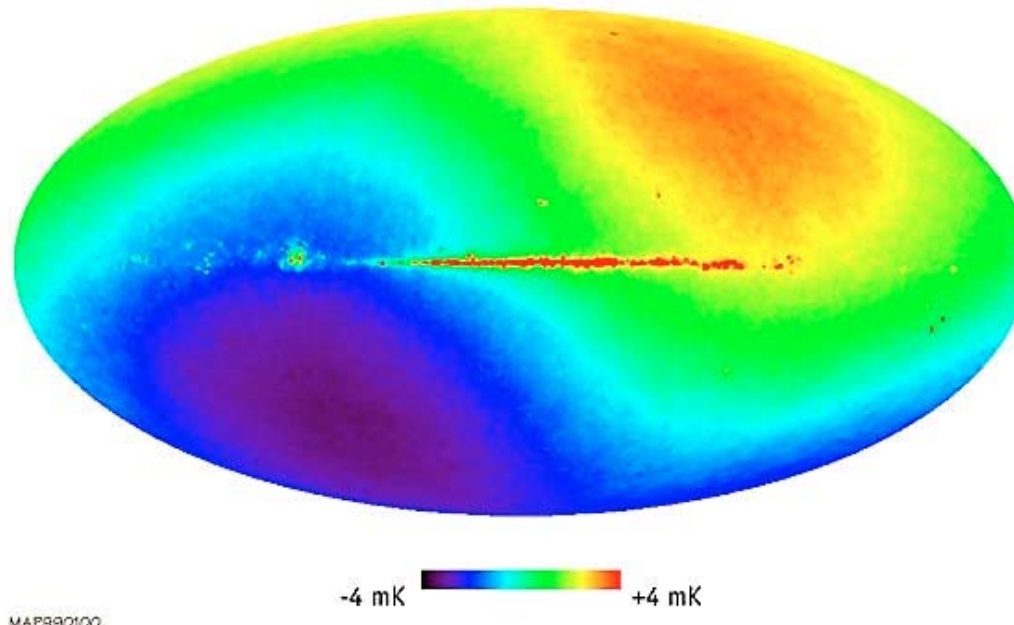
Lehert et al. Nature 467, 940 (2010) Spectroscopic confirmation of a galaxy at redshift $z=8.6$

Wilkinson Microwave Anisotropy Probe

WMAP

Symptome

- das **Universum hat eine mittlere Temperatur von 2.7 K**
- der kosmische Mikrowellenhintergrund zeigt **Anisotropien auf der Skala von 10^{-5}**
- **typisch entwickelt man diese Abweichungen mit sphärischen Harmonischen**
- **die größte Abweichung mit 3.4 mK beobachtet im Dipolsignal**
- **Maximum der Schwarzkörperstrahlung ist in bestimmter Richtung blauverschoben**
- **in entgegen gesetzter Richtung rotverschoben**



Diagnose

- **Ursache ist die Bewegung von Erde und Sonne gegenüber dem isotropen MW-Hintergrund**
- **Vermutung wird durch Beobachtung lokaler Galaxien bestätigt**
- **Schwarzkörperspektrum ist durch relativistischen Dopplereffekt verschoben**
- **ermittelte Geschwindigkeit beträgt 369 km/s**

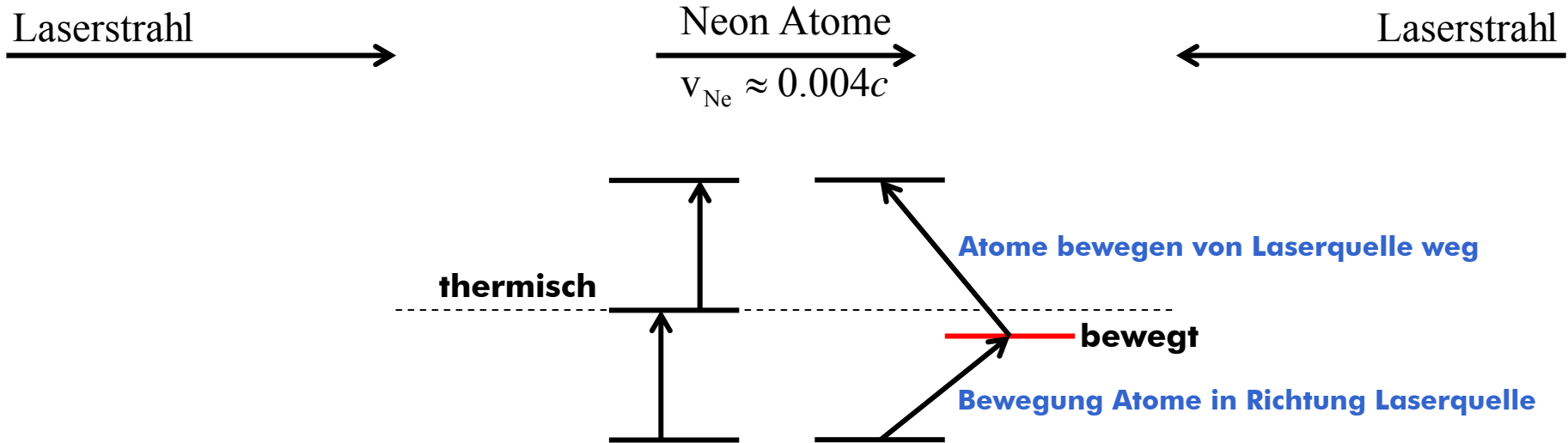
relativistischer Dopplereffekt Kaivola Experiment 1985

Symptome

- Messung des quadratische Terms im relativistischen Dopplereffekt
- Zeitdilatation spielt auch eine Rolle

Potenzreihenentwicklung für $v \ll c$ oder $\beta_{SRT} \ll 1$

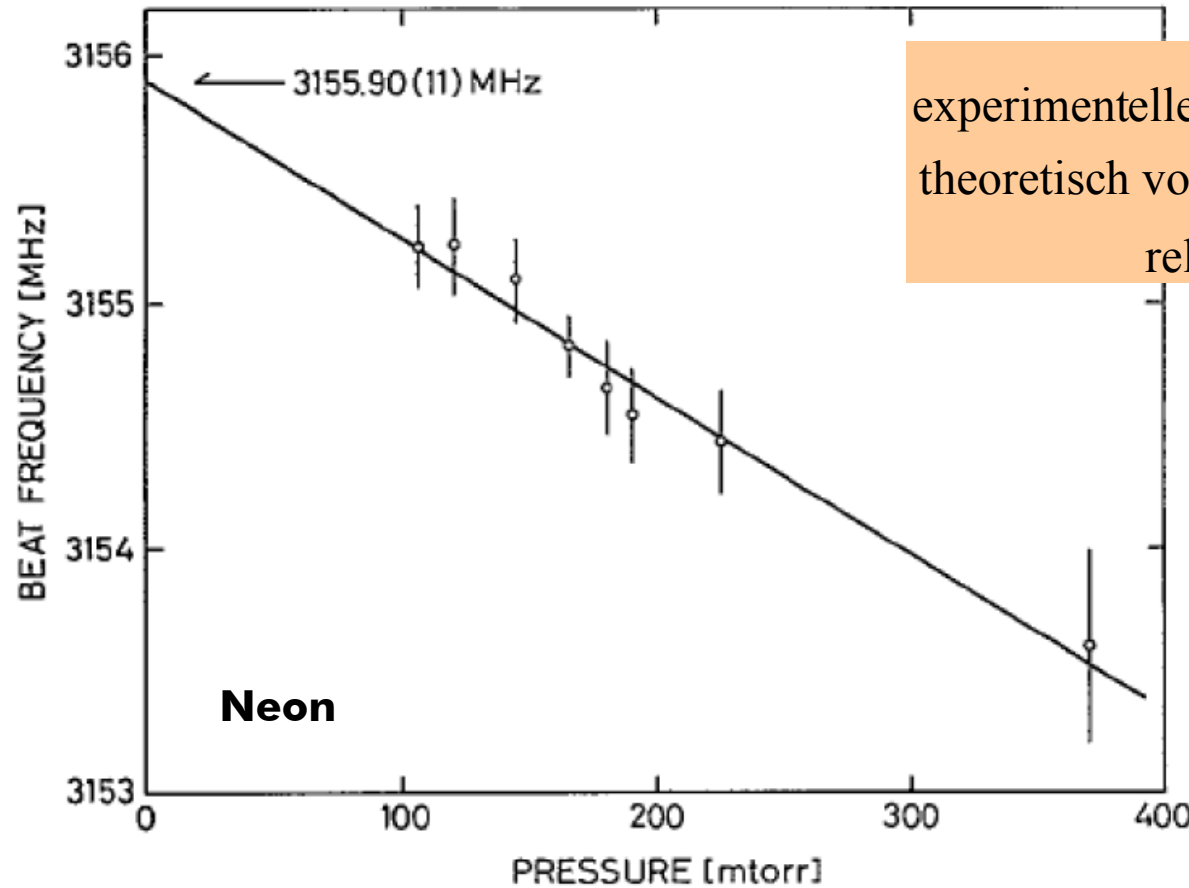
$$f_{bewegt} = f_{ruhend} \left(1 - \beta_{SRT} + \frac{1}{2} \beta_{SRT}^2 \right)$$



Diagnose

- hohe Selektivität durch Zweifarben- Anregungsschema
- 2-Photonenanregung über resonanten Zwischenzustand empfindlich auf Geschwindigkeit

relativistischer Dopplereffekt Kaivola Experiment 1985



Schwebungsfrequenz
 experimentelles Ergebnis : 3235.94 ± 0.14 MHz
 theoretisch vorhergesagt : 3235.89 ± 0.05 MHz
 relativer Fehler : $4 \cdot 10^{-5}$

Schwebung



Diagnose

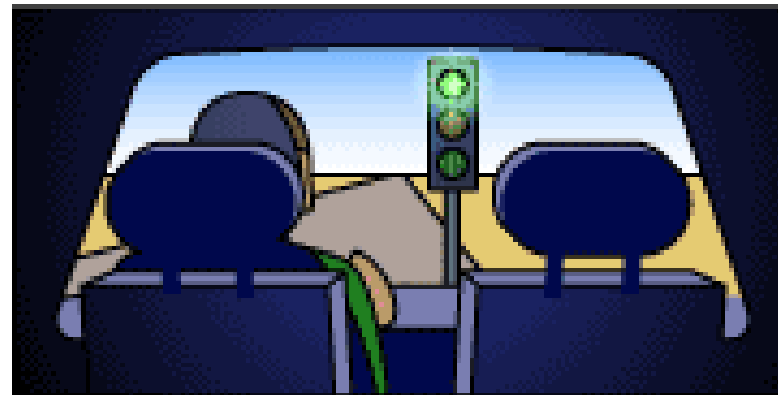
- gleichzeitige Messung an thermischem Neon als Referenz
- Überlagerung der Laserfrequenzen ergibt messbare Schwebungsfrequenz

Thema Relativistischer Dopplereffekt

Relativistische Aberration



$v=0$



$v \approx 0.17c$



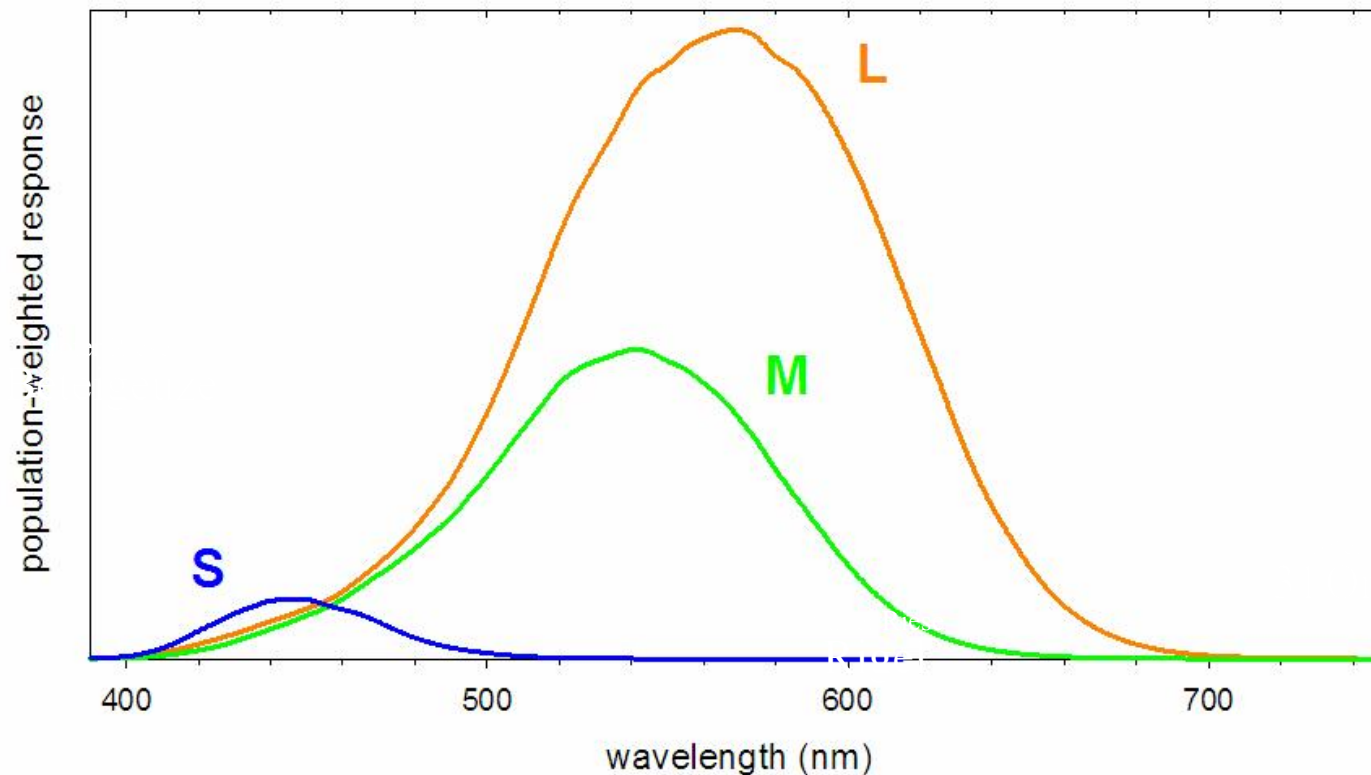
relativistisch betrachtete Sternenreise

Dopplereffekt



Symptome

Zapfen auf der Retina des Auges zeichnen sich durch bestimmte spektrale Empfindlichkeit aus



Diagnose

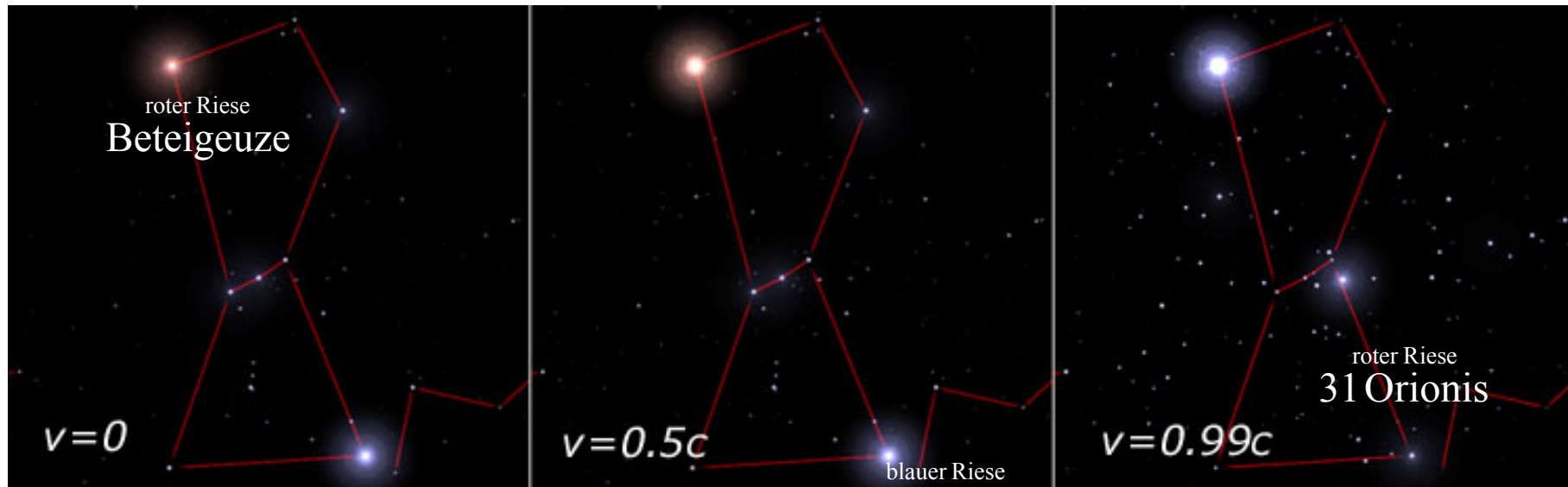
Empfindlichkeit Auge beeinflusst Sternbeobachtung bei relativistischen Geschwindigkeiten

relativistisch betrachtete Sternenreise

Dopplereffekt

Symptome

Relativistischer Dopplereffekt verschiebt Spektrum der Fixsterne ins Ultraviolette



Diagnose

- kältere Sterne für Auge deutlicher erkennbar, weil Spektrum sich ins Sichtbare verschiebt
- heißere Sterne verblassen, weil ihr Spektrum ins ultraviolette verschiebt



relativistische Aberration Lochkamera

Symptome

- bewegte Lochkamera ist durch Längenkontraktion in Bewegungsrichtung verkürzt
- verkürzter Abstand zur hinteren Bildplatte verkleinert die Abbildung

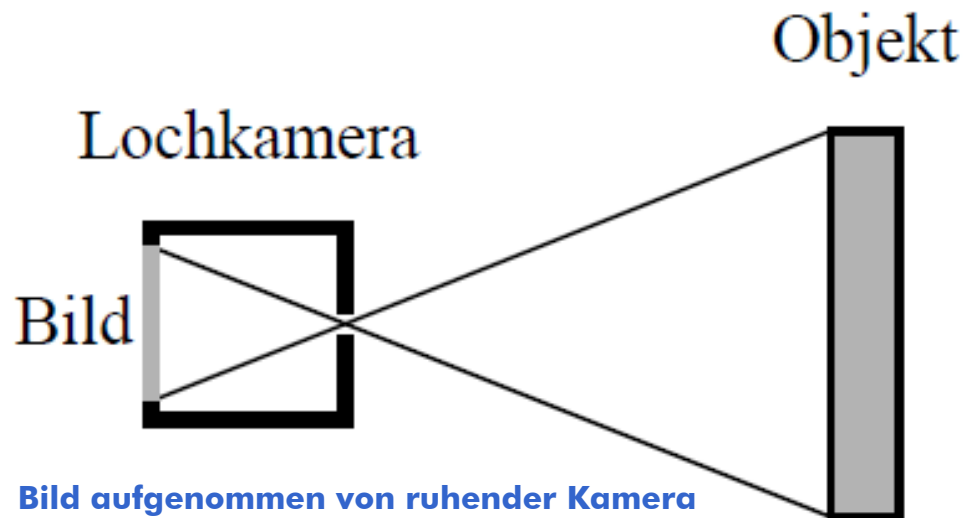


Bild aufgenommen von ruhender Kamera

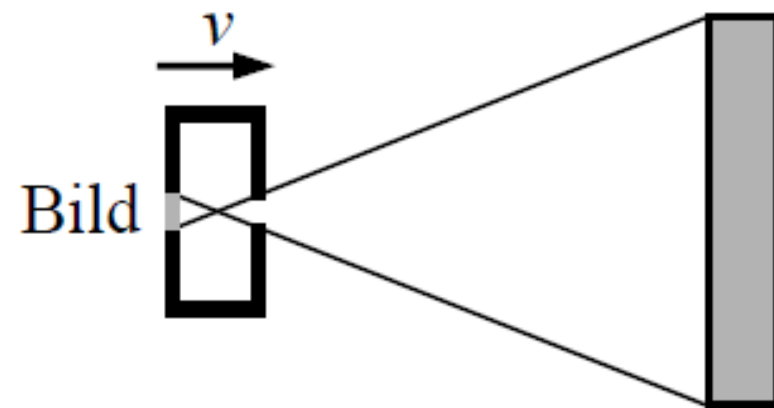


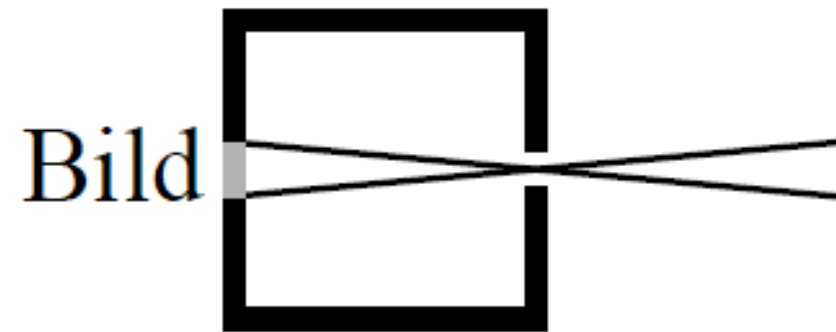
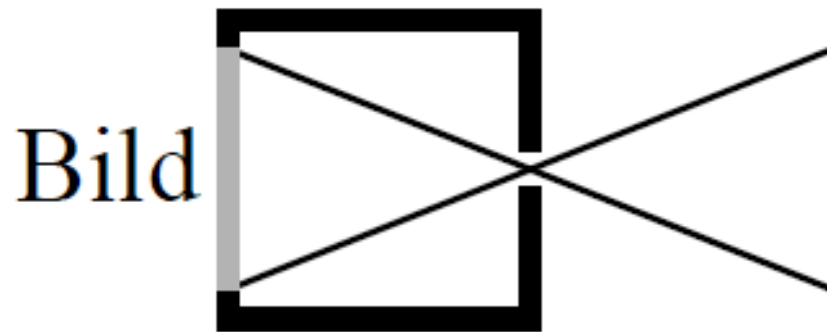
Bild aufgenommen von bewegter Kamera

Diagnose

- durch Bewegung der Kamera verkürzt sich Lichtweg in Kamera
- Abbildung wird dadurch zusätzlich verkleinert

relativistische Aberration Lochkamera

Abbildung eines Objektes im Ruhesystem
des bewegten Beobachters



Diagnose

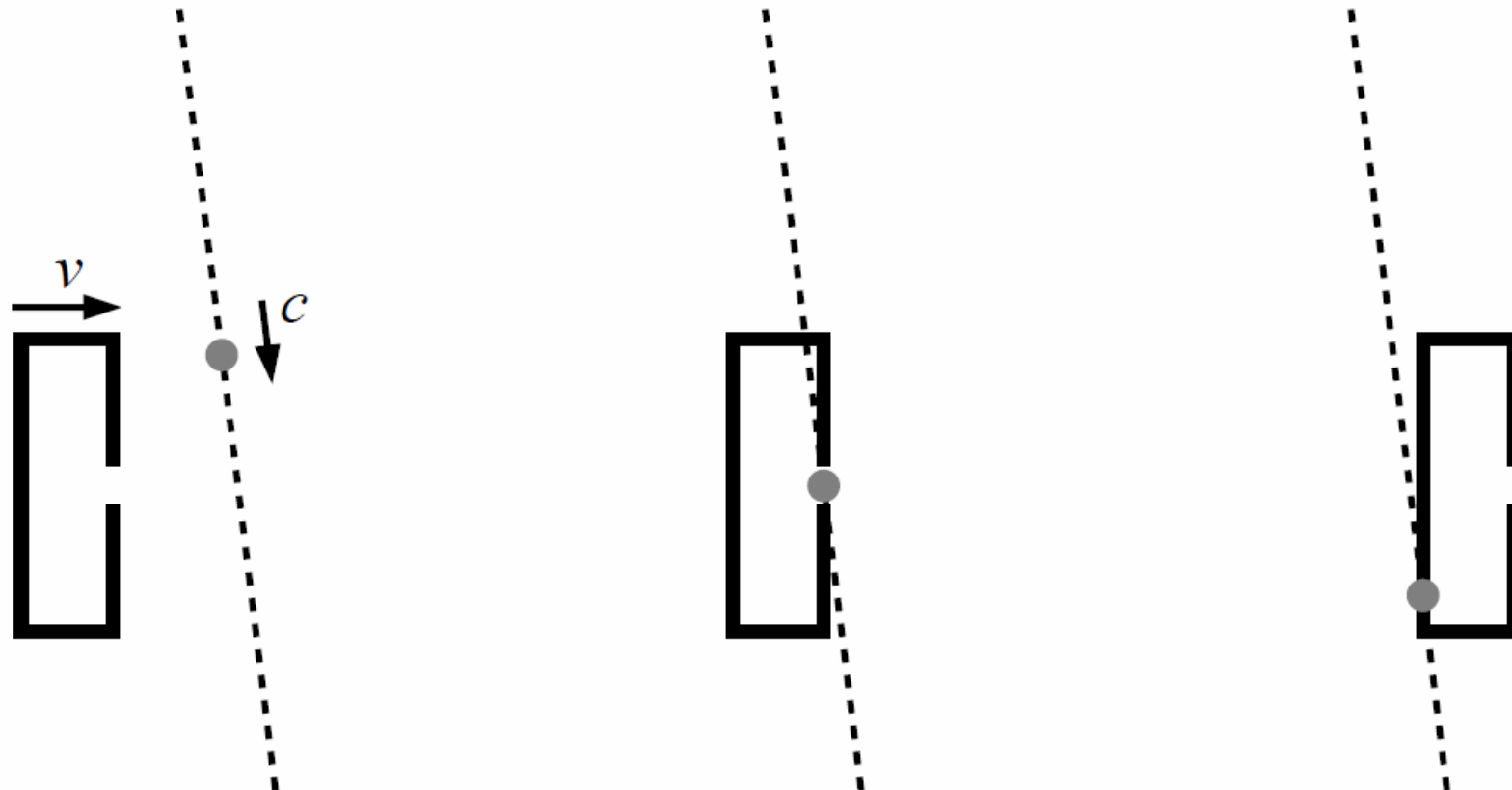
Für bewegten Beobachter eng sich der Blickwinkel ein, unter dem ein Objekt gesehen wird



relativistische Aberration Lochkamera

Symptome

Nach dem zweitem Postulat der speziellen Relativitätstheorie ist die Lichtgeschwindigkeit endlich



Diagnose

Je schneller sich Raumschiff bewegt, desto mehr kann Astronaut nach hinten schauen

relativistische Aberration Lochkamera

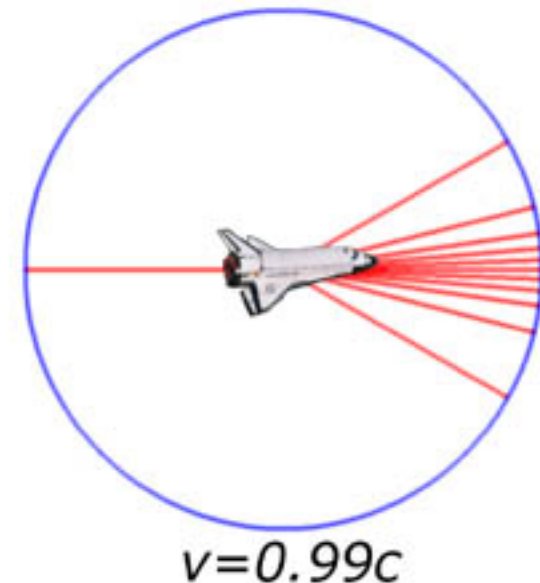
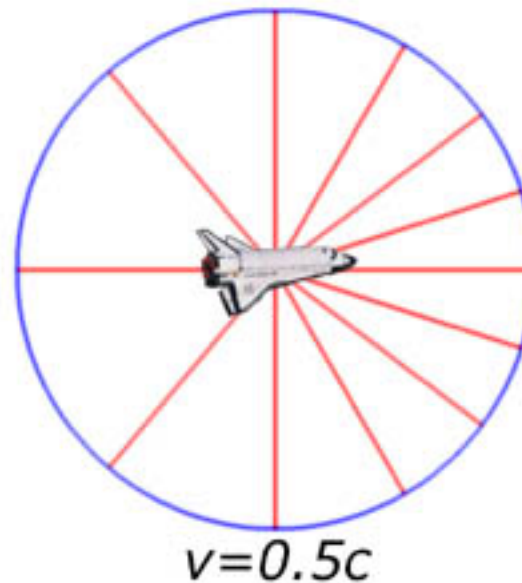
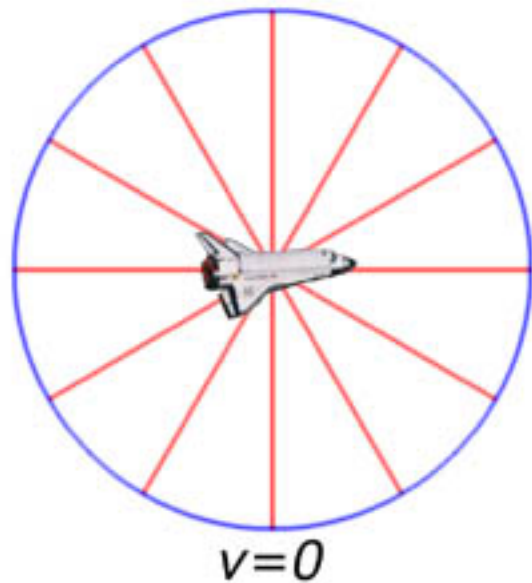


Diagnose
Je schneller sich Raumschiff bewegt, desto mehr kann Astronaut nach hinten schauen

relativistische Aberration Sichtweise

Symptome

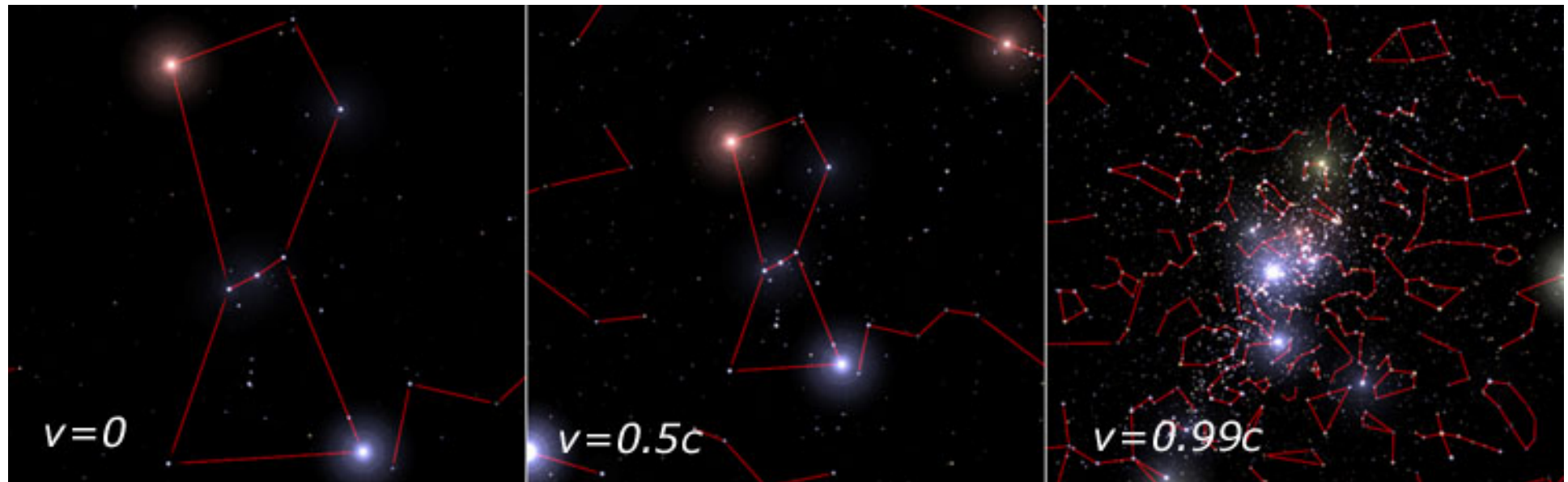
Beobachter im ruhendes Raumschiff sieht Licht von umgebenden Fixsternen



Diagnose

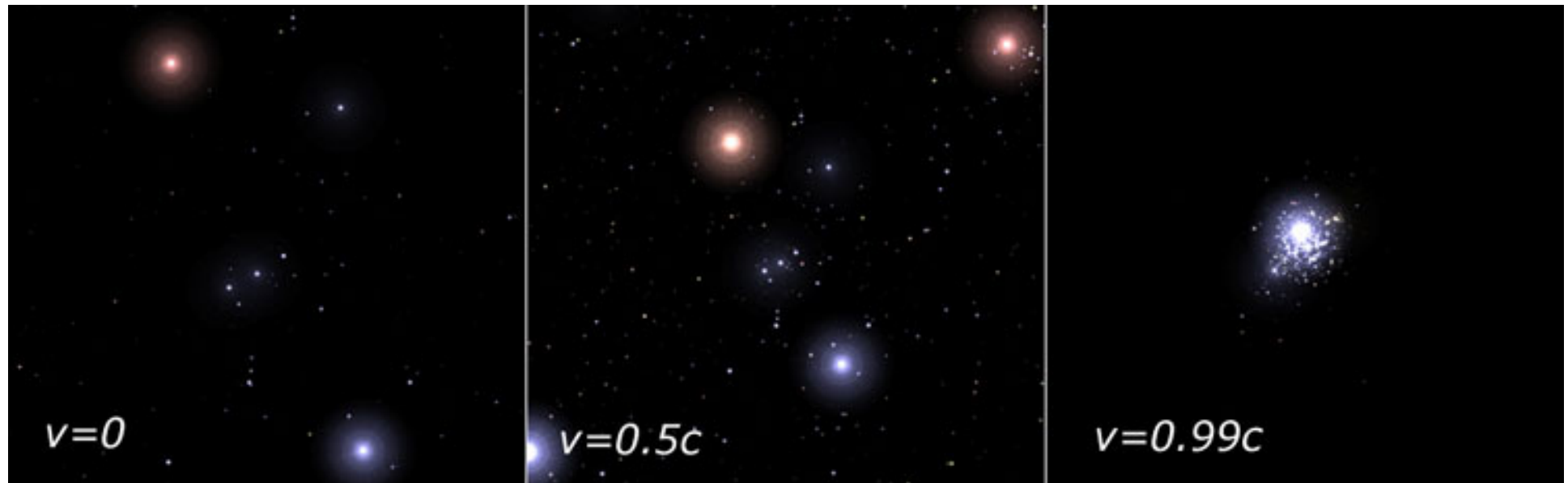
Für Beobachter in Raumschiff nahe Lichtgeschwindigkeit erreichen Photonen den Raumfahrer in Flugrichtung, obwohl Sterne hinter Raumfahrzeug

relativistische Aberration Sichtweise



Raumfahrt nahe Lichtgeschwindigkeit

Volle Relativität



Thema Relativistischer Dopplereffekt

Zwillingsparadoxon



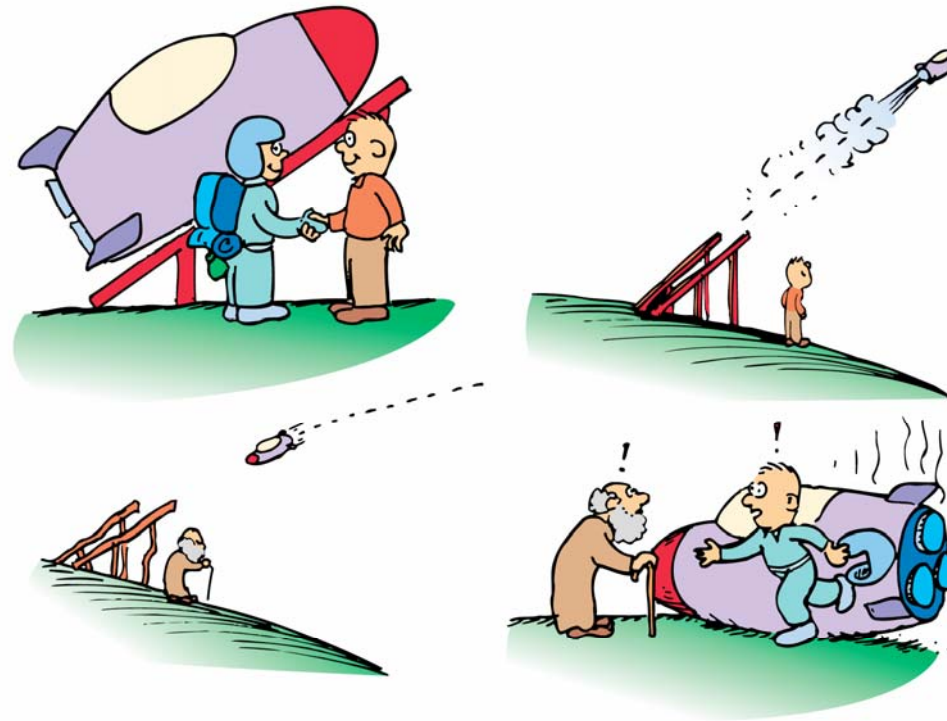


SRT-Reisezeit

Zwillingsparadoxon

Symptome

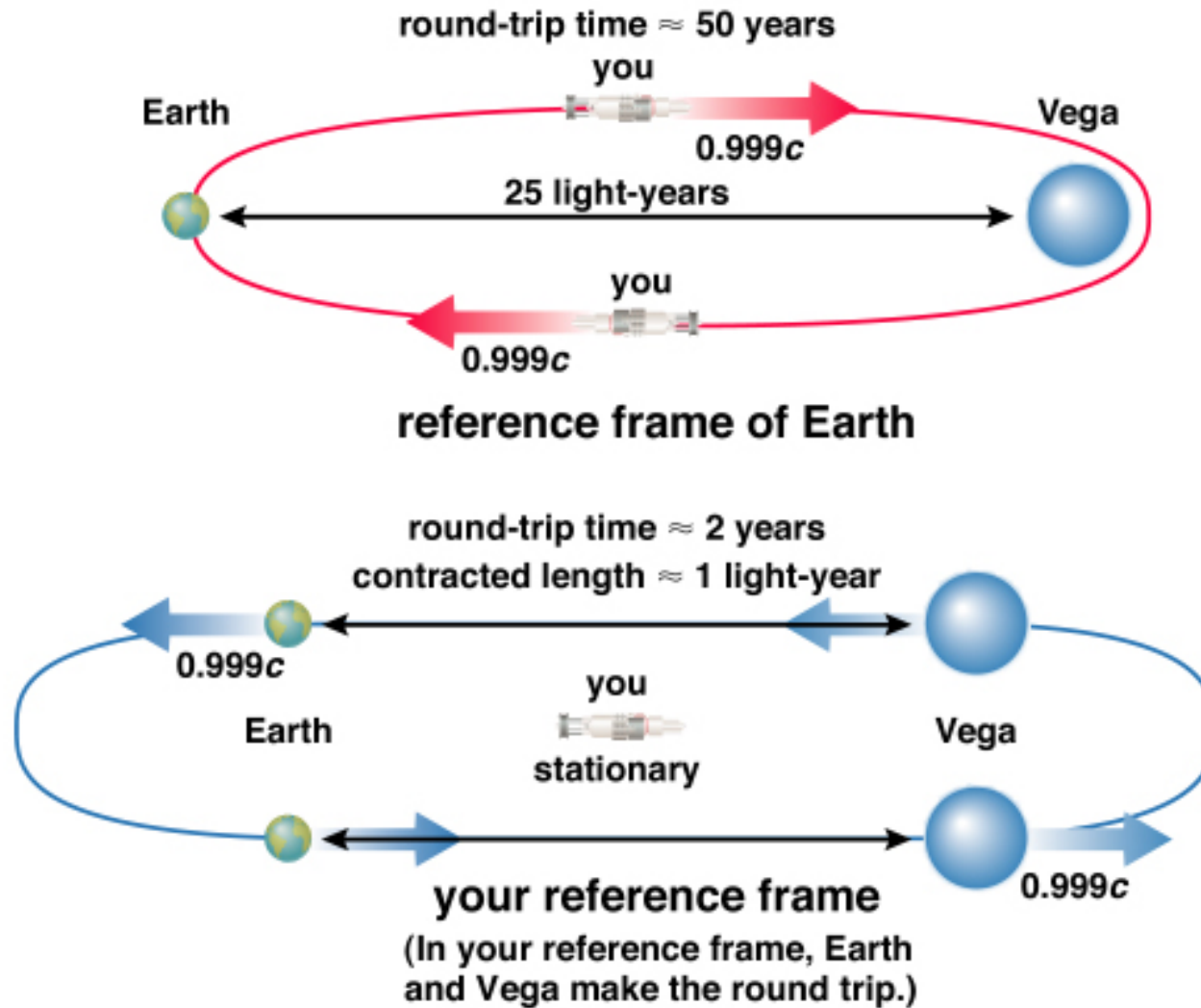
- Herzschlag der Zwillinge wird per Funk zwischen Erde und Raumschiff übertragen
- für Zwillinge geht eigene biologische Uhr nicht langsamer



Diagnose

- Astronaut sendet **GLEICHE** Gesamtanzahl von Signalen wie Zwilling auf Erde
SRT wäre widerlegt, da **KEIN** verlangsamter Alterungsprozess
- Astronaut in Raumschiff sendet **WENIGER** Signale als sein Bruder auf der Erde
SRT wäre richtig, aber dann sind Signale verloren gegangen
- warum kann man Effekt nicht **UMKEHREN** und Raumfahrer altert?

Zwillingsparadoxon



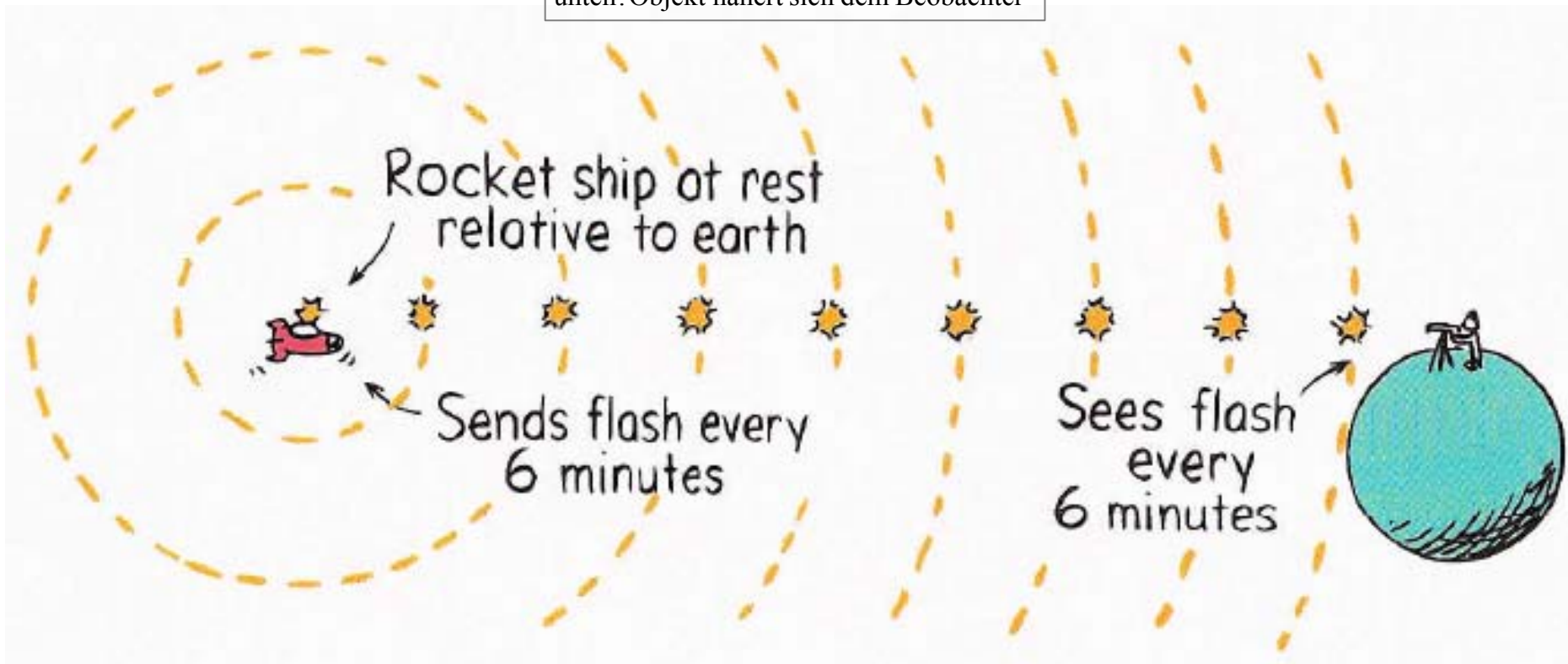
Zwillings-Paradoxon

Relativistischer Dopplereffekt

relativistischer Dopplereffekt

$$v_{\pm} = v_{\text{ruhend}} \sqrt{\frac{1 \mp \beta_{SRT}}{1 \pm \beta_{SRT}}}$$

oben: Objekt entfernt sich vom Beobachter
unten: Objekt nähert sich dem Beobachter



Diagnose

Wenn keine relative Bewegung, werden Lichtblitze mit gleichem Zeitabstand beobachtet

SRT-Reise zum Aldebaran und zurück

Zwillingsparadoxon

Beobachter auf Erde stellt fest

$$t_{\text{Erde}}^{\text{Hinreise}} = 25 \text{ Jahre}$$

$$t_{\text{Erde}}^{\text{Rückreise}} = 25 \text{ Jahre}$$

$$\text{Flugdauer beträgt } t_{\text{Erde}}^{\text{insgesamt}} = 50 \text{ Jahre}$$

Erdbewohner stellt auch fest :

Für Astronaut mit $v_{\text{Raumschiff}} = \pm 3/5 c$

$$t_{\text{Raumschiff}}^{\text{Hin- und Rückreise}} = 50 \text{ Jahre} \cdot \sqrt{1 - \frac{v_{\text{Raumschiff}}^2}{c^2}}$$

beträgt Flugdauer $t_{\text{Raumschiff}}^{\text{insgesamt}} = 40 \text{ Jahre}$

Diagnose

Aufgrund der Zeitdilatation geht die Uhr im Raumschiff langsamer

Reise zum Aldebaran

Zwillingsparadoxon

Symptome

Nach dem zweiten Postulat der speziellen Relativitätstheorie ist die Lichtgeschwindigkeit endlich

Reise des Astronauten zum Aldebaran bei $+3/5c$, weil es sich so schön rechnen lässt

$$\Delta t_{\text{Hinreise}}^{\text{Herzschlag}} = \Delta t_{\text{Erde}}^{\text{Herzschlag}} \left(\frac{1 + \frac{v_{\text{Raumschiff}}}{c}}{1 - \frac{v_{\text{Raumschiff}}}{c}} \right)^{1/2} = \Delta t_{\text{Erde}}^{\text{Herzschlag}} \left(\frac{1 + \frac{3}{5}}{1 - \frac{3}{5}} \right)^{1/2} = \sqrt{4} \Delta t_{\text{Erde}}^{\text{Herzschlag}} = 2 \Delta t_{\text{Erde}}^{\text{Herzschlag}}$$

Reise des Astronauten vom Aldebaran zurück bei $-3/5c$

$$\Delta t_{\text{Rückreise}}^{\text{Herzschlag}} = \Delta t_{\text{Erde}}^{\text{Herzschlag}} \left(\frac{1 - \frac{v_{\text{Raumschiff}}}{c}}{1 + \frac{v_{\text{Raumschiff}}}{c}} \right)^{1/2} = \Delta t_{\text{Erde}}^{\text{Herzschlag}} \left(\frac{1 - \frac{3}{5}}{1 + \frac{3}{5}} \right)^{1/2} = \frac{1}{2} \Delta t_{\text{Erde}}^{\text{Herzschlag}}$$

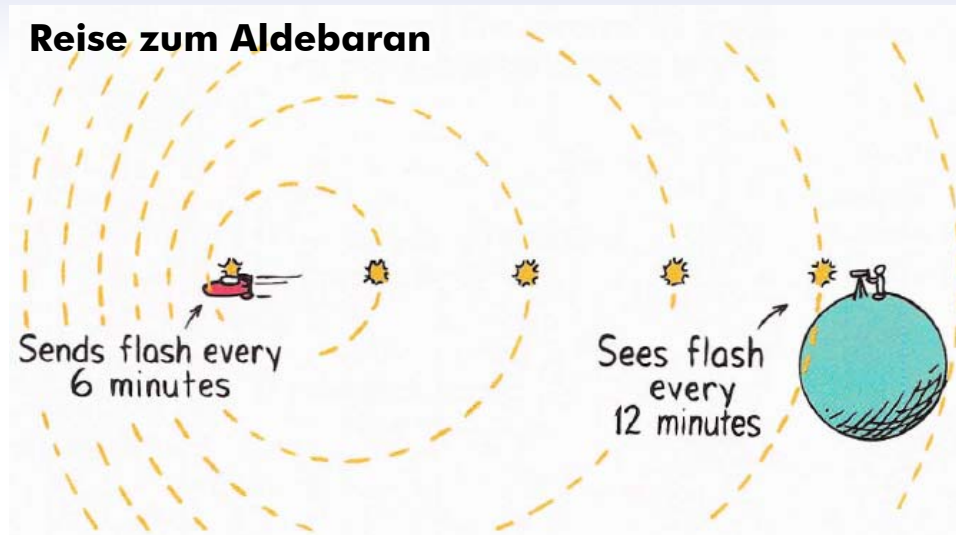
Diagnose

Signale erreichen Beobachter mit unterschiedlicher Rate abhängig von Bewegungsrichtung

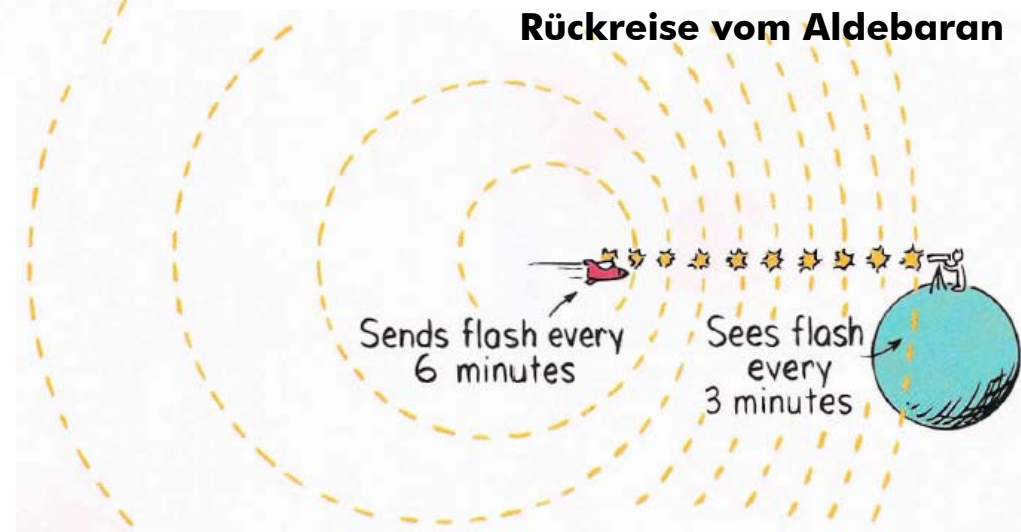
Zwillings-Paradoxon

Relativistischer Dopplereffekt

Reise zum Aldebaran



Rückreise vom Aldebaran



Diagnose

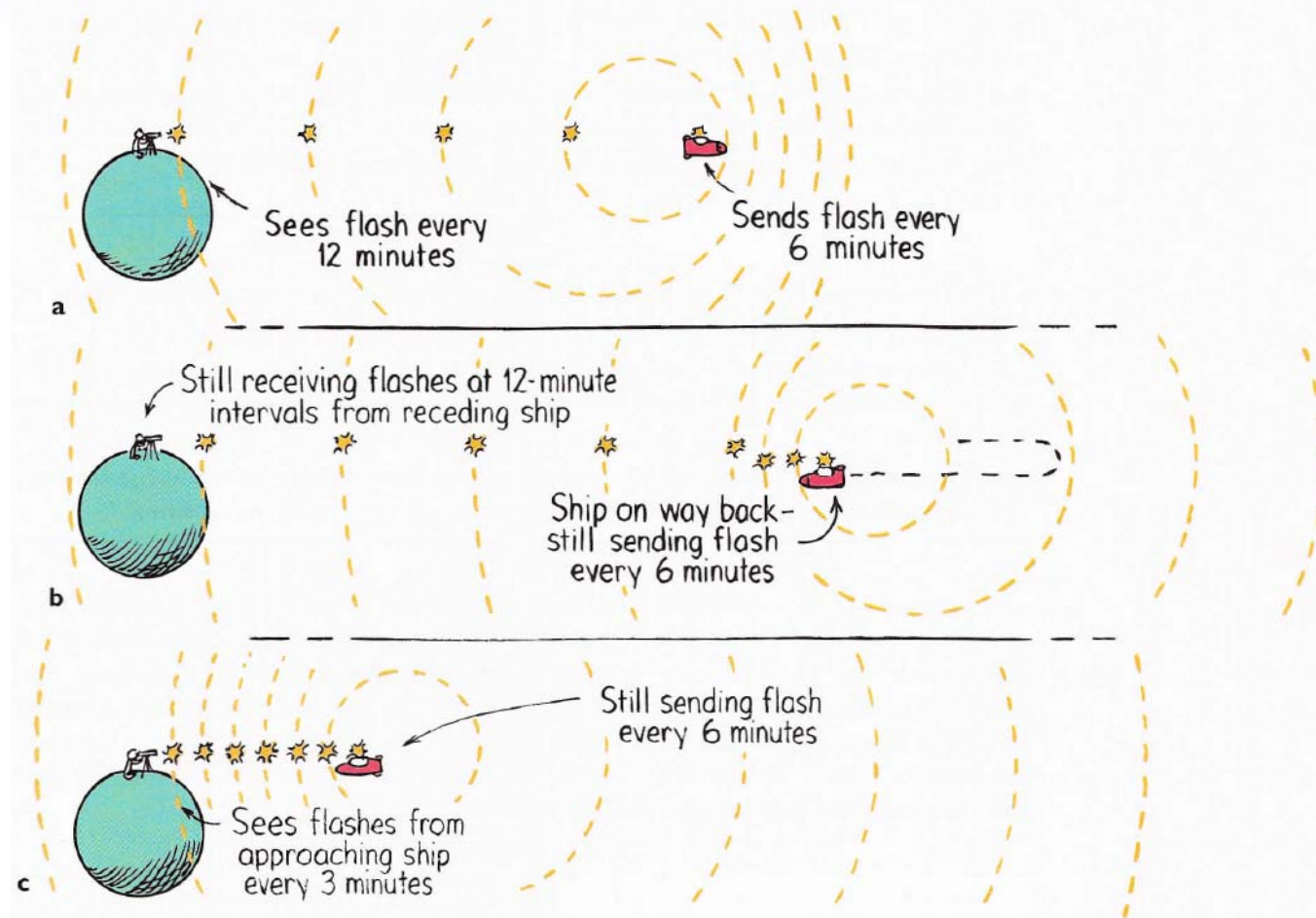
- Lichtblitze in längeren Abständen, wenn Sender sich vom Beobachter weg bewegt
- Lichtblitze in kürzeren Zeitabständen, wenn Sender sich in Richtung Beobachter bewegt

Zwillings-Paradoxon

Beobachter ERDE

Symptome

Eine beschleunigte Bewegung wird nicht durch spezielle Relativitätstheorie beschrieben

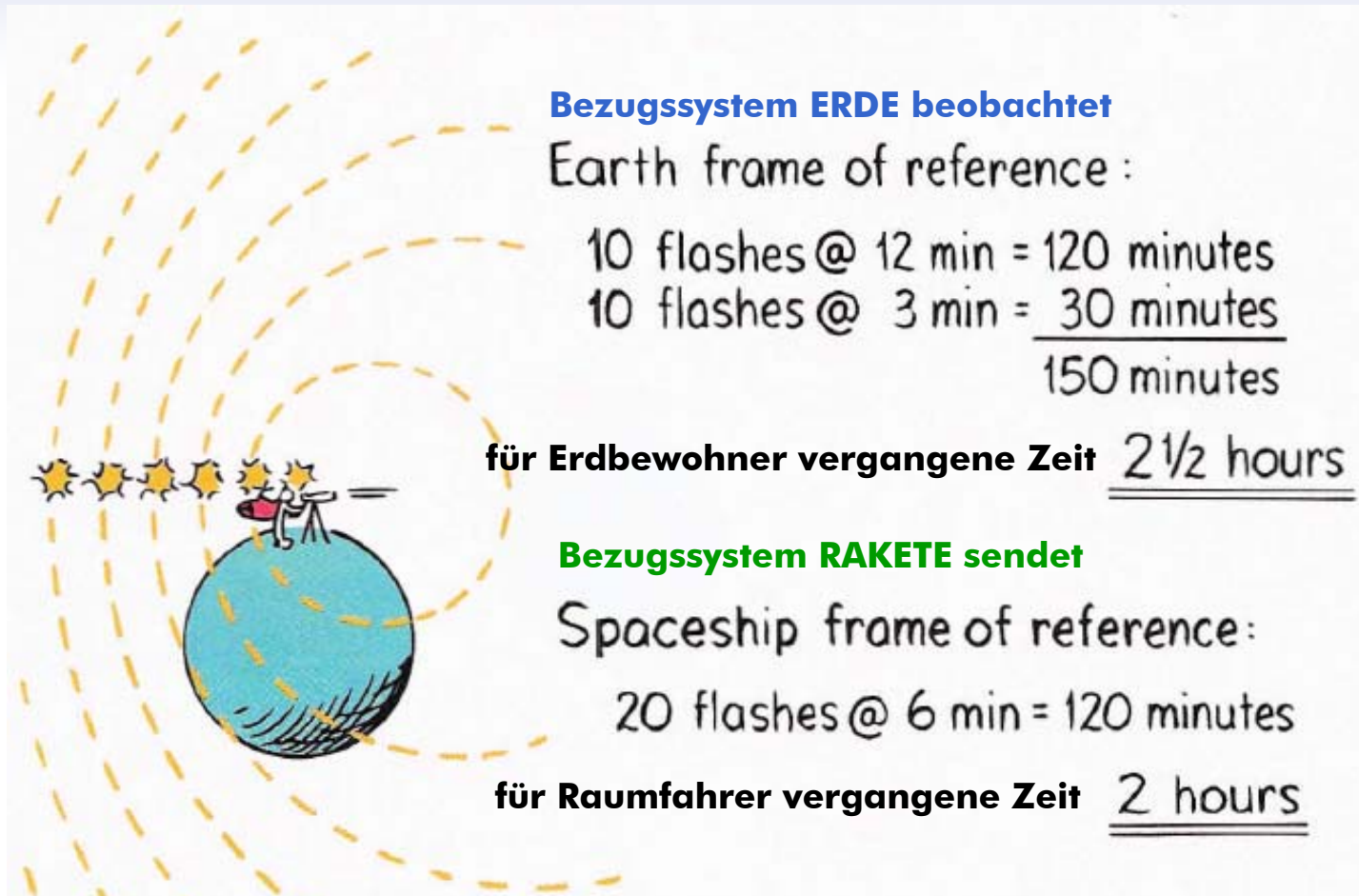


Diagnose

- Wendemanöver führt zu Symmetriebrechung
- Bezugssystem von Beobachter und Raumfahrer können nicht vertauscht werden

Zwillings-Paradoxon

Beobachter ERDE

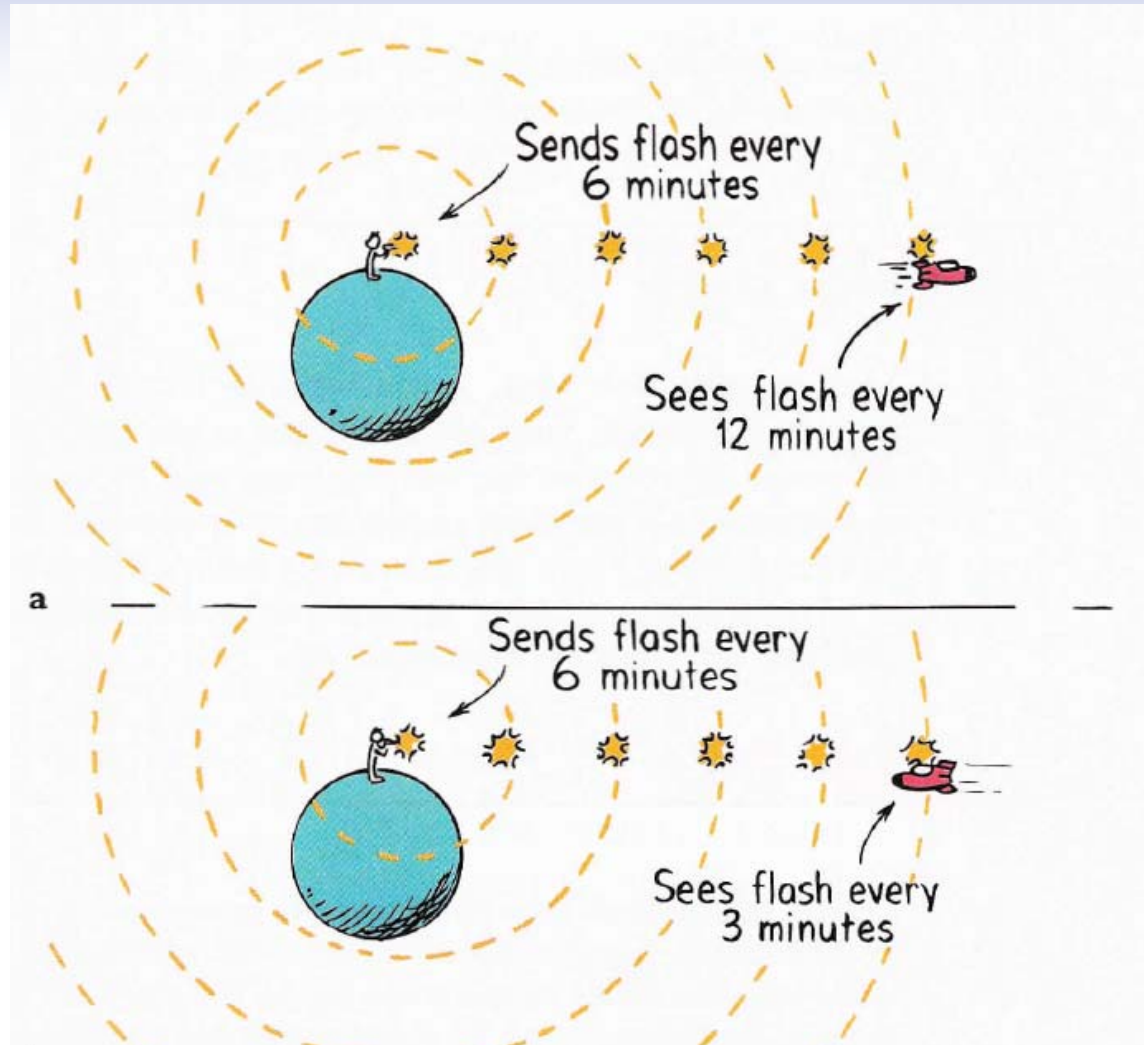


Diagnose

- Reise des Raumschiffs dauert 2.5 Stunden für Beobachter auf Erde
- Reise des Raumschiffs dauert für Astronaut 2 Stunden im Bezugssystem Raumschiff
- Effekt der Zeitdilatation wird richtig wiedergegeben trotz gleicher Anzahl Lichtpulse

Zwillings-Paradoxon

Bezugssystem RAUMSCHIFF

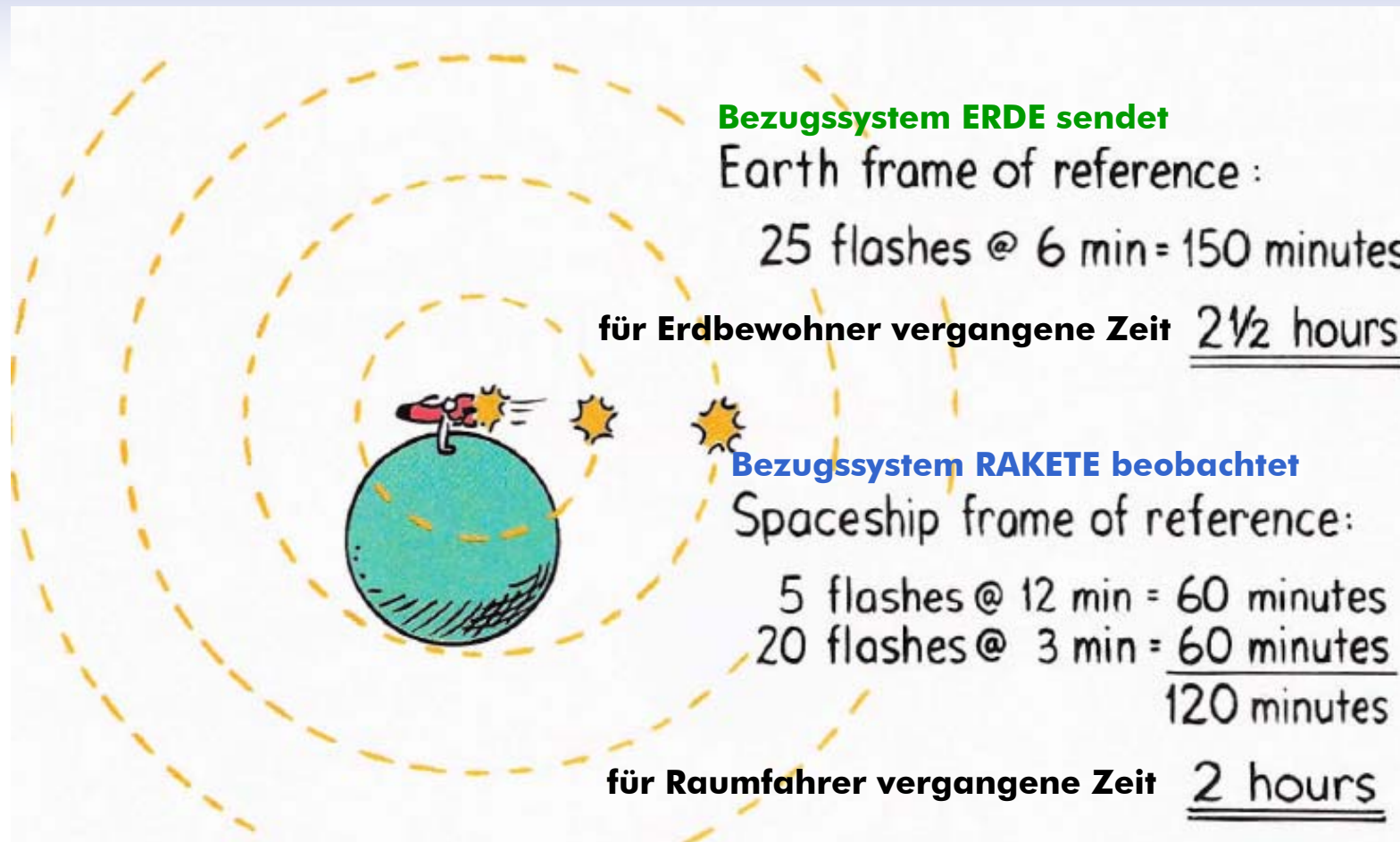


Diagnose

- auf Reise zum Aldebaran beobachtet Raumfahrer Lichtblitze im Zeitabstand von 12 Minuten
- auf Rückreise treffen Lichtsignale im Abstand von 3 Minuten ein

Zwillings-Paradoxon

Beobachter RAUMSCHIFF



Diagnose

- Zwillingbruder auf Erde sendet 25 Lichtsignale im Abstand von 6 Minuten aus
- Raumfahrer beobachtet GLEICHE Anzahl von 25 Lichtblitzen
- trotzdem altern Zwillinge unterschiedlich (Zeitdilatation)
- im Gegensatz zum Erdzwilling ÄNDERT Raumfahrer während der Reise sein Bezugssystem