

Sommersemester 2005

# Aktive Galaxienkerne vom Radio- zum Gamma-Bereich



Silke Britzen

e-mail: [sbritzen@mpifr-bonn.mpg.de](mailto:sbritzen@mpifr-bonn.mpg.de)

<http://www.mpifr-bonn.mpg.de/staff/sbritzen>

Max-Planck-Institut  
für  
Radioastronomie

# Sommersemester 2005

## Termine & Programm

15.04.: Ausblick (dieses Semester) &

Zusammenfassung (letztes Semester)

29.04.: Beobachtungstechniken

13.05.: Ausgewählte AGN - typische Eigenschaften &

Spektrale Energieverteilung

27.05.: Zusammenfassung & Schwarze Löcher, Multiple Systeme

10.06.: Kosmologie & AGN

Teil I) AGN finden – Durchmusterungen (optisch - Radio - Röntgen)

24.06.: Kosmologie & AGN

Teil II) Kosmologische Entwicklung der AGN

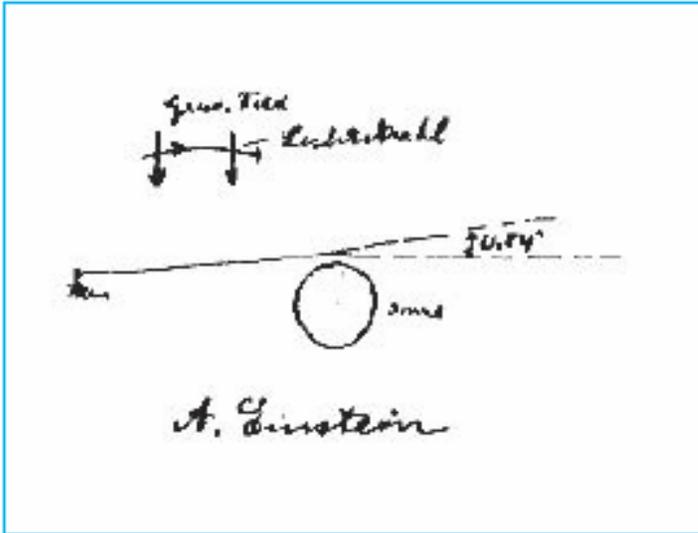
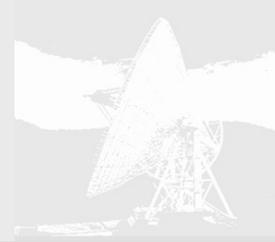
08.07.: **Gravitationslinsen & Licht**

# Programm für heute



- Gravitationslinsen
  - Verschiedene Arten
  - Kosmologische Implikationen
    - Dunkle Materie
    - Hubble-Konstante
- Licht
  - Die Natur des Lichts (Historischer Abriss)
  - Aspekte der Quantentheorie
    - Quantenmechanische Verschränkung
  - Quantenkommunikation:  
Quantenkryptographie, Teleportation

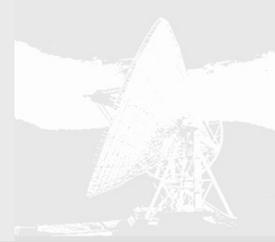
# Gravitationslinsen



Auf einer Postkarte skizzierte Albert Einstein die aus der allgemeinen Relativitätstheorie resultierende Ablenkung des Sternenlichts am Sonnenrand. Die Messung dieses Effekts bei einer Sonnenfinsternis im Jahr 1919 verhalf der allgemeinen Relativitätstheorie zur weltweiten Anerkennung.

- Verschiedene Arten von Gravitationslinsen:
  - Galaxien als Linsen
  - Galaxienhaufen als Linsen
  - Sterne als Linsen

# Gravitationslinsen: verschiedene Effekte



- Mehrfachbilder von Hintergrundquellen
- Ringförmige Bilder von Hintergrundquellen
- Linsen als Gravitations-Teleskope für sehr schwache und entfernte Objekte
- Hubble Konstante kann mittels Linsen bestimmt werden
- Gigantische, leuchtkräftige Bögen
- Quasar Mikrolinsen-Effekt
- Einstein-Ringe
- Arclets
- Galaktische Mikrolinsen-Effekte
- Schwaches Gravitationslinsen-Phänomen
- ....Hunderte individueller Gravitationslinsen-Phänomene sind bekannt

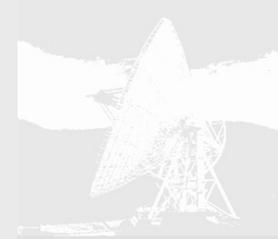
# Gravitationslinsen: Starke Verzerrungen



The Castle on the Mall in Washington, D.C., as viewed from the Natural History museum.

Now we place a black hole with the mass of Saturn over the middle of the Mall, and view the Castle through the resulting gravitational lens.

# Gravitationslinsen: Historisch



- 1801: Prof. J. Soldner (Berliner Sternwarte, später Gründer der Münchner Sternwarte) sagt Effekt voraus: „Über die Ablenkung eines Lichtstrahls von seiner geradlinigen Bewegung, durch die Attraktion eines weltkörpers, an welchem er nahe vorbeigeht“
- 1911: Einstein bestätigt Soldners Wert, Fehler in Rechnungen, allgemeine Relativitätstheorie noch nicht entwickelt

$$\alpha = 4 \frac{GM}{c^2 r} = 0.83''$$

- 1914: Pläne, die Messung auf der russischen Krim-Halbinsel durchzuführen, 1. Weltkrieg

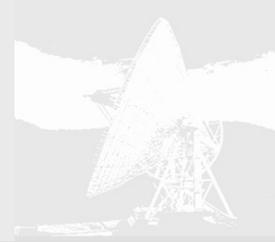
- 1915: Einstein: Faktor zwei größer

$$\alpha = 4 \frac{GM}{c^2 r} = 1.74''$$

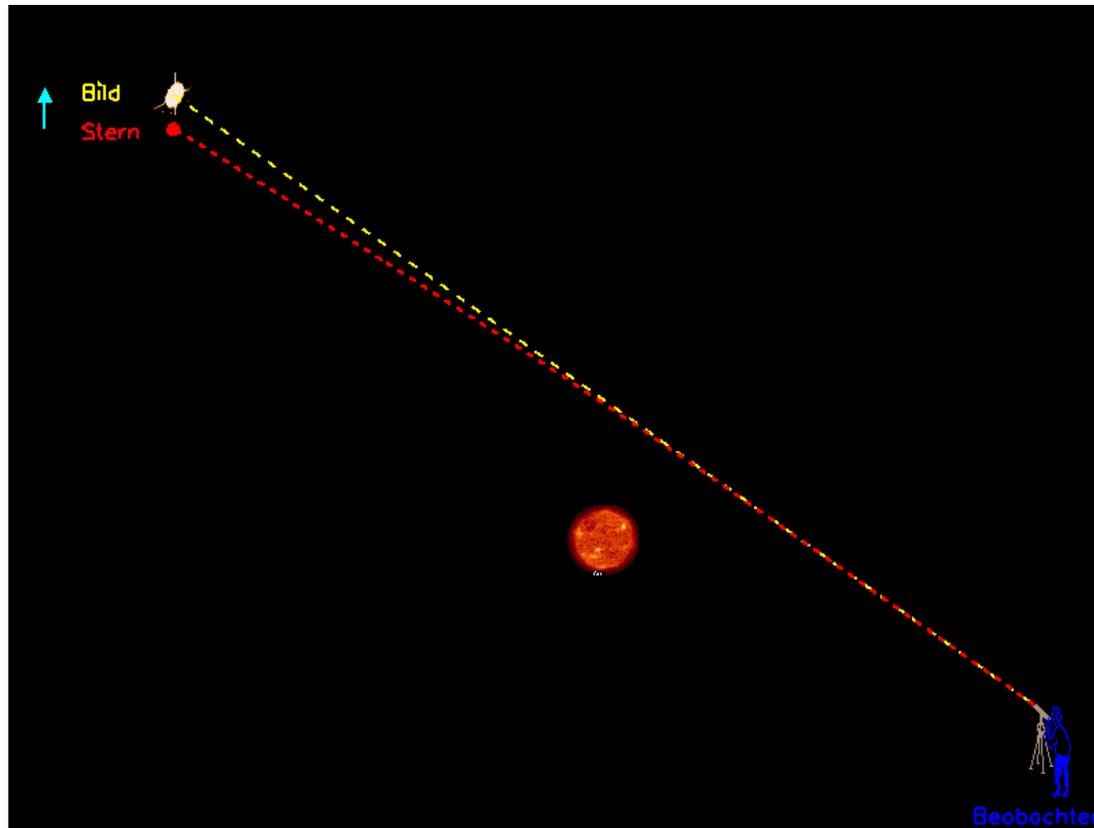
(dünne Linsen Annäherung, zirkular symmetrischer Fall)

- 1919: Arthur Eddington, Effekt bei Sonnenfinsternis gemessen
- Einstein's Wert auf 0.02% genau
- 1937: Fritz Zwicky: Galaxien sollten viel eher durch den Linseneffekt betroffen sein als Sterne, Effekt müsste als „natürliches Teleskop“ zu benutzen sein
- 60iger Jahre: Refsdal entwickelt wichtigsten Formeln der Gravitationslinsentheorie

# Gravitationslinsen

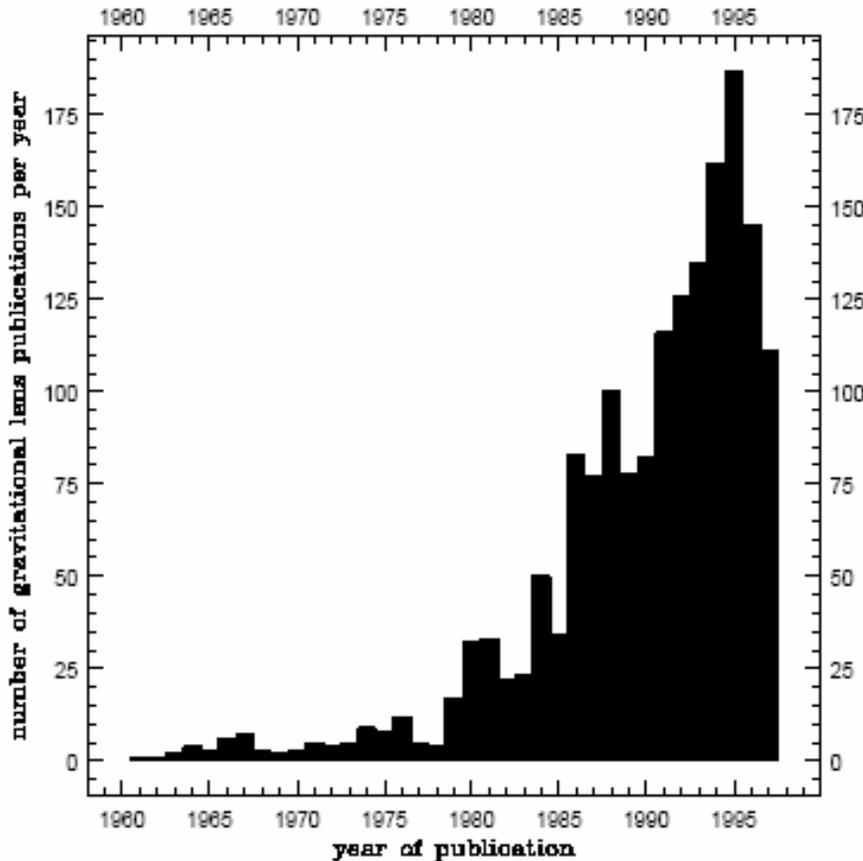


Sonne lenkt Lichtstrahl einer dahinterliegenden Quelle um 1.7 Bogensekunden ab



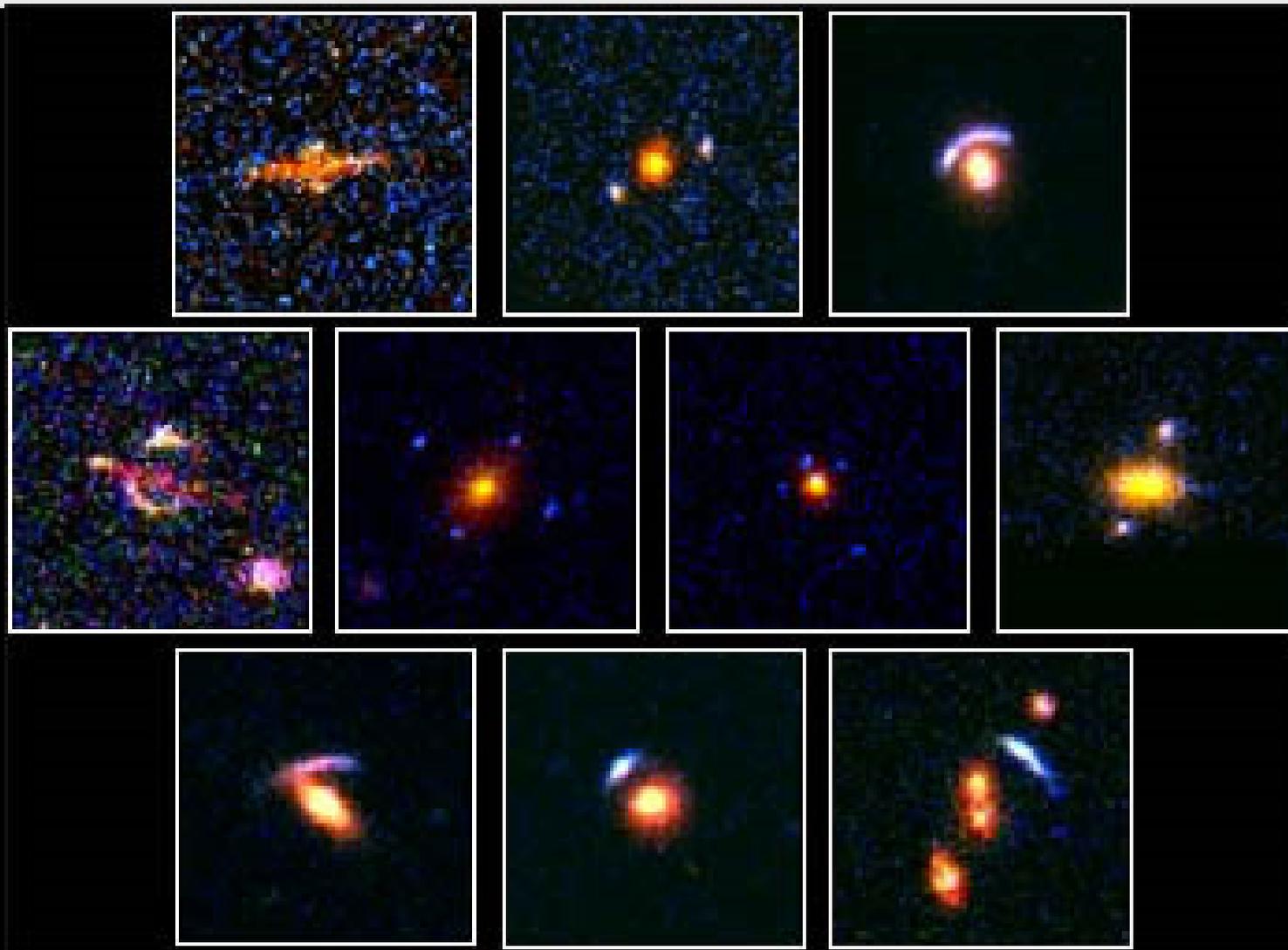
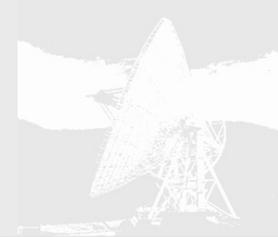
Barnothy zieht Verbindung zwischen Quasaren und Gravitationslinsen  
1979: erster Doppelquasar entdeckt und als Linse bestätigt von  
Walsh, Carswell & Weymann

# Gravitationslinsen: Publikationen



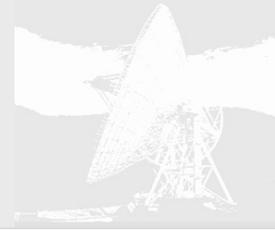
Number of papers on gravitational lensing per year over the last 35 years. This diagram is based on the October 1997 version of the lensing bibliography compiled by Pospieszalska-Surdej, Surdej and Veron [108]. The apparent drop after the year 1995 does not reflect a drop in the number of papers, but rather the incompleteness of the survey.

# Gravitationslinsen: HST-Galerie

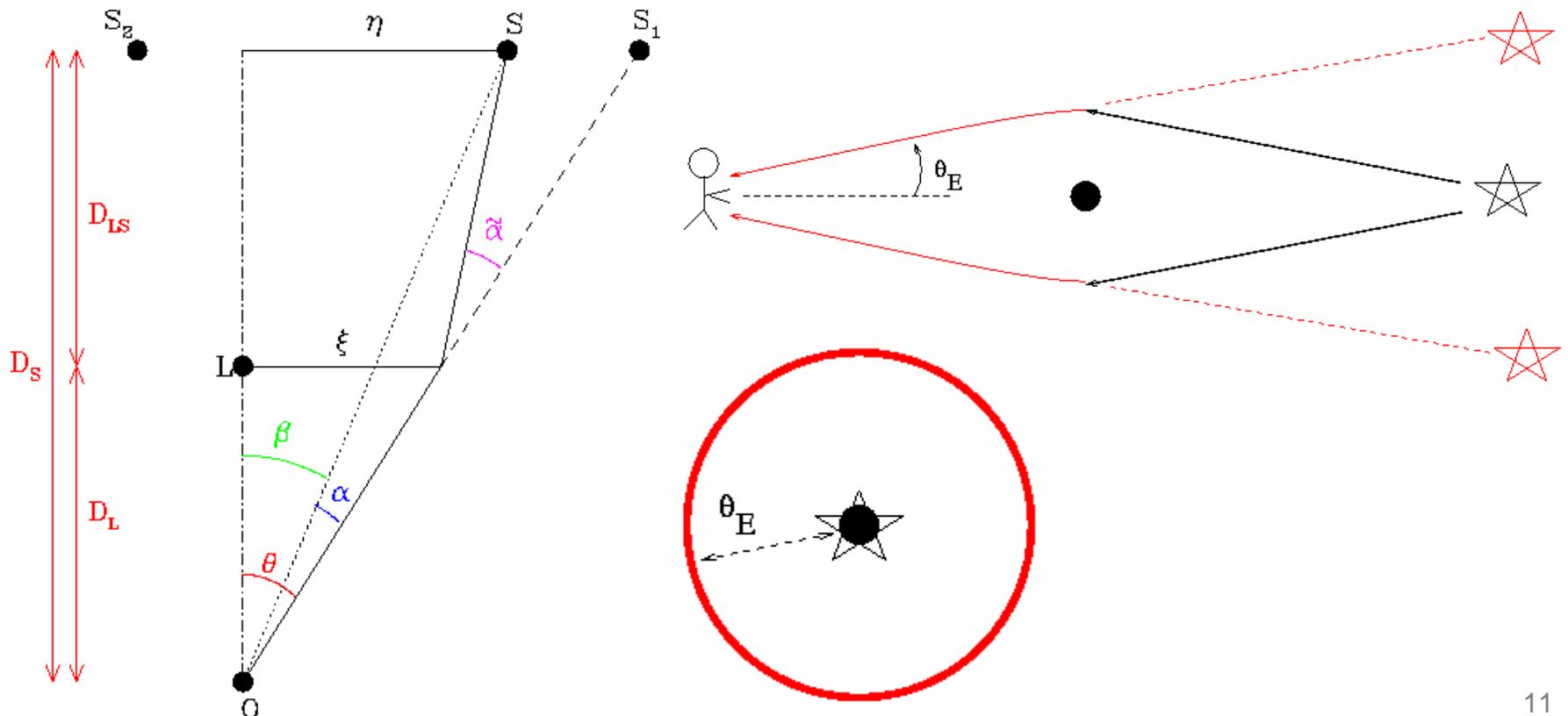


<http://vela.astro.ulg.ac.be/themes/extragal/gravlens/bibdat/engl/lens.html>

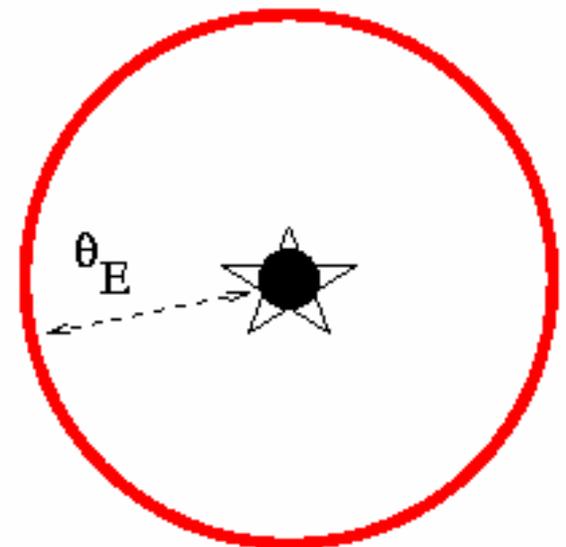
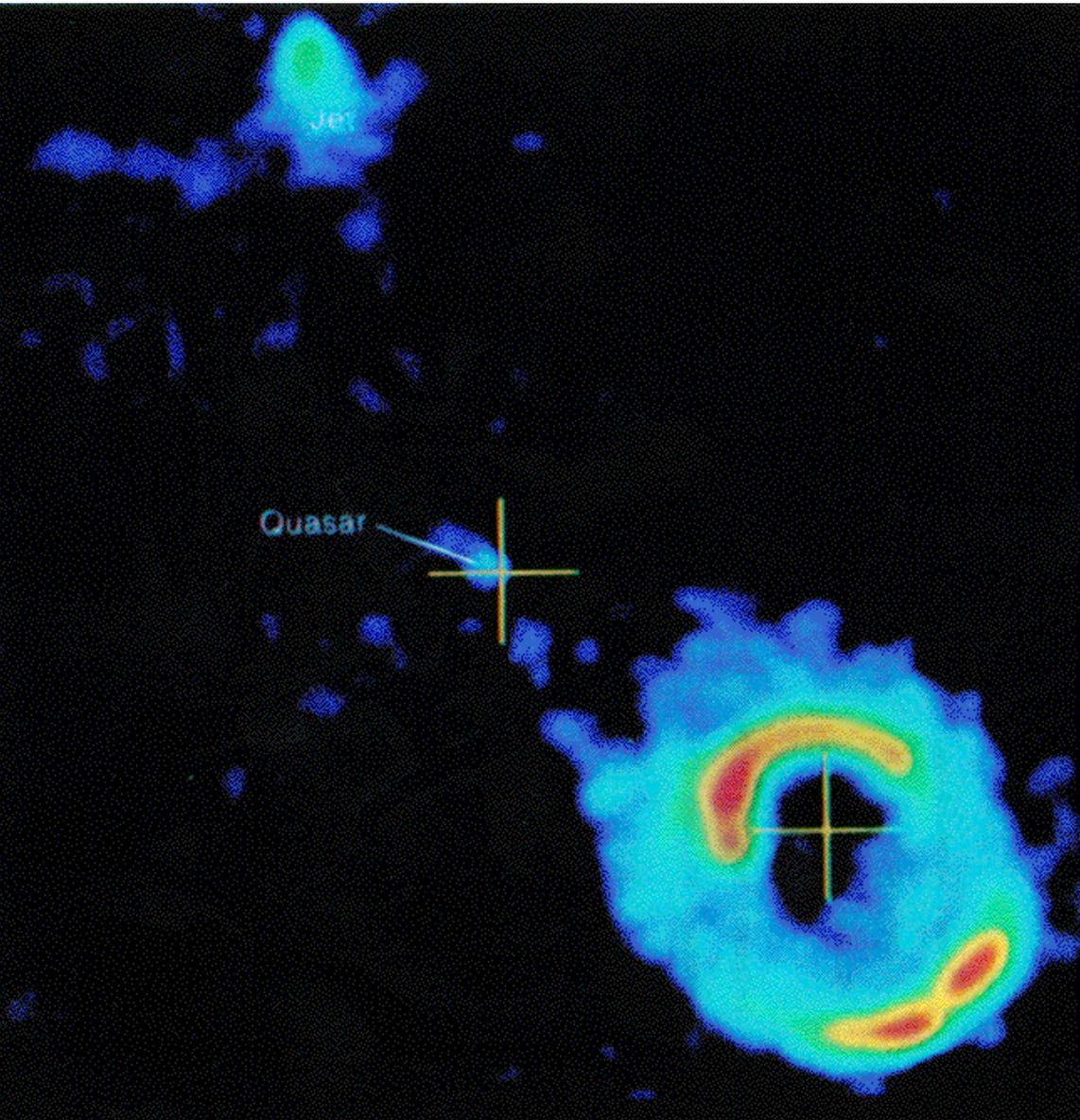
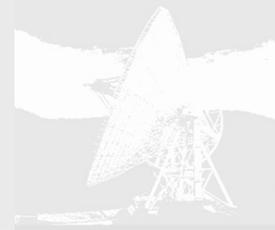
# Gravitationslinsen: Einstein-Ring



- Spezialfall: Quelle liegt direkt hinter der Linse, ringförmiges Bild entsteht, Radius ist **Einstein-Radius**  $\theta_E = (4 Gm D_{LS} / c^2 D_L D_S)^{0.5}$



# Gravitationslinsen: Einstein Ring



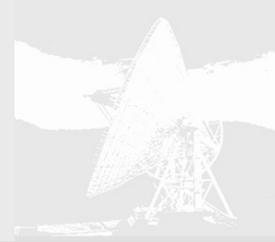
# Gravitationslinsen: Simulation



Lensing Galaxy



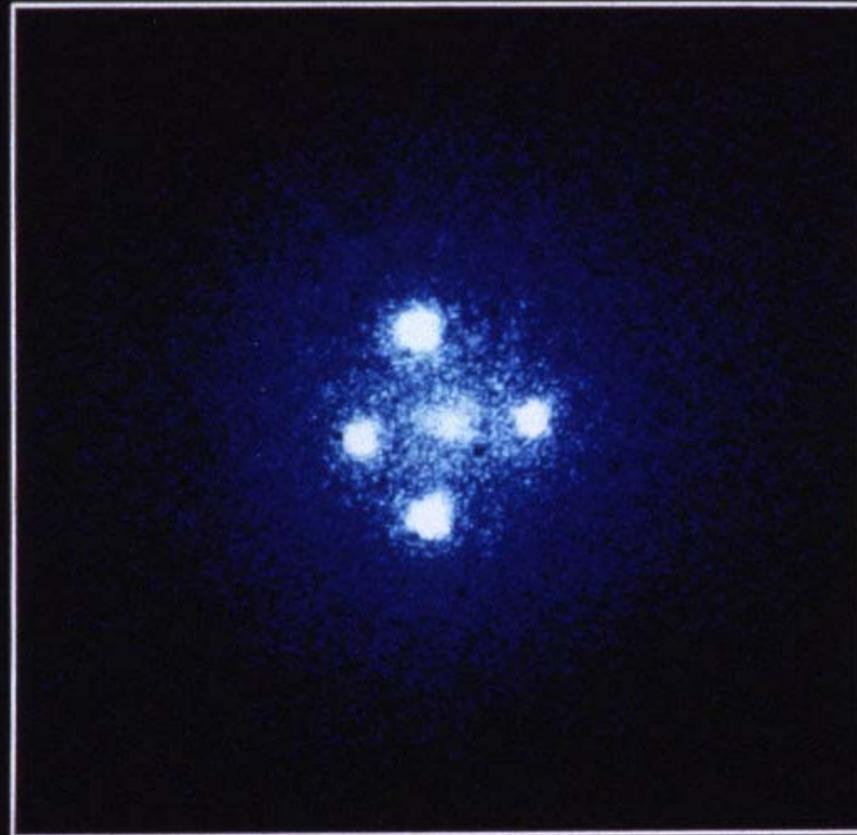
# Gravitationslinsen: Zeitverzögerung



$$\tau(\vec{\theta}, \vec{\beta}) = \tau_{\text{geom}} + \tau_{\text{grav}} = \frac{1 + z_L}{c} \frac{D_L D_S}{D_{LS}} \left( \frac{1}{2} (\vec{\theta} - \vec{\beta})^2 - \psi(\theta) \right).$$

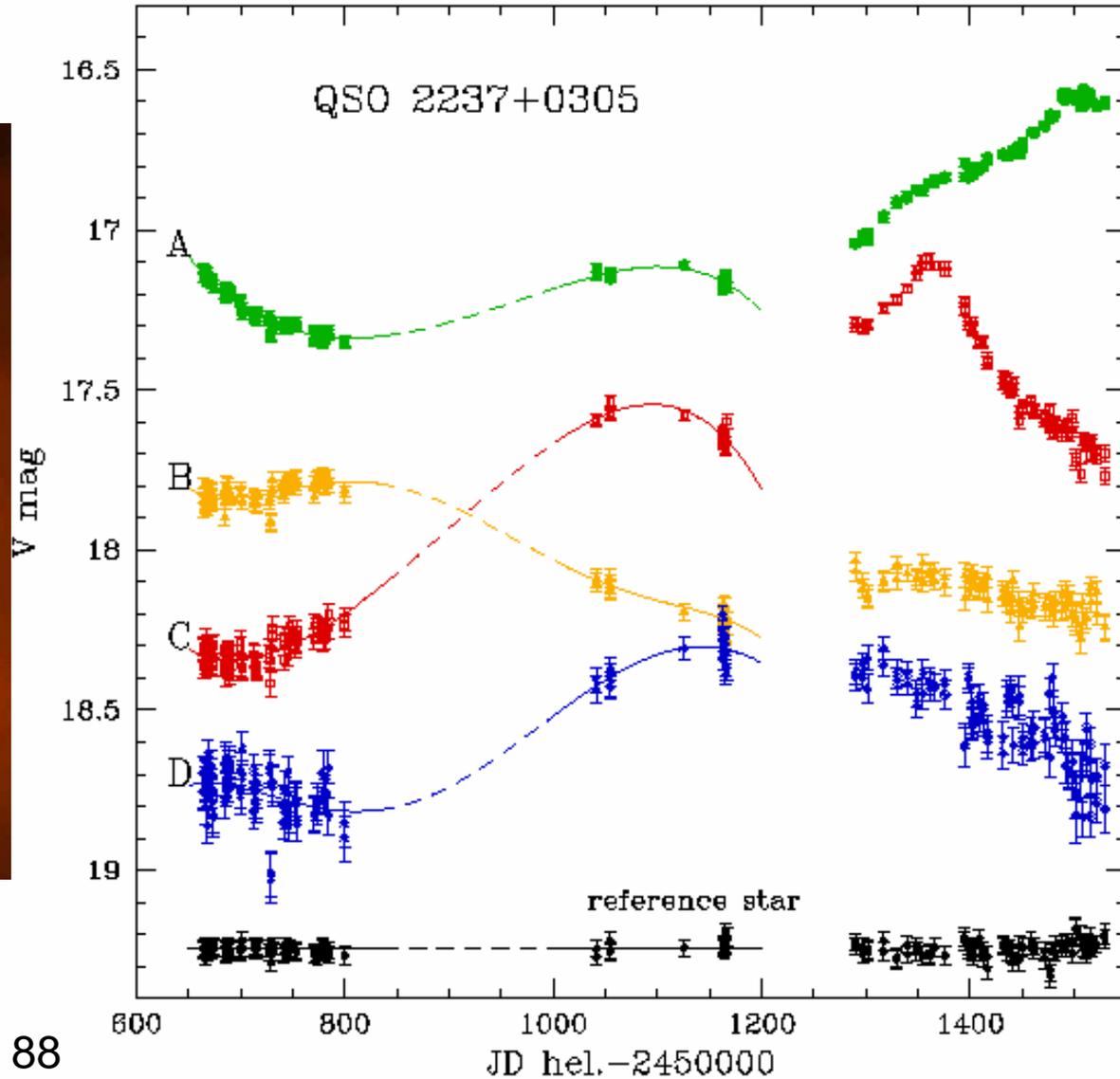
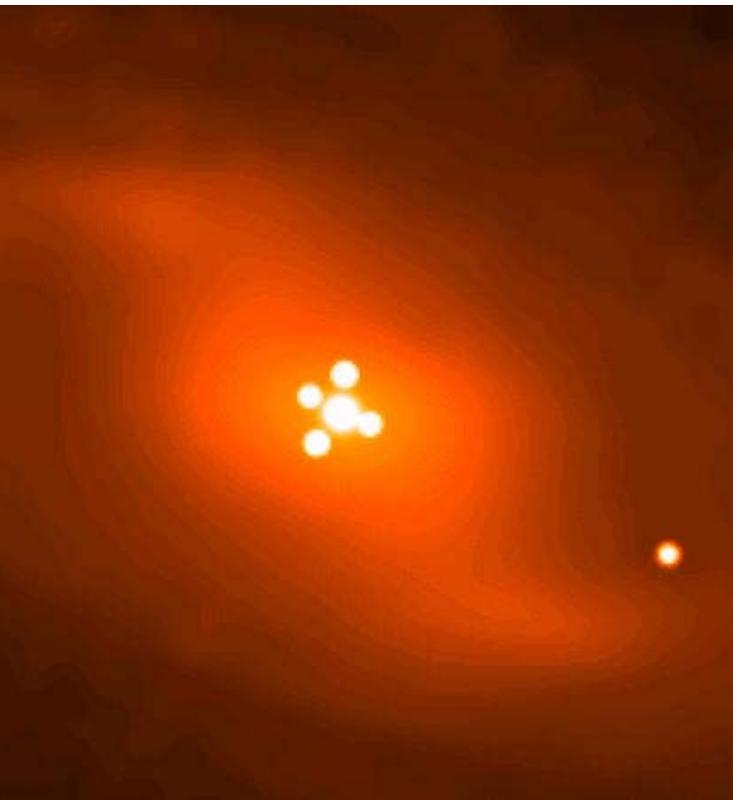
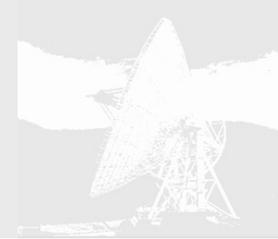
- Linsengleichung abhängig vom Wert der **Hubble-Konstanten**: durch Messung der Zeitverzögerung zwischen zwei Bildern und einem guten Modell für das effektive Gravitationspotential  $\psi$  der Linse

# Gravitationslinsen



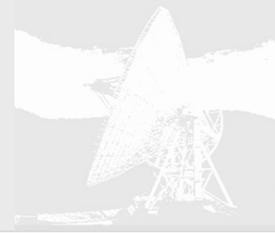
**Gravitational Lens G2237+0305**

# Gravitationslinsen: Lichtlaufeffekte, Hubble-Konstante

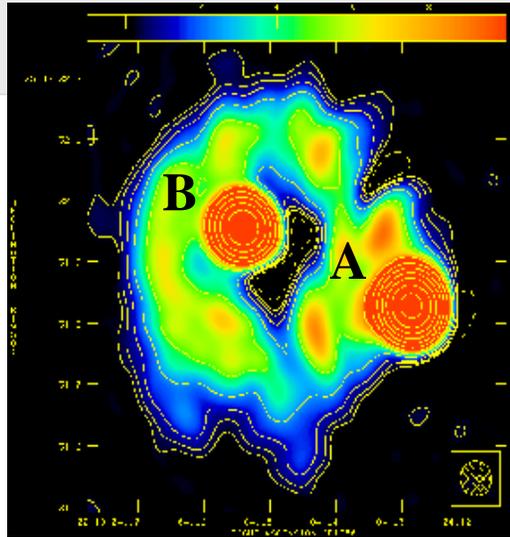


Wozniak et al. (2000), Ap.J., 529, 88

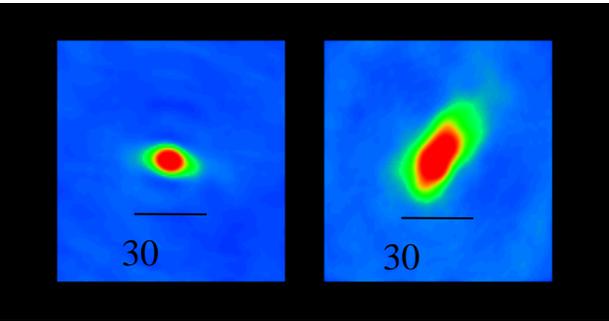
# Gravitationslinsen: VLBI-Bilder



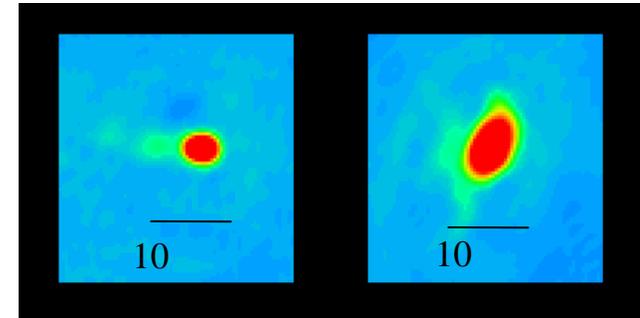
The double-image lens  
JVAS B0218+357



lens at 18 cm



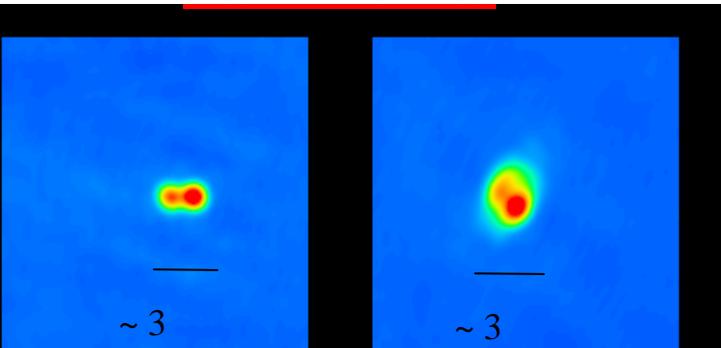
lens at 6 cm



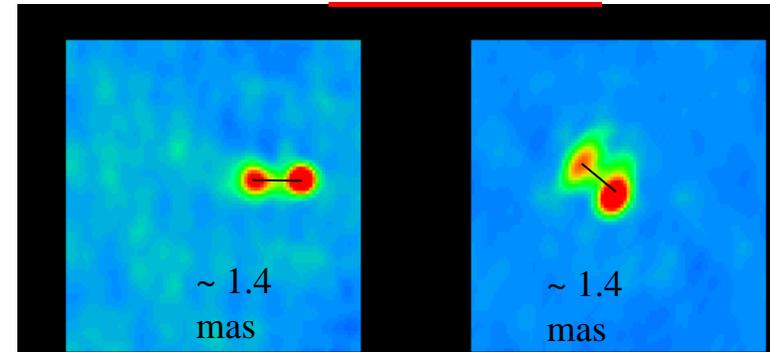
5 GHz MERLIN / VLA  
*A.D. Biggs*

*VLBI*

lens at 3.6 cm

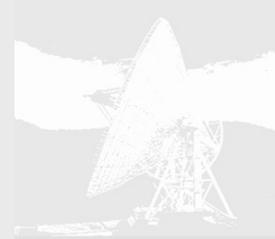


lens at 2 cm



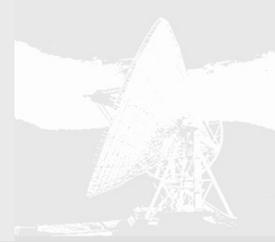
*R. Mittal et al.,  
in prep.*

# Gravitationslinsen: Funktionsweise



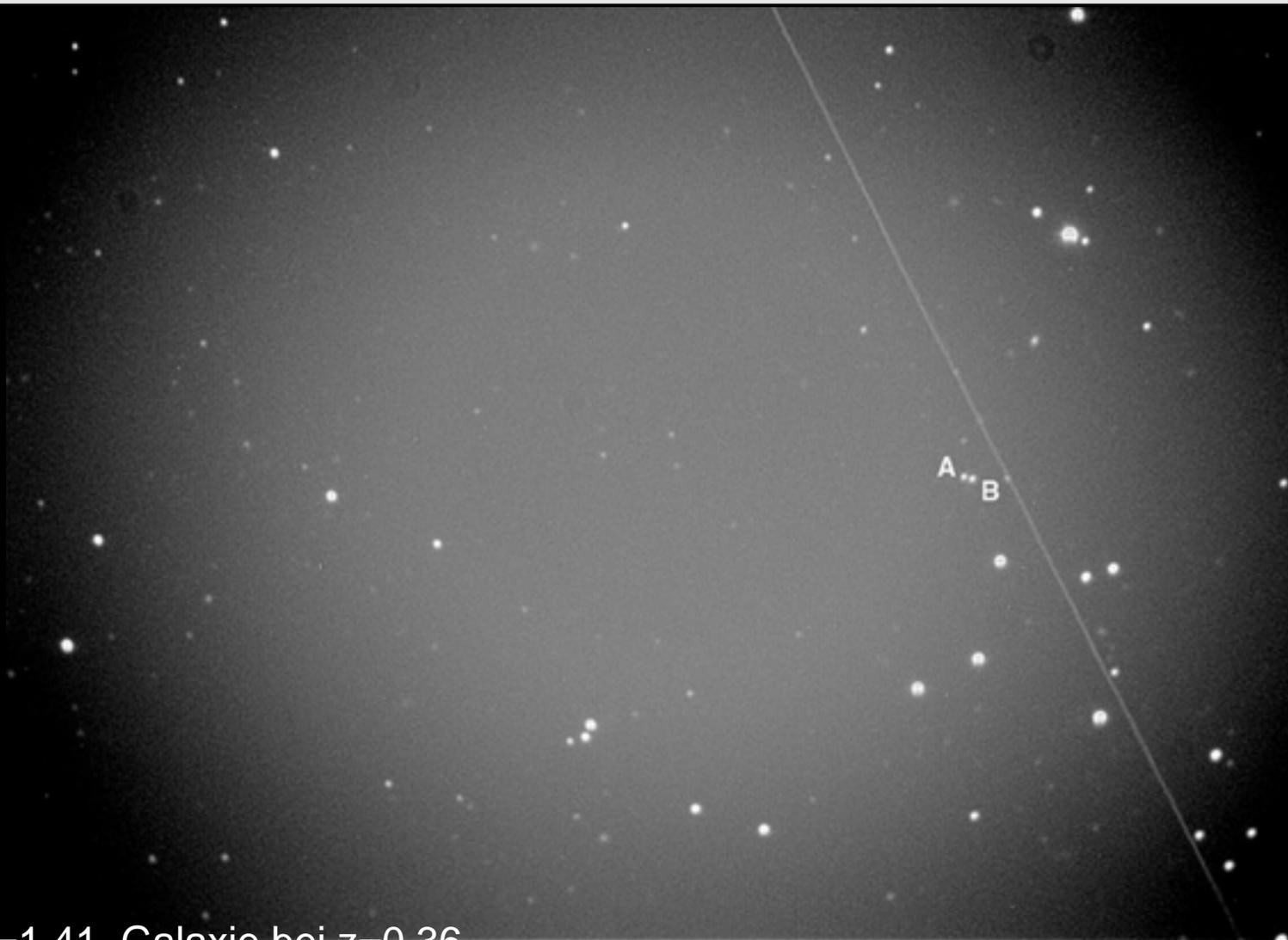
- Größe der Ablenkung ist unabhängig von der Masse des Teilchens,
- Größe der Ablenkung ist abhängig von seiner Geschwindigkeit
- Gravitationslinsenwirkung ist umso größer, je größer die Masse des Himmelskörpers und je näher der Lichtstrahl der Quelle an ihm vorbei geht

# Gravitationslinsen: Mehrfach-Abbildungen von Quasaren



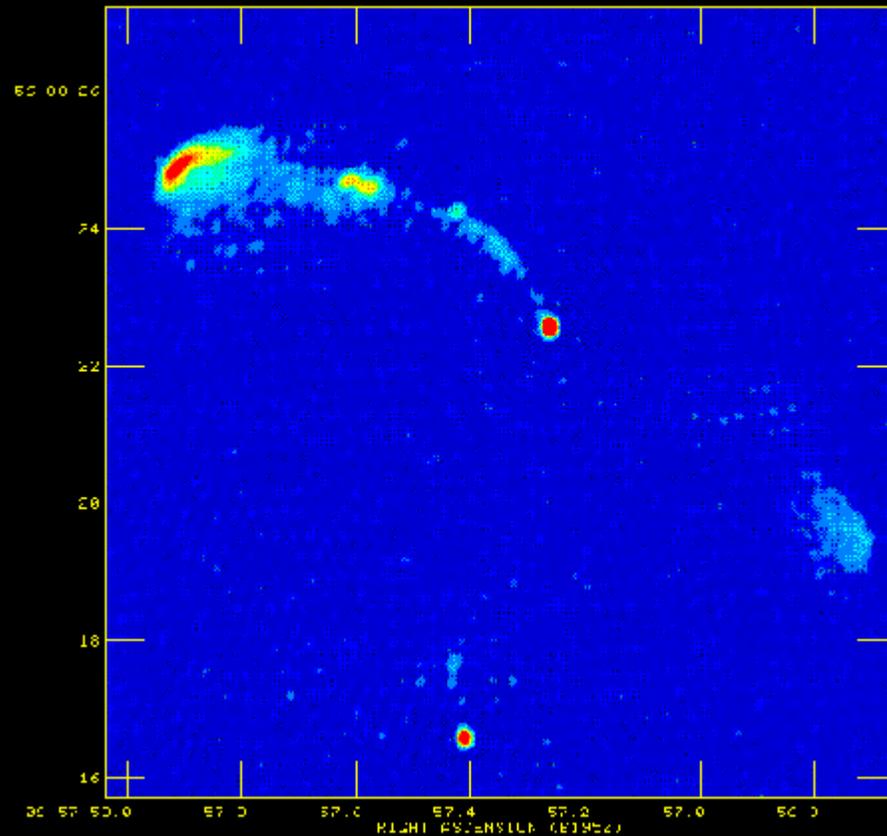
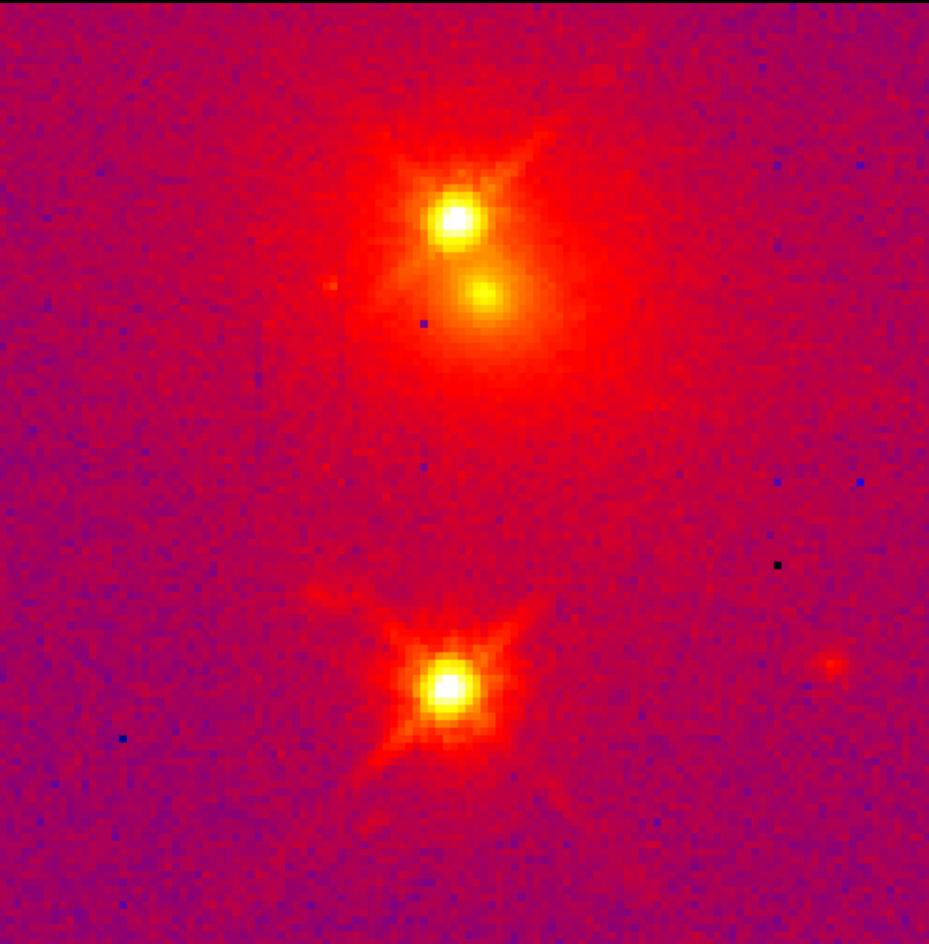
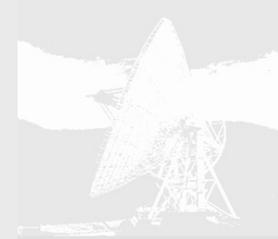
- Schwierig zu finden: Anteil der gelinsten Objekte gering ( $<1\%$ )
- Nicht trivial zu identifizieren
- Zwei Bilder oder Doppelquelle?
- Kommen als Doppel, Trippel, Quadrupel
- Beispiel: Q0957+561 (Radio- Röntgen-Beobachtungen)

# Gravitationslinsen: Mehrfach-Abbildung Quasar, Q0957+561



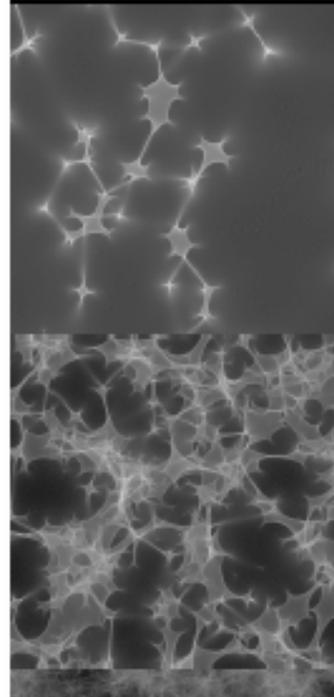
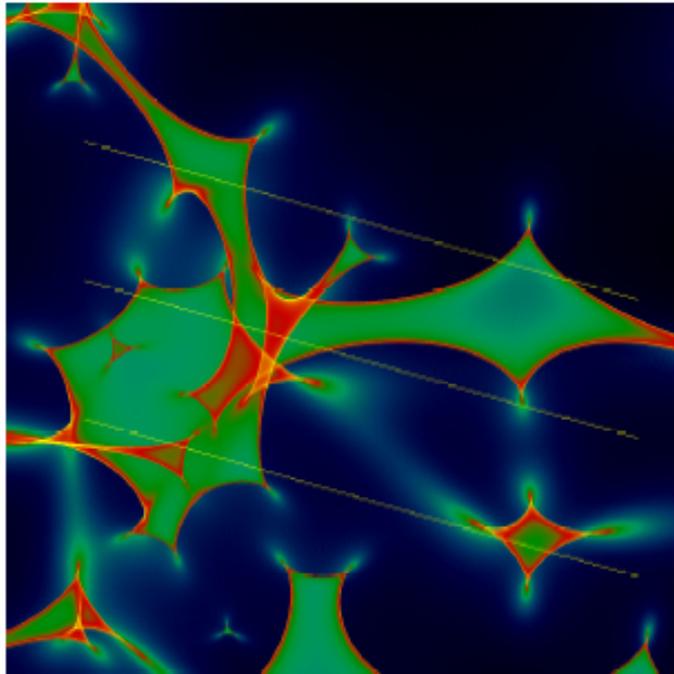
Z=1.41, Galaxie bei z=0.36

# Gravitationslinsen: Mehrfach-Abbildung Quasar, Q0957+561



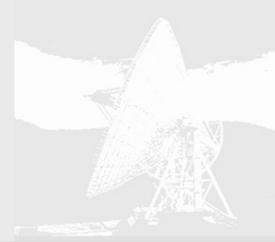


# Gravitationslinsen: Quasar Mikrolinseneffekte



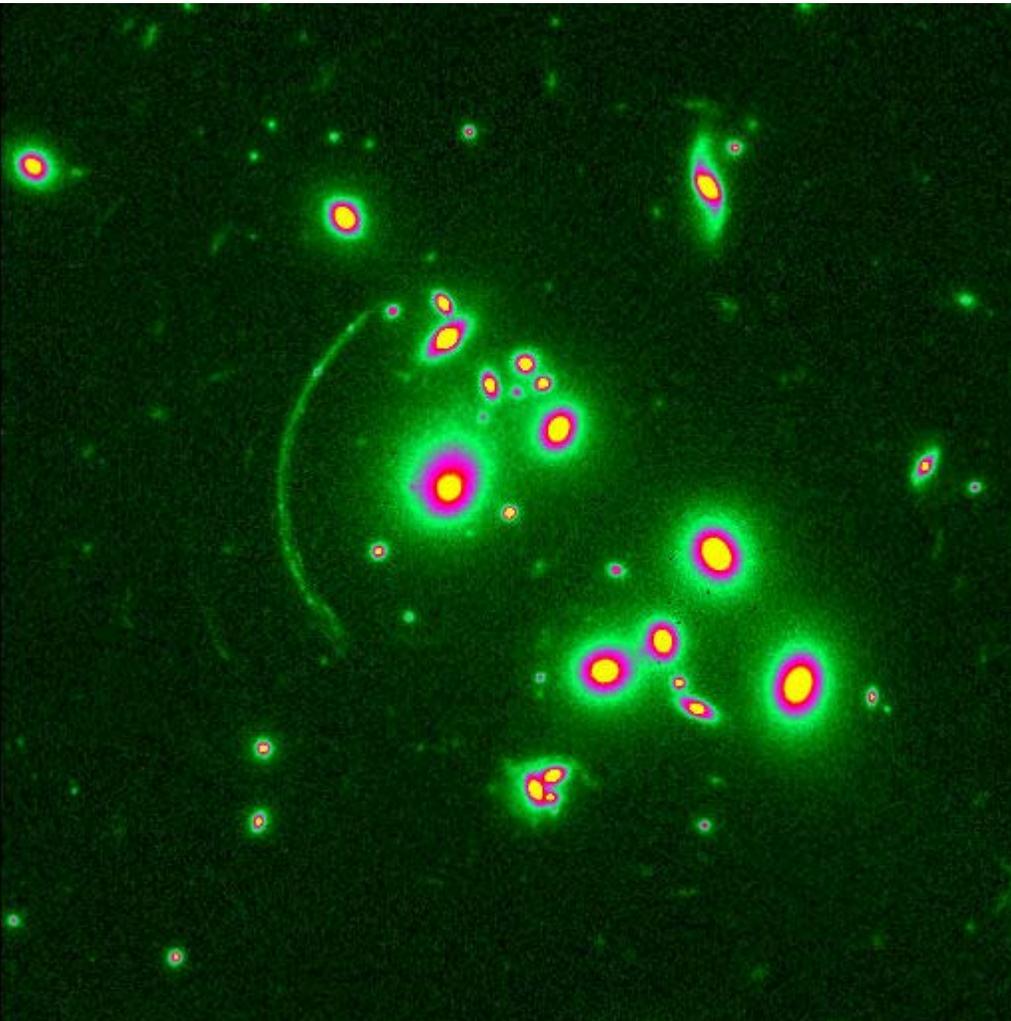
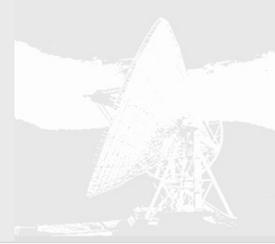
- Licht des gelinsten Quasars passiert die Galaxie und/oder den Halo, Galaxien beinhalten Sterne, Halos vermutlich kompakte Objekte
- Jeder Stern agiert als Mikrolinse und erzeugt zumindest ein Bild
- Bildaufteilung proportional zur Linsenmasse, Mikrobilder sind nur Mikrobogensekunden von einander entfernt und können nicht aufgelöst werden

# Gravitationslinsen: ``gelinste`` Galaxien



- Werden durch Galaxienhaufen gelinst
- Keine kompletten Einsteinringe: nicht-sphärische Massenverteilung, Linse und Quelle nicht perfekt ausgerichtet
- Gigantische Bögen: Verstärkung hochrotverschobener Galaxien, Potential und Massenverteilung des Haufens kann studiert werden (komplementär zu Röntgen- und Virial-Bestimmungen)

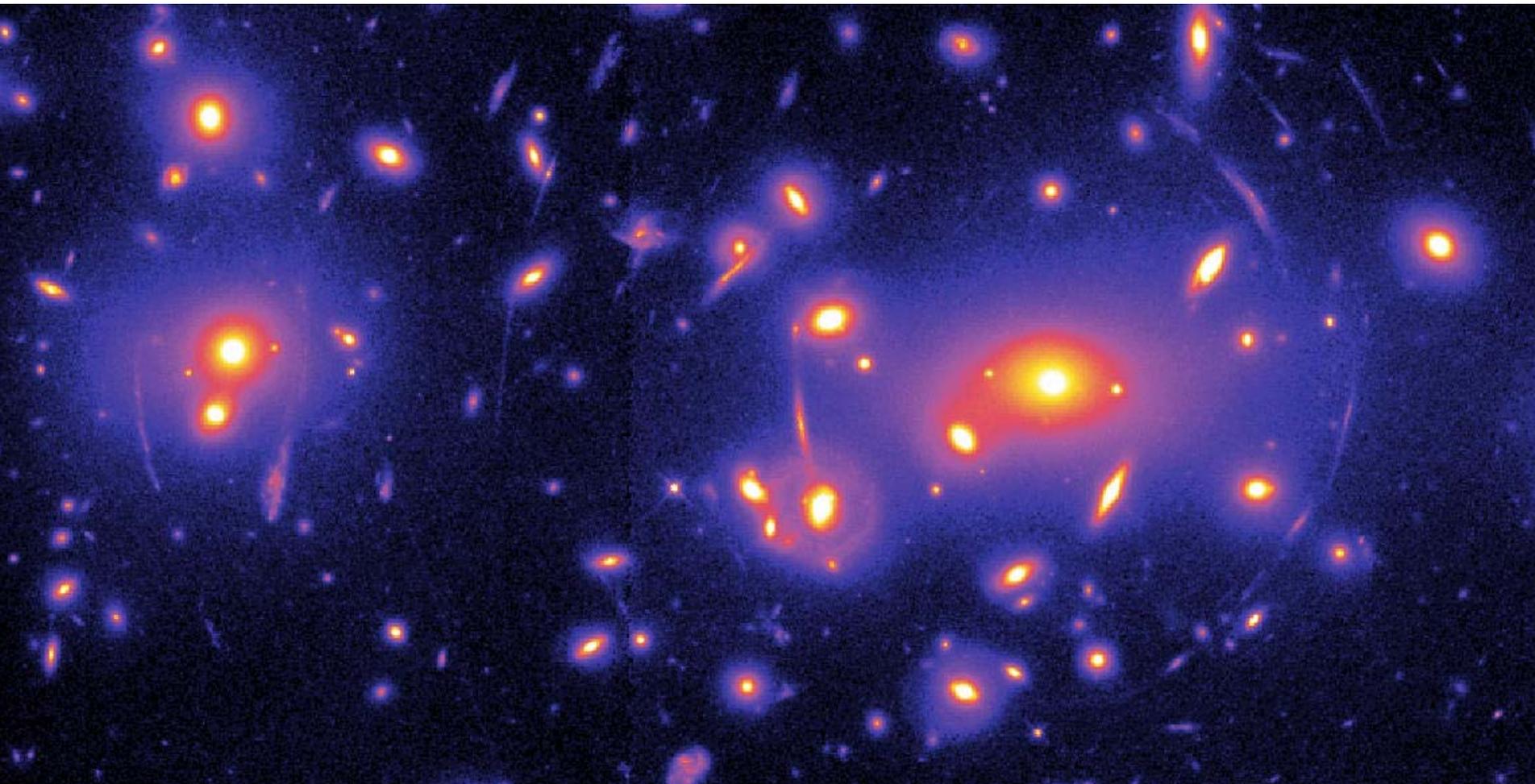
# Gravitationslinsen: Bögen



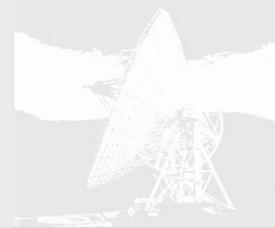
In manchen Galaxienhaufen, wie z.B. in Cl 2244-02 (links), tauchen ausgedehnte, bogenförmige Gebilde auf, die sogenannten *Arcs*. Sie kommen dadurch zustande, daß die Masse in Galaxienhaufen Licht ablenkt (ähnlich wie eine Glaslinse) und dabei Bilder weiter entfernter Objekte verzerrt. Die *Arcs* sind also stark verzerrte Bilder von Galaxien, die von uns aus gesehen weit hinter den Galaxienhaufen stehen. (Hubble Space Telescope ?)

# Gravitationslinsen: Bögen

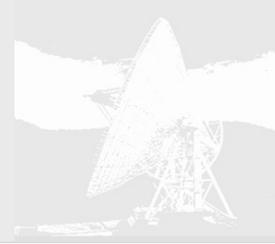
Einige Galaxienhaufen wie etwa Abell 2218 (unten) erweisen sich als übersät mit *Arcs*, wenn man sie mit dem *Hubble Space Telescope* beobachtet. Es ist klar zu erkennen, wie die *Arcs* und die weniger verzerrten *Arclets* (über 100) um das Zentrum des Galaxienhaufens herum gekrümmt erscheinen.



# Gravitationslinsen: als scharfes Teleskop



# Gravitationslinsen: Zwicky Teleskop



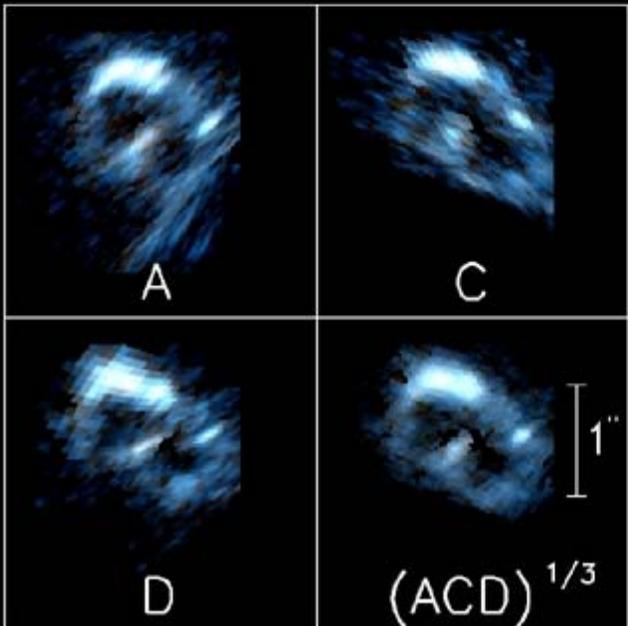
**Gravitational Lens**  
**Galaxy Cluster 0024+1654**

HST · WFPC2

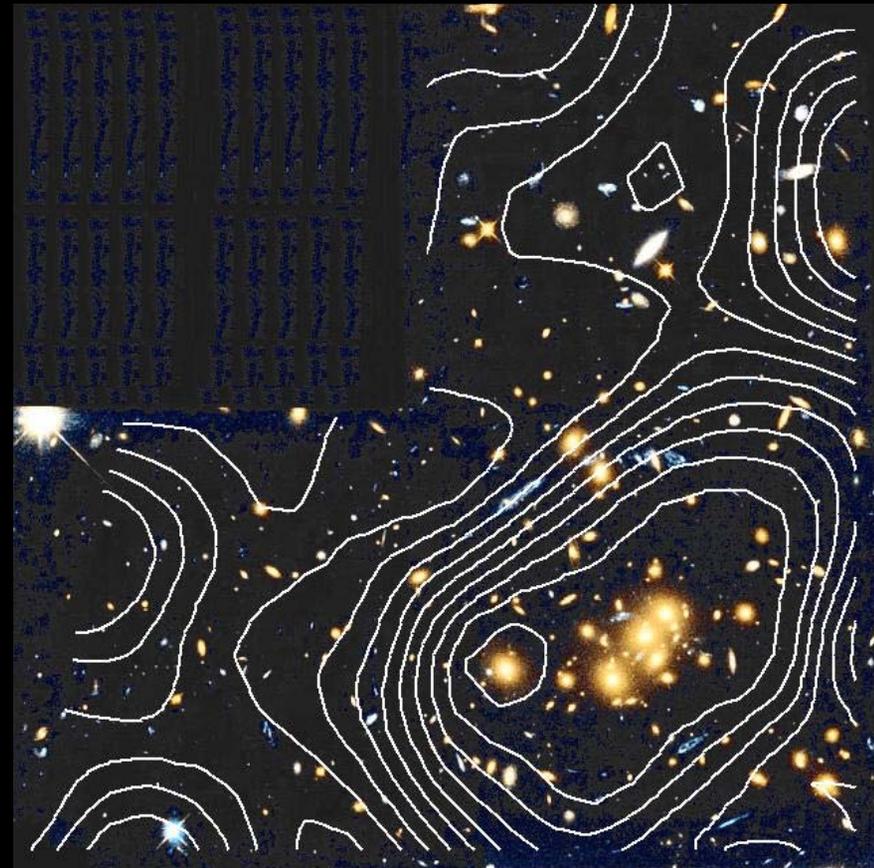
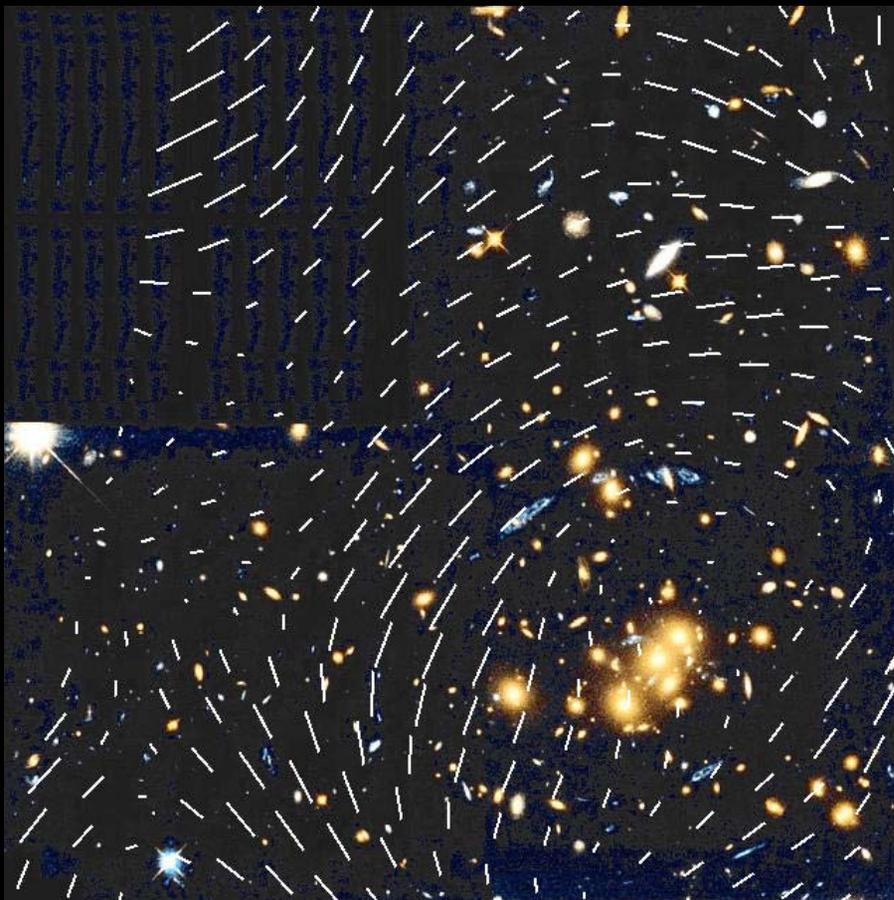
PRC96-10 · ST ScI OPO · April 24, 1996

W.N. Colley (Princeton University), E. Turner (Princeton University),  
J.A. Tyson (AT&T Bell Labs) and NASA

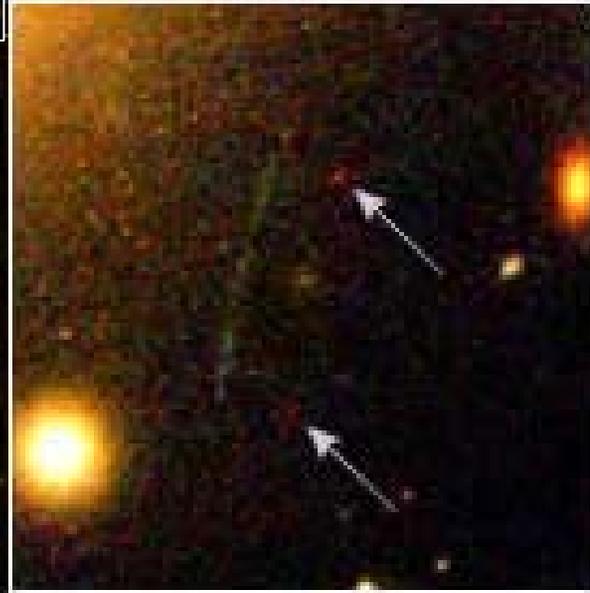
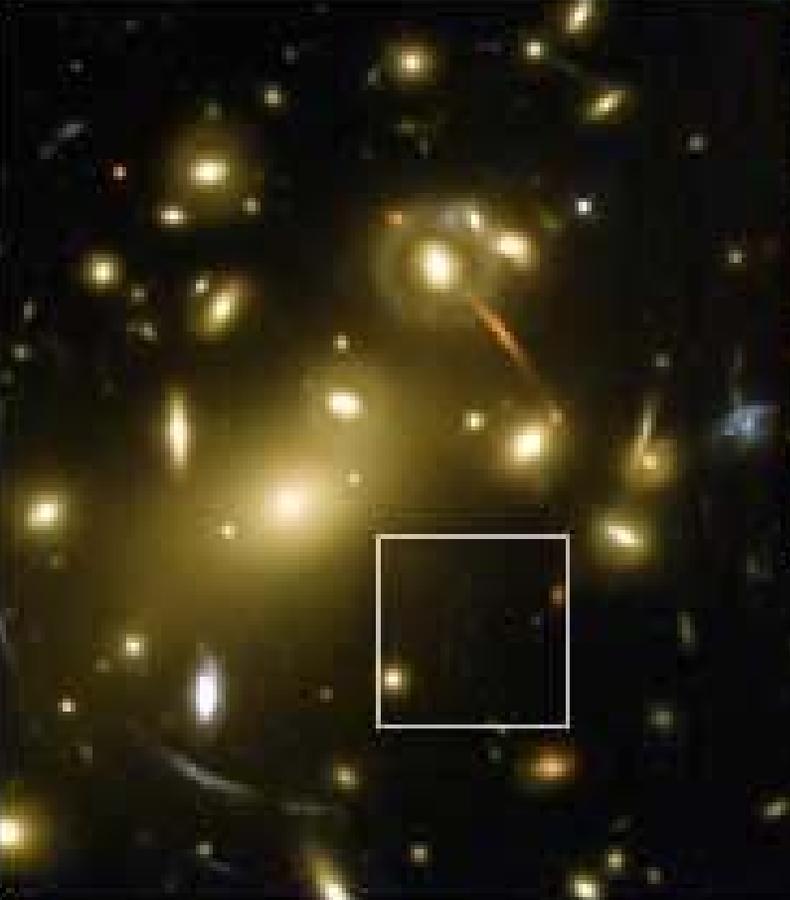
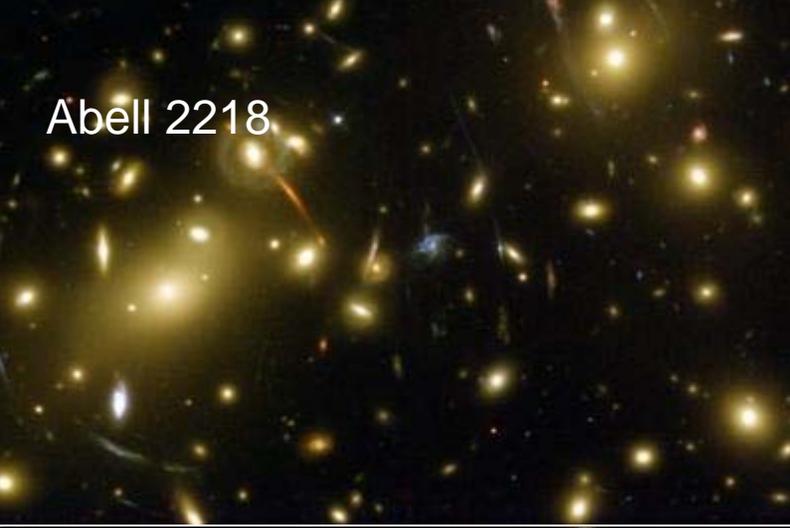
- $z=0.39$
- 5fach-Bild, 5 Bögen sind Bilder derselben Galaxie (vermutlich starburst),  
**Zwicky-Teleskop**
- Vergrößerung um Faktor 10, zusammen mit HST: Auflösung von 0.01 Bogensekunden



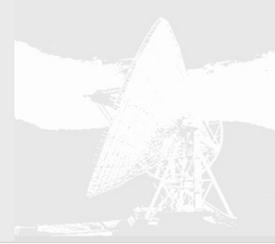
# Gravitationslinsen: Massenkarten



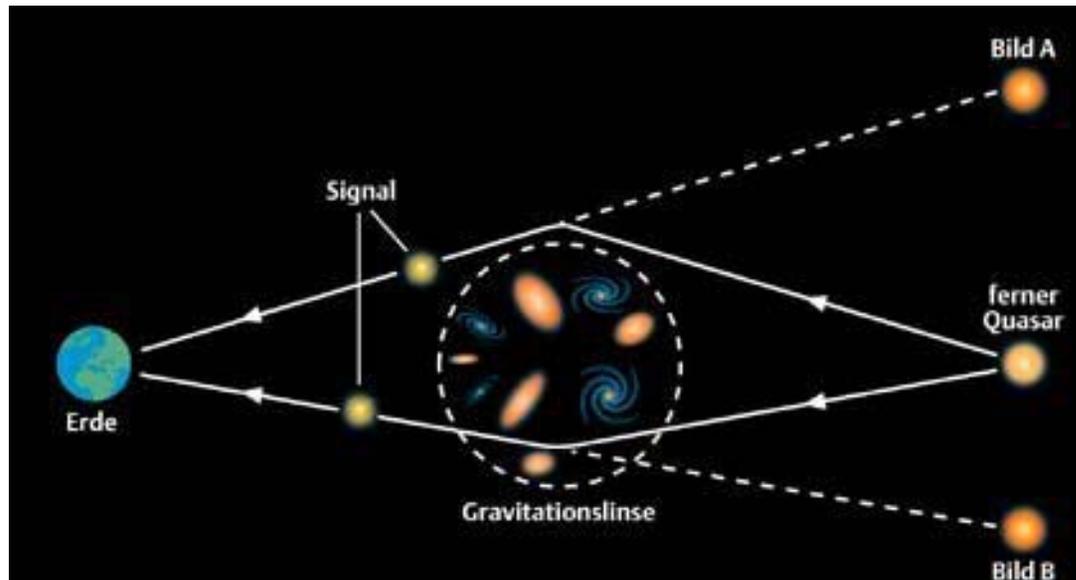
Abell 2218

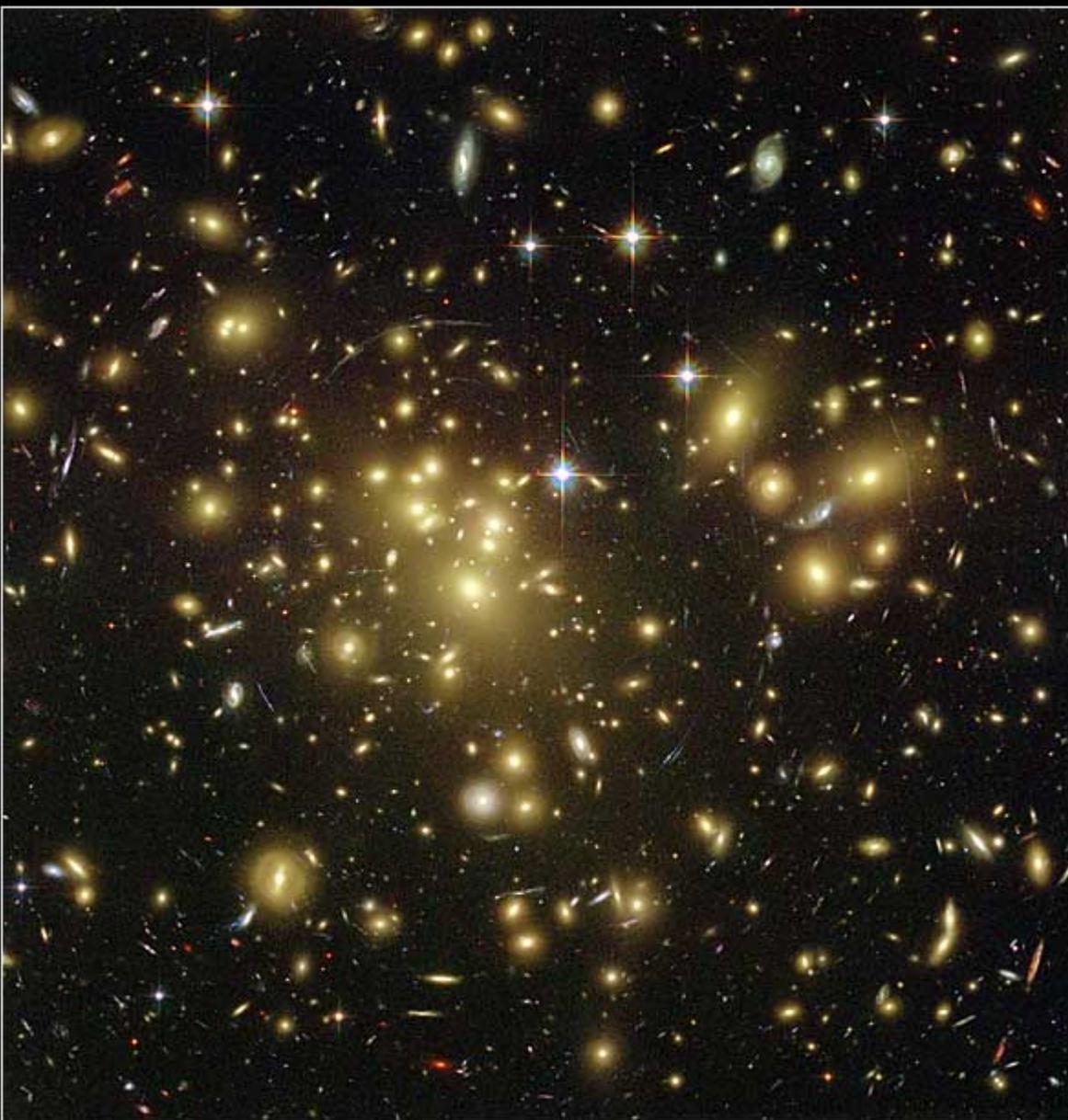


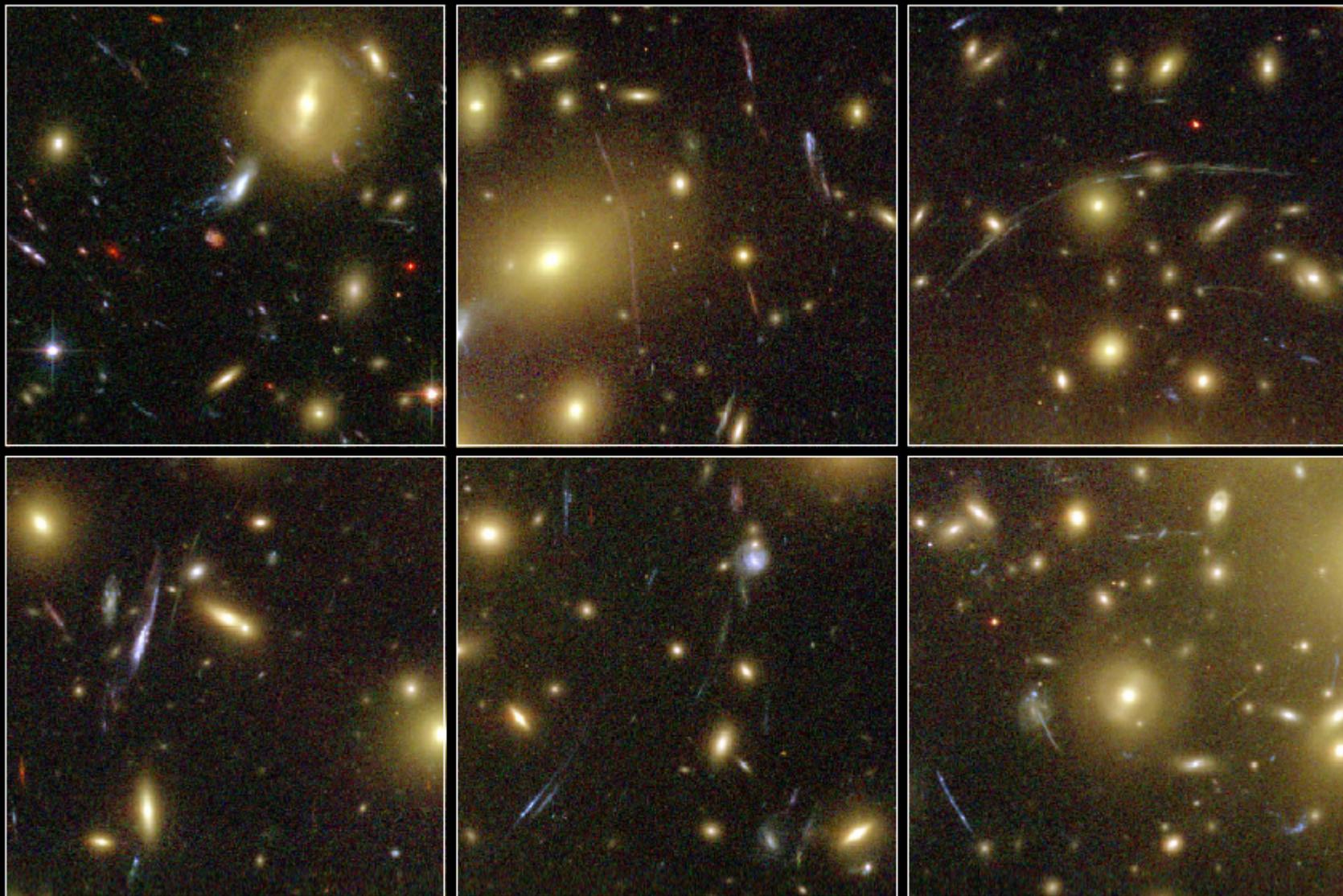
# Gravitationslinsen: Schwache Linseneffekte



- Wesentlich häufiger, entlang jeder Sichtlinie, nur nicht immer zu messen
- Größe und Helligkeiten von Objekten werden verändert
- -> Massenverteilung der Vordergrund-Galaxien und Haufen zu messen
- Erstes Beispiel: Abell 1689, Hintergrundquelle tangential zum Haufen -> Oberflächen-Massenverteilung des Haufens kann bestimmt werden



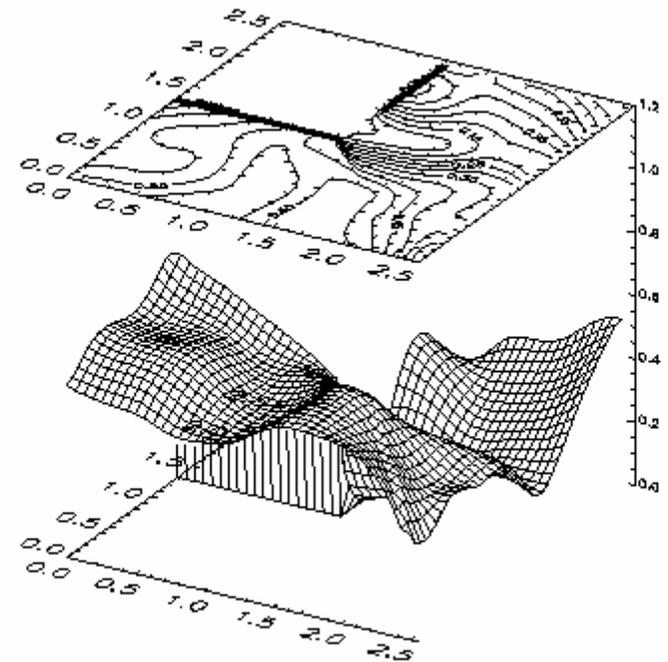
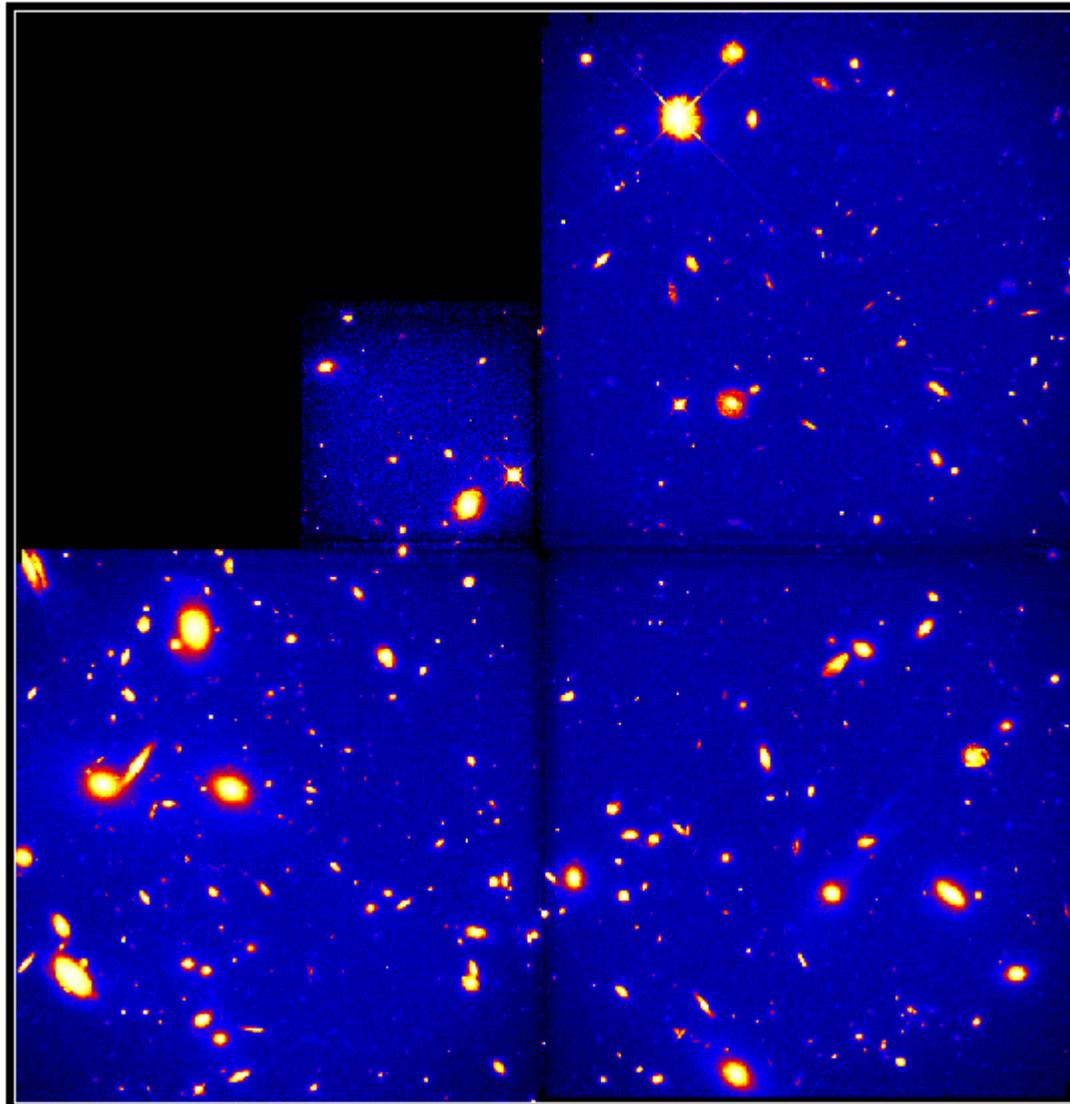
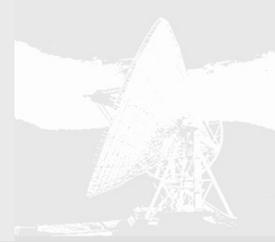




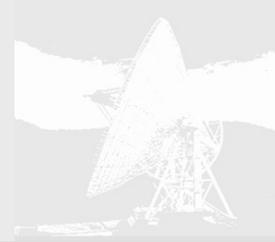
**Galaxy Cluster Abell 1689 Details**  
**Hubble Space Telescope • Advanced Camera for Surveys**

NASA, N. Benitez (JHU), T. Broadhurst (The Hebrew University), H. Ford (JHU), M. Clampin (STScI), G. Hartig (STScI), G. Illingworth (UCO/Lick Observatory), the ACS Science Team and ESA • STScI-PRC03-01b

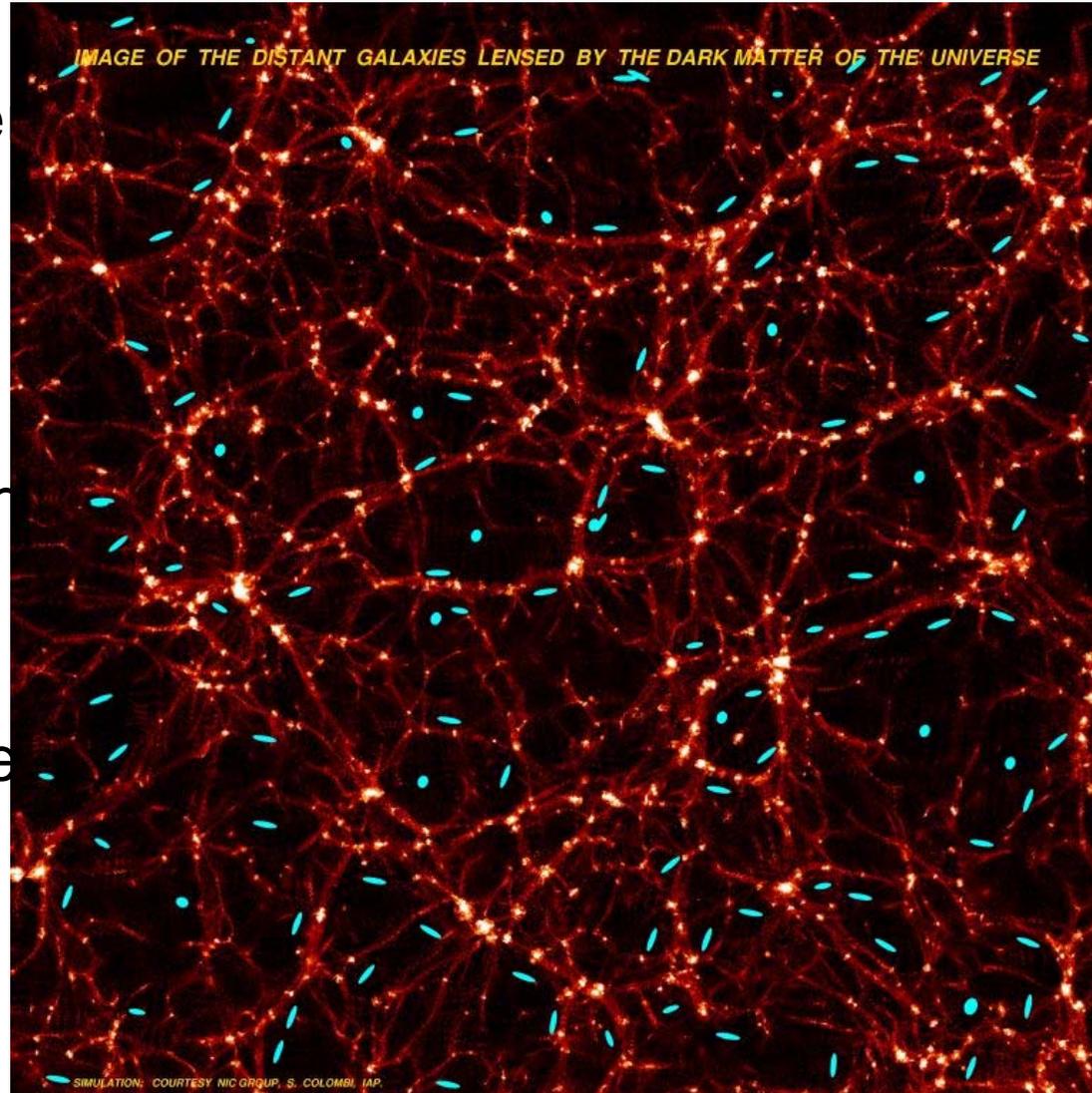
# Gravitationslinsen: Der schwache Linseneffekt



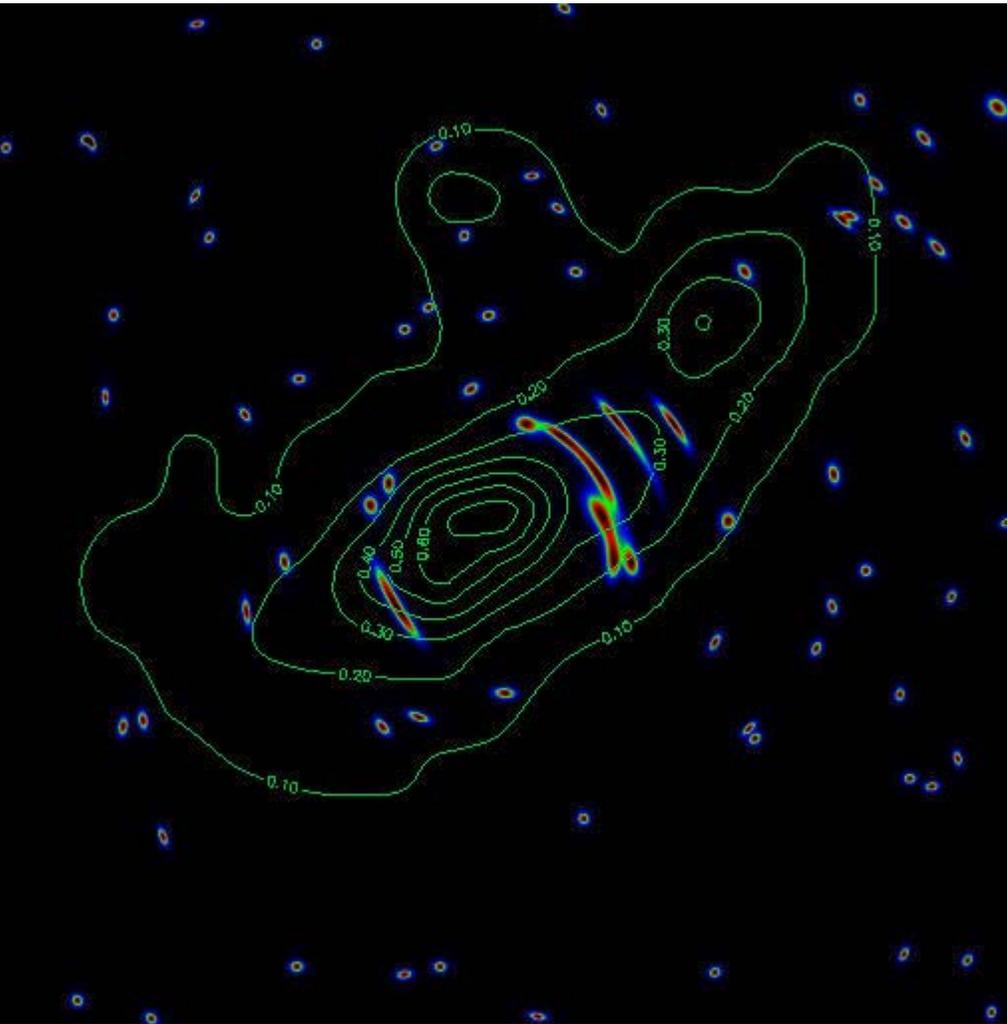
# Gravitationslinsen: Kosmologische Aspekte (starke Linseneffekte)



- I) Eine spezielle Linse analysieren: Anteil dunkle Materie und Hubble-Konstante bestimmen
- II) Statistisch: wieviele Quasare sind Mehrfachbilder, Materie bestimmen, Kosmologische Konstante ableiten
- Zu II): größte Durchmusterung bisher: CLASS, 7000 Radioquellen (Ziel: 10000), 12 Linsensysteme bisher gefunden (alle Linsen-Galaxien gefunden) ( $\Omega_{\Lambda} < 0.66$ )



# Gravitationslinsen: Simulationen



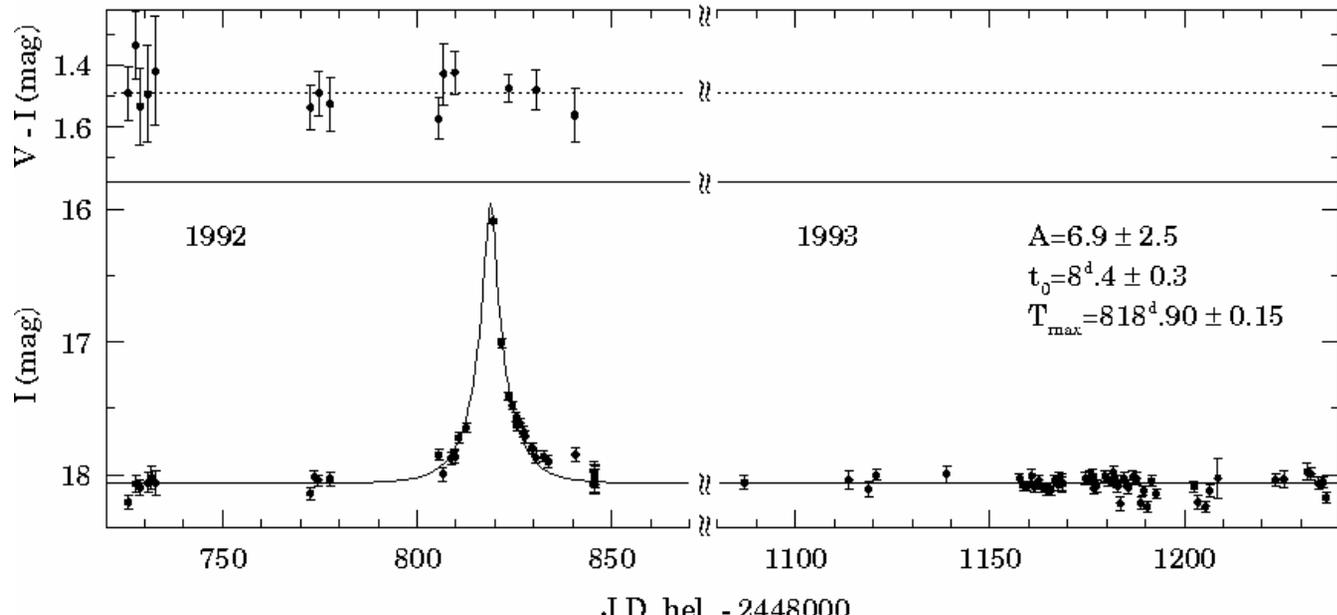
*Arcs* in Galaxienhaufen lassen sich in Simulationsrechnungen nachbilden, wie z.B. im Bild links. Anhand solcher Rechnungen konnten im Vergleich mit beobachteten Bögen wichtige Eigenschaften des Universums abgeleitet werden, z.B., daß die Materiedichte im Universum zu klein ist, als daß die Ausdehnung des Universums jemals wieder zum Stillstand oder gar zur Umkehr gebracht werden könnte.

M. Bartelmann, M. Steinmetz, A. Weiss; MPA

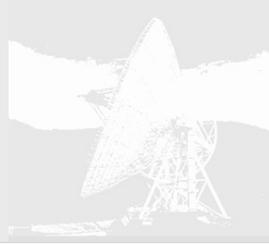
# Gravitationslinsen: Kosmologische Aspekte (Galaktische Mikrolinsen)

- Galaxienhalos müssen dunkle Materie enthalten (Braune Zwerge? Massen kleiner 0.08 Sonnenmassen, Temperatur nicht hoch genug um Helium-Brennen zu starten), MACHO (Massive Compact Halo Object), Fluktuationen in Sternen in LMC, 1/3 Mio LMC-Sternen wird gerade deutlich verstärkt! 6 Gruppen beobachten
- Weniger Ereignisse als erwartet wenn Halo der Milchstraße komplett aus diesen Objekten besten würde (konsistent mit 50%)
- Ähnliches Experiment in Richtung galaktischer bulge: 200 Ereignisse

OGLE  $\mu$ LENS #6: MM5-B I 128727



# Gravitationslinsen: Do it yourself!



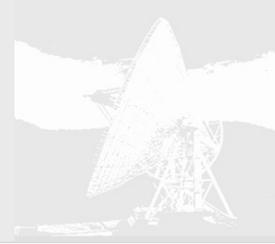
- Selber modellieren:

<http://www.iam.ubc.ca/~newbury/lenses/example/choose.html>



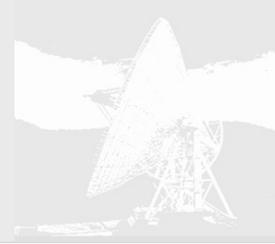
**Licht**

# Das griechische Altertum



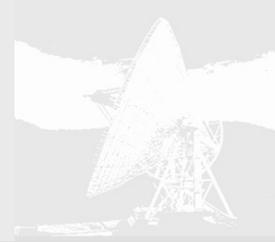
- 424-347 v.Chr. Plato: beschreibt Reflexion an Hohl- und Zylinderspiegel, erwähnt Brechung in Form des im Wasser gebrochen erscheinenden Ruders.
- 300 v.Chr. Euklid: ältestes Werk mit mathematischer Behandlung der Optik  
*Optik*: Perspektive, scheinbare Größe von Körpern
- 100-160 n. Chr. Ptolemäus: systematische Untersuchung der Lichtbrechung, erstellt Brechungstabellen, kennt noch kein Brechungsgesetz, findet Totalreflexion.

# Beginn der Neuzeit



- 1571-1630 Johannes Kepler: Beginn der modernen (geometrischen) Optik  
1604 "Paralipomena", 1611 "Dioptrik"  
Lichtstrahl ist rein geometrisches Gebilde, das die Richtung der Bewegung angibt  
Bewegung hat unendliche Geschwindigkeit,  
Oberfläche entspricht Wellenfront  
Theorie der Lochkamera, untersucht auch ihre Abbildungsfehler (-> Astronomie)  
erste richtige Erklärung des Auges, Wirkung von Brillen  
Suche nach Brechungsgesetz  
erklärt Strahlenverlauf durch Linsen, insbesondere Funktionsweise von Fernrohren.ca.

# Beginn der Neuzeit

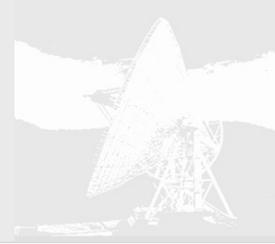


- 1601 Entdeckung des Brechungsgesetzes in Form einer geometrischen Konstruktionsvorschrift durch [Thomas Harriot](#) (1560-1621).
- 1621 [Snellius](#) (Willebrord Snell van Roijen, 1591-1626) entdeckt das Brechungsgesetz erneut, wird fälschlicherweise aber oft als Erstentdecker genannt.
- 1638 [Galilei](#) (1564-1642) beschreibt einen Versuch zum Beweis der Endlichkeit der Lichtgeschwindigkeit, kann aber nur ihre ggf. immense Größe feststellen.



# Huygens: Wellen

# Beginn der Neuzeit

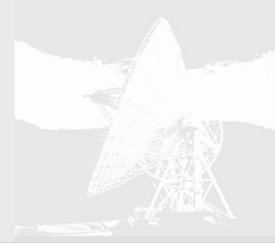


- 1629-1695 Christian Huygens: wird als Begründer der Wellentheorie genannt  
1678 Theorie der Academie des Sciences in Paris vorgetragen  
1690 in *Taite de la Lumiere* veröffentlicht  
Licht = Wellenbewegung mit endlicher Geschwindigkeit (nicht unbedingt periodisch)  
schließt Korpuskulartheorie aus  
setzt alledurchdringenden Äther mit vollkommener Härte und großer Elastizität und im dichteren Medium kleinere Lichtgeschwindigkeit voraus
- fundamentalster Beitrag: "Huygenssches Prinzip"  
erklärt ungestörte Durchkreuzung der Lichtstrahlen  
leitet Reflexions- und Brechungsgesetz ab  
erklärt Doppelbrechung  
entdeckt die mit der Doppelbrechung verbundene Polarisation



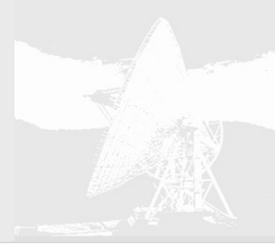
# Newton: Korpuskel

# Beginn der Neuzeit



- 1635-1703 Robert Hooke: tritt als erster definitiv für eine Wellentheorie ein  
Rivale Newtons befaßte sich eingehend und systematisch mit "Farben dünner Schichten,,
- 1643-1727 Sir Isaac Newton  
1672: veröffentlicht *New Theory about Light and Colors*  
Farben sind keine Eigenschaften des Lichtes, sondern seine ursprüngliche und angeborene Form, "weiß" entsteht durch Mischung  
1675: veröffentlicht *An Hypothesis explaining the Properties of Light*  
vertritt darin ein Korpuskel-Modell des Lichts  
erklärt damit Reflexion, Brechung, Dispersion, Beugung, Farben dünner Schichten  
betont immer, daß sein Modell nur der Veranschaulichung dient und nur eine unter mehreren Hypothesen über die Natur des Lichtes sei

# Beginn der Neuzeit

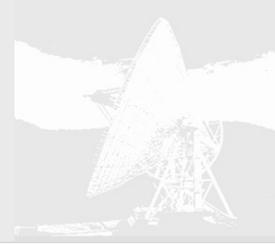


- 1704: veröffentlicht in *Opticks or a Treatise of the Reflections, Refractions, Inflections and Color of Light* eine Zusammenfassung seiner Ergebnisse, vermeidet dabei die Hypothese über die Natur des Lichts spricht auch vom Äther, der alles durchdringt, setzt aber eine im dichteren Medium größere Lichtgeschwindigkeit voraus zur Erklärung der Phänomene sind viele Zusatzannahmen nötig, die Newton sehr nahe an die Wellentheorie führen insgesamt war seine Vorstellung von Licht besser zur Erklärung der meisten damals bekannten Phänomene geeignet.



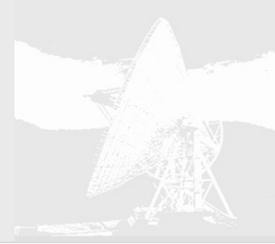
# Young: Wellen

# Welle oder Korpuskel?



- 1773-1829 Thomas Young: entdeckt das Interferenzprinzip, damit wird die wellentheoretische Erklärung von Farben dünner Schichten und Beugungserscheinungen möglich. 1800 Argumente gegen die Korpuskulartheorie:
  - (1) Unabhängigkeit der Lichtgeschwindigkeit von der Art der Lichtquelle
  - (2) teilweise Reflexion an einem durchsichtigen Medium
  - (3) Farben dünner Schichten1801 Aufstellung des allgemeinen Interferenzprinzips  
berechnet die Enden des sichtbaren Spektrums  
1802 Präzisierung, Einführung der "Wellenlänge"  
erklärt die Farberscheinungen beim Auftreffen des Lichts auf geritzte Flächen (seit Fraunhofer (1821):  
Beugungsgitter)

# Welle oder Korpuskel?

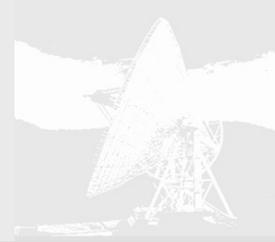


- führte auch bei Beugung entstehende farbige Streifen auf Interferenz zurück. 1807 beschreibt in *A course of lectures on natural philosophy and the mechanical arts* den Doppelspaltversuch  
beschreibt auch die Wellenwanne  
Die Ideen von Young konnten sich zunächst nicht durchsetzen, da sie nicht klar, präzise und systematisch genug vorgetragen wurden.



Welle oder Korpuskel?

# Welle oder Korpuskel?

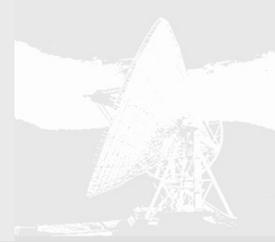


- 1787-1826 [Joseph Fraunhofer](#): entdeckt die dunklen Linien im Sonnenspektrum 1821 Einführung des optischen Beugungsgitters  
Erklärung der Beugung durch Annahme von parallelem Licht  
Untersuchung von Einfach-, Doppelspalt und Gitter  
extrem genaue Bestimmung von Wellenlängen. .
- 1850 Nachweis der kleineren Lichtgeschwindigkeit im optisch dichteren Medium durch [Foucault](#). Das war der tödliche Stoß für die Korpuskulartheorie.
- 1887 [Michelson](#) und [Morley](#) widerlegen die Existenz eines nach den bisherigen Vorstellungen notwendigen "Ätherwindes", daraus resultiert später die Aufgabe der Äthervorstellung.

The background of the slide is a vibrant green color with a pattern of bright, thin white lines radiating from a central point, resembling a starburst or a laser light effect. The lines are most prominent in the center and become fainter towards the edges.

# Elektromagnetische Lichttheorie

# Elektromagnetische Lichttheorie



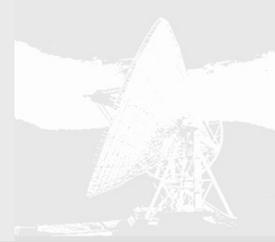
- 1791-1867 [Michael Faraday](#)

1845 entdeckt mit dem sog. "Faradayeffekt" einen Anhaltspunkt für den Zusammenhang zwischen Licht und Elektrizität.

dreht mit einem Magnetfeld in Flintglas die Polarisationssebene des Lichtes.

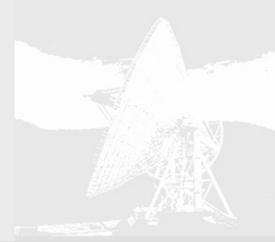
"Der ganze Raum ist von Kraftlinien durchsetzt, und die Licht- und Wärmestrahlen sind Transversalwellen, die längs dieser Kraftlinien fortschreiten." .

# Elektromagnetische Lichttheorie



- 1831-1879 James Clerk Maxwell: verbindet mechanische Analogien mit der Feldvorstellung Faradays stellt seine "Maxwellschen Gleichungen" auf setzt elektrische Konstanten mit der Lichtgeschwindigkeit und dem Brechungsindex in Beziehung betrachtet Licht als elektromagnetische Welle, die einen Transport von elektrischer und magnetischer Feldenergie bedeutet erklärt damit die Doppelbrechung, Undurchsichtigkeit elektrischer Leiter und den Faraday-Effekt

# Elektromagnetische Lichttheorie

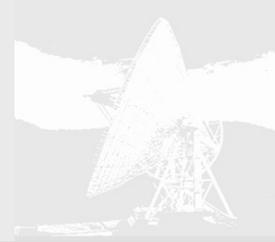


- 1857-1894 Heinrich Hertz: leitet alle bekannten elektrischen und magnetischen Erscheinungen aus den Maxwell'schen Gleichungen ab. 1886 Nachweis "Maxwell'scher Wellen" weist optische Eigenschaften der elektromagnetischen Wellen nach: Geradlinigkeit, Beugung, Polarisation, Reflexion, Brechung.
- 1881/87 Michelson und Morley können den Ätherwind nicht nachweisen und damit die Existenz des Äthers bekräftigen.
- 1879-1955 Albert Einstein: 1905 entwickelt die spezielle Relativitätstheorie eine Einführung eines "Lichtäthers" erweist sich als überflüssig.

The background of the slide is a vibrant green color with a pattern of bright, white laser-like lines radiating from a central point, creating a starburst or sunburst effect. The lines vary in thickness and angle, some being more prominent than others. The overall effect is dynamic and high-tech.

# Lichtquantentheorie

# Lichtquantentheorie



- 1887 Entdeckung des "Photoeffekts" durch Heinrich Hertz  
Es zeigt sich, daß die Energie des Lichts nicht kontinuierlich über den durchstrahlten Raum verteilt ist.
- 1900 Max Planck stellt seine Strahlungsformel auf es ergibt sich ein "Energieelement"  $h \cdot \nu$  (hält nichts von Quanten)
- 1905 Einstein erklärt die Erscheinung durch "Lichtquanten" (Quanten sind real) 1922 Erklärung des "Compton-Effekts" (Streuung von Röntgenstrahlen, wobei Photonen und Elektronen Energie und Impuls austauschen) mit der Lichtquantenhypothese.

# Welle-Teilchen-Dualismus



- Unbefriedigende Situation: je nach Experiment muß das Licht entweder als Teilchenstrom oder als Welle interpretiert werden
- Moderne Quantentheorie: gelingt mit Wahrscheinlichkeitsinterpretation beide Aspekte zu vereinigen, jede Materie besitzt nicht nur Teilcheneigenschaften sondern kann auch als Welle („Materiewelle“, de Broglie-Gleichung) beschrieben werden

The background of the slide is a vibrant green color with a pattern of bright, thin white lines radiating from a central point, resembling a starburst or a laser light effect. The lines are evenly spaced and extend towards the edges of the frame.

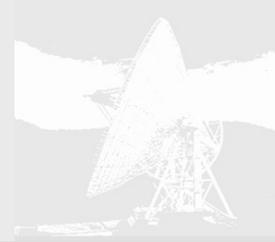
# Welle-Teilchen Dualismus

# Welle-Teilchen-Dualismus



- 1923 De Broglie ordnet jedem bewegten materiellen Teilchen ein "Phasenwelle" zu.
- 1926 Erwin Schrödinger entwickelt die "Wellenmechanik"  
--> Schrödingergleichung
- 1927 Werner Heisenberg findet die Unschärferelation

# Schrödinger und seine Katze

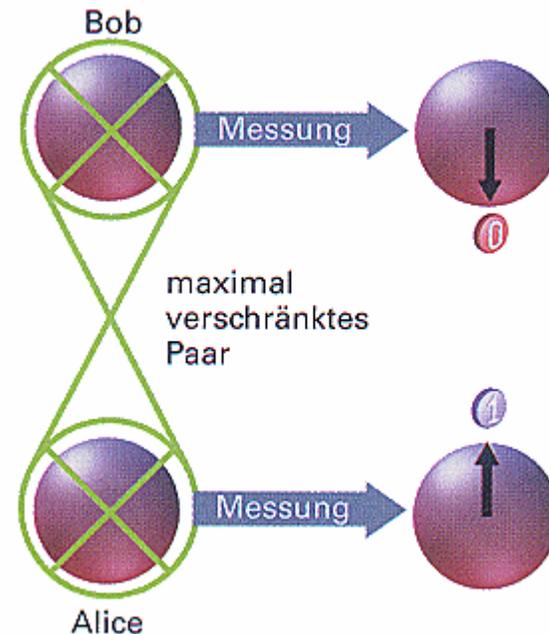


- Quantenmechanik beschreibt ein physikalisches System mittels der *Wellenfunktion*, die *Wellenfunktion* beschreibt den Zustand des Systems, bei einer Messung nimmt das System einen der Eigenzustände des Messoperators an
- Erst im Augenblick der Messung entscheidet sich, welchen Eigenzustand das System annimmt
- Zustand vor der Messung läßt sich als Überlagerung (Superposition) aller Eigenzustände auffassen
- **Verschränkung (1935):**

# Schrödinger: **Verschränkung**



- Eine besondere quantenmechanische Eigenschaft ist die **Verschränkung**. Zwei oder mehr Teilchen bezeichnet man als verschränkt, wenn sie nicht unabhängig voneinander beschrieben werden können.



- Dieser Zustand kann zum Beispiel durch eine Wellenfunktion beschrieben werden, bei der die Wahrscheinlichkeit, mit denen eine Eigenschaft des einen Teilchens gemessen wird, von der Messung des anderen Teilchens abhängt.

# Schrödinger: Verschränkung

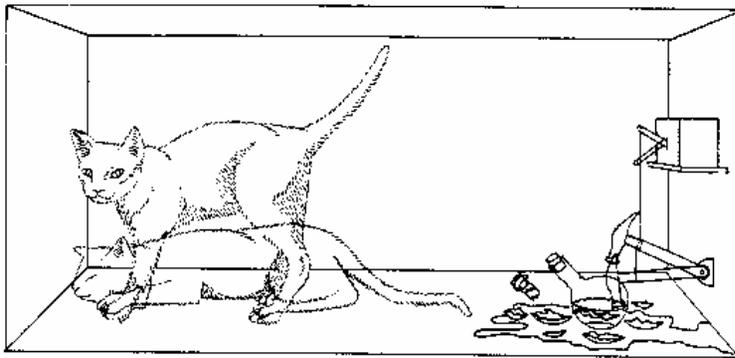


Geschlossener Raum, Atomkern, Zerfall wird mit Geigerzähler detektiert-> setzt Giftgas frei, Katze wird getötet

Nach Ablauf der Zeitspanne: Zustand der Überlagerung (noch nicht zerfallen *und* zerfallen), **Katze lebendig *und* tot**

Erst beim Öffnen des Raums (Messung) kann man über den Zustand der Katze eine Aussage treffen

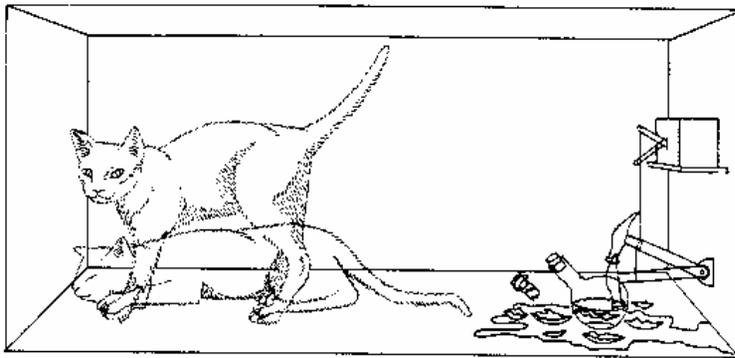
- Philosophie: Erkenntnis und Wahrheit -> **Kopenhagener Interpretation**



# Schrödinger: Verschränkung



- ... die Dekohärenz läßt darauf schließen, daß sich die Katze nicht in irgendeinem absurden Mischzustand zwischen Tod und Leben befinden wird
- „When I hear of Schrödinger’s cat, I reach for my gun.“  
Stephen Hawking

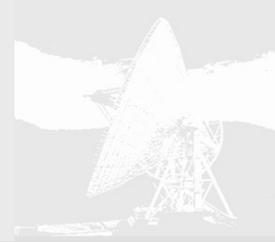


# Schrödinger bleibt skeptisch ...



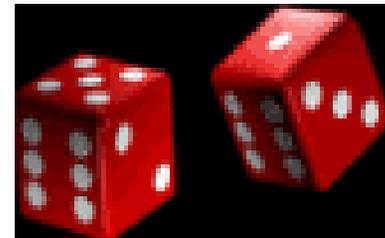
- **„Wenn es doch bei dieser verdammten Quantenspringerei bleiben soll, so bedaure ich, mich überhaupt jemals mit Quantentheorie abgegeben zu haben.“ sagte der österreichische Physiker Erwin Schrödinger**

# Kopenhagener Deutung

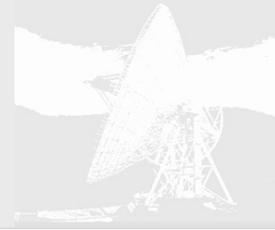


- **Albert Einstein** war die Wahrscheinlichkeitsdeutung der Wellenfunktion immer ein Dorn im Auge. Er vermutete, dass die Quantenmechanik nicht die vollständige Beschreibung der Natur ist, sondern dass **versteckte Variablen** hinter der Wellenfunktion stecken.

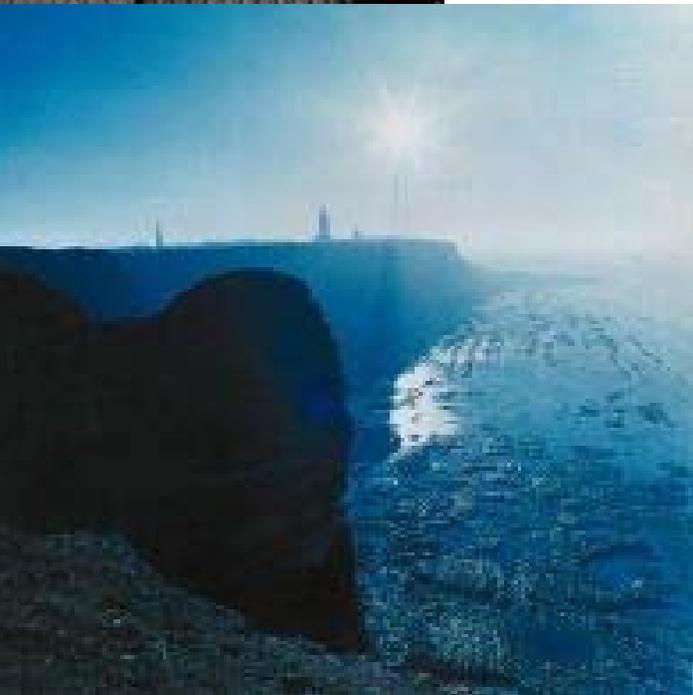
"Gott würfeln nicht."



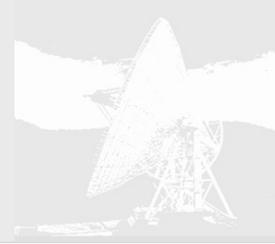
# Heisenberg auf Helgoland



Geistesblitz": Heisenberg kurierte im Frühjahr 1925 einen Anfall von "Heufieber" auf der Insel Helgoland aus. Nachdem er mehrere Tage damit zugebracht hatte, auf den Klippen herumzuklettern, über Physik nachzudenken und Gedichte aus Goethes West-Östlichem Divan auswendig zu lernen, kam eines nachts um drei der Geistesblitz: "Ich hatte das Gefühl, durch die Oberfläche der atomaren Erscheinungen hindurch auf einen tief darunter liegenden Grund von merkwürdiger innerer Schönheit zu schauen (...) ich war so erregt, dass ich an Schlaf nicht denken konnte." So erwartete er auf der Spitze eines ins Meer hineinragenden Felsenturmes den Sonnenaufgang. Seit Juni 2000 erinnert daran sogar ein Gedenkstein auf der Insel.



# Kopenhagener Schule



Niels Bohr Institute  
Blegdamsvej 17  
DK - 2100 Copenhagen  
ØPhone: (+45) 35 32 52 09  
Fax: (+45) 35 32 50 16



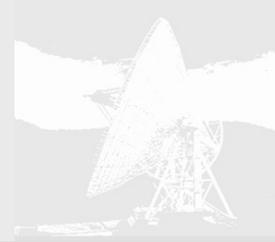
Niels Bohr (links) und Albert Einstein auf dem Solvay-Kongress

(Quelle: AIP Emilio Segrè Visual Archives, Foto: Paul Ehrenfest Sen.)

Werner Heisenberg (links) mit Niels Bohr im Kopenhagener Institut (Quelle: AIP Emilio Segrè Visual Archives, Foto: Paul Ehrenfest Jun.)

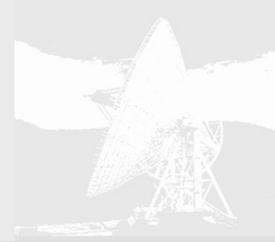


# Kopenhagener Schule



- Mai 1926: Heisenberg geht als Dozent für theoretische Physik nach Kopenhagen: Schrödingers Wellenmechanik (halb-klassisch) als Herausforderung, will neue Physik schaffen
- Bohr und Heisenberg diskutieren Monate: wie ist das in der Matrizen- und Wellenmechanik gefundene Rechenschema erkenntnistheoretisch zu interpretieren?
- Spannungen: Bohr fährt im Februar 1927 (ohne Heisenberg) nach Norwegen, Skifahren! Bohr verfaßt das „Komplementaritätsprinzip“, Heisenberg das Manuskript: „Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik“ (wichtigste Aussage: **Unschärferelation!!**), beide Arbeiten werden die Säulen der „Kopenhagener Deutung der Quantentheorie“

# Heisenbers Unschärferelation



- 1927: Ort und der Impuls eines Teilchens niemals zugleich genau gemessen werden können. Diese Größen unterliegen einer **Unschärfe**. Die Unschärfe beider Größen ist durch die **Heisenbergsche Unschärferelation** (auch Unbestimmtheitsrelation) verknüpft.
- Weitere Observablen die der Unschärfe unterliegen: Lebensdauer und Energie eines Zustands oder zwei beliebige Komponenten des Spin, usw.

# „Quantenei“



- "Heisenberg hat ein großes Quantenei gelegt", schrieb Einstein im September 1925 an seinen Freund Ehrenfest, "in Göttingen glauben sie daran (ich nicht)".

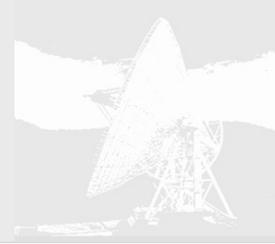
Studenten über Einstein:  
"Die Quantentheorie versteht er, nur schade, daß er sie nicht mag."





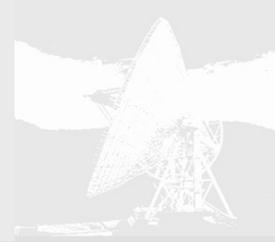
# Kopenhagener Deutung

# Kopenhagener Deutung

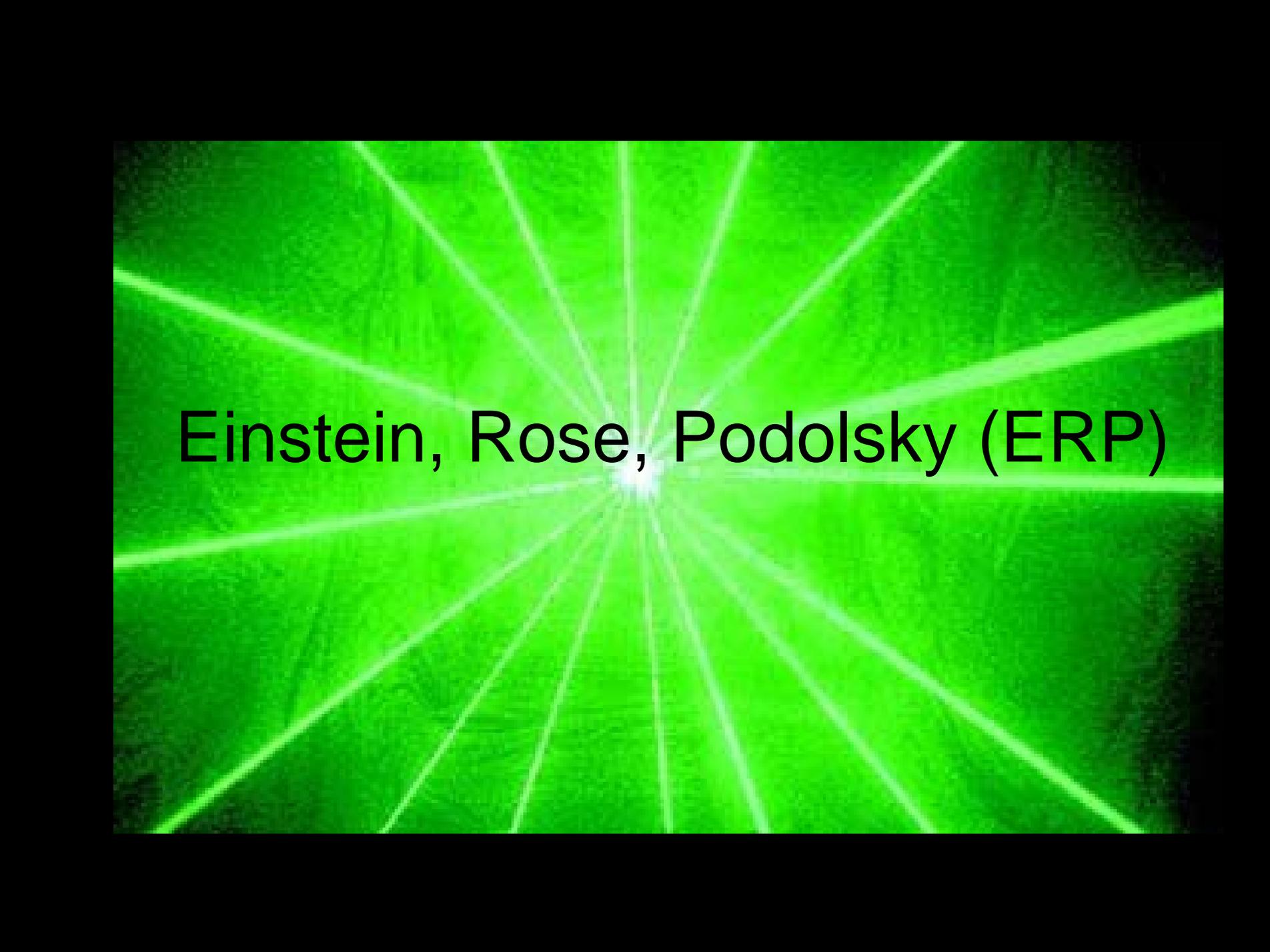


- Die wohl erfolgreichste Deutung der Wellenfunktion ist die **Kopenhagener Deutung**. Sie ist nach der Kopenhagener Schule um **Niels Bohr** benannt, obwohl sie eigentlich von **Max Born** in Göttingen eingeführt wurde. Max Born erhielt hierfür den Nobelpreis. In Kopenhagen wurde diese Interpretation dann von W. Heisenberg, E. Schrödinger und anderen weiterentwickelt und interpretiert.
- Nach der Kopenhagener Deutung befindet sich das Teilchen nicht an einem bestimmten Ort, sondern gleichzeitig an allen Orten, an denen die Wellenfunktion nicht Null ist. Erst im Moment einer Ortsmessung bricht die Wellenfunktion zusammen und es entsteht ein Teilchen an einer bestimmten Stelle. Dieser **Kollaps** der Teilchenwelle ist umstritten, man kommt in vielen Fällen auch zu richtigen Ergebnissen, ohne einen Zusammenbruch der Wellenfunktion anzunehmen. Für die praktische Anwendung ist dieser Kollaps aber sehr hilfreich, da er das Weiterrechnen vereinfacht.

# Kopenhagener Interpretation (Zusammenfassung)

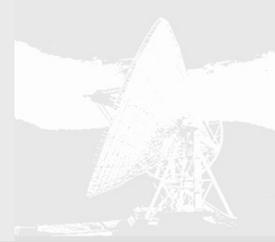


- **KI1**
  - **Positivismus:** Die Quantentheorie bezieht sich auf das atomare Naturgeschehen, wie es sich zeigt, wenn es mit realisierbaren Meßgeräten untersucht wird.
- **KI2**
  - **Wahrscheinlichkeit und Wissen:** Die Zustandsfunktion zur Beschreibung eines atomaren Systems meint lediglich die Wahrscheinlichkeitsamplitude, mit der Systemzustände sich entwickeln. Sie beinhaltet nur das Wissen, das wir von einem System haben können.
- **KI3**
  - **Unbestimmtheitsprinzip:** Die methodische Forderung, Objekte zu beschreiben, hat eine Unschärfe in der Voraussage inkommensurabler Eigenschaften dieser Objekte zur Folge.
- **KI4**
  - **Korrespondenz und Komplementarität:** Quantenzustände atomarer Systeme müssen mit Begriffen und Verfahren der klassischen Physik ausdrückbar sein. Die Individualität und Totalität der Quantenzustände hat eine Komplementarität und Unbestimmtheit der klassischen Begriffe und Verfahren zur Folge.
- **KI5**
  - **Abgeschlossenheit und Einheit:** Physikalische Theorien sind im Rahmen ihrer Geltungsbereiche abgeschlossen. Korrespondenzregeln zwischen ihnen vermitteln Übergänge. Die erlebte Einheit der Natur sollte in der Einheit der Physik ausdrückbar sein.



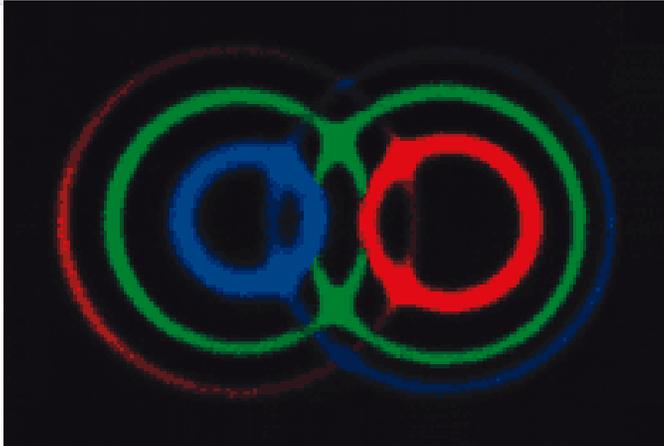
Einstein, Rose, Podolsky (ERP)

# EPR-Paradoxon

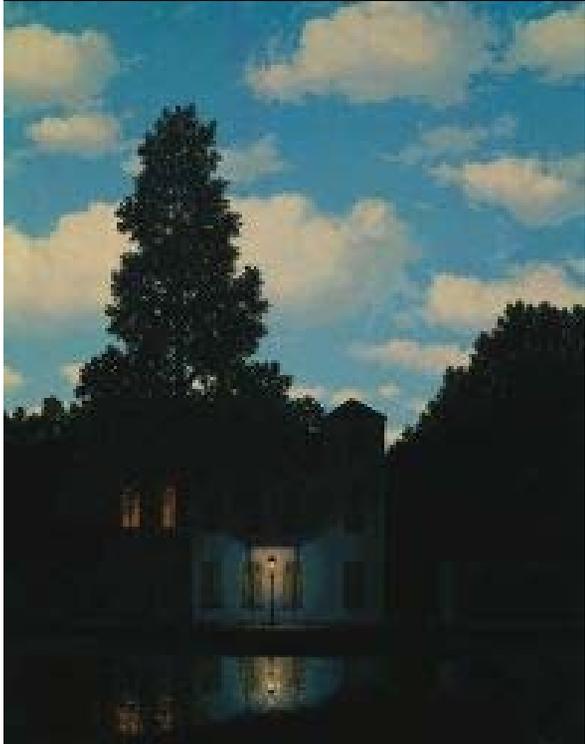


- Der **EPR-Effekt** (nach den Autoren des Artikels, in dem er das erste Mal thematisiert wurde – [Einstein](#), [Podolski](#), [Rosen](#)), zuweilen auch **EPR-Paradoxon** genannt, ist ein zunächst als Gedankenexperiment, später aber auch im Labor nachgewiesener Effekt in der [Quantenmechanik](#), der gegen die Regeln des klassischen lokalen Realismus verstößt.
- Grundsätzlich weist ein solches EPR-artiges Experiment stets zwei Charakteristika auf:
  - Es wird ein System aus zwei Teilchen betrachtet, die anfänglich direkt miteinander wechselwirken und sich darauf weit voneinander entfernen. Ein solches System wird durch **einen** quantenmechanischen Zustand beschrieben, das heißt die beiden Teilchen befinden sich in einem [verschränkten Zustand](#).
  - An den räumlich getrennten Teilchen werden zwei komplementäre Messgrößen betrachtet, deren gleichzeitige, exakte Bestimmung nach [Heisenbergs Unbestimmtheitsrelation](#) unmöglich ist. (Auflösung durch: In der [Kopenhagener Deutung](#) wird das Paradoxon aufgelöst mit dem Hinweis darauf, dass die indirekte Bestimmung über die Messung am zweiten Teilchen eben gar keine Messung der Eigenschaft des ersten Teilchens ist.

# Verschränkte Photonen



- Verschränkte Photonen sichtbar gemacht. Diese Aufnahme (in Falschfarben) zeigt Licht aus einem Kristall, in dem Photonenpaare erzeugt werden. Dabei entsteht Licht in unterschiedlichen Frequenzen, das sich kegelförmig ausbreitet. Von vorne sieht man deshalb verschiedene Ringe. Ein Photonenpaar, das die Überlappungsstelle zweier gleichfarbiger Ringe auf dem Film der Kamera erzeugt hat, lag in einem verschränkten Zustand vor. (Quelle: Paul Kwiat und Michael Reck, Institut für Experimentalphysik, Universität Wien)



R. Magritte, „Im Reich der Lichter“



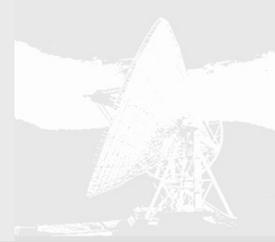
# Teleportation

# Beamen: Quanten-Teleportation



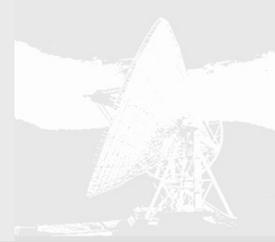
Beam me up!

# Teleportation



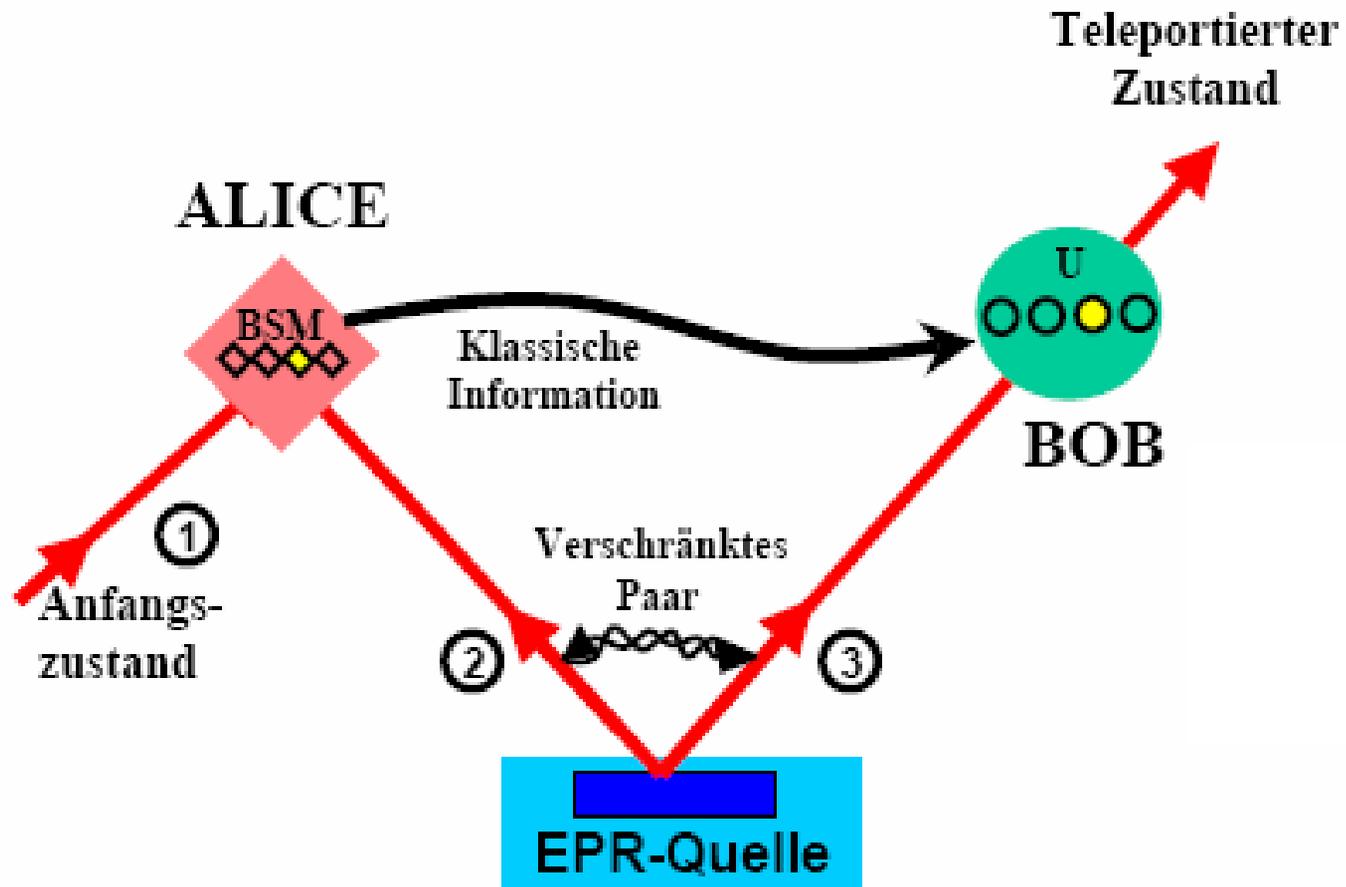
- **Teleportation**: die Herstellung einer exakten Kopie eines Quantensystems an einem anderen Ort durch Ausnutzung verschränkter Zustände, dabei wird das Original eigenschaftslos (informationslos), d.h. es überträgt alle seine Eigenschaften und ist dann selbst „ausgewaschen“
- **Verschränkung** bedeutet, daß ein Paar Photonen durch die Messung die gleichen Eigenschaften hat, auch über große Entfernungen. Wird ein Photon eines verschränkten Paares in seinen Eigenschaften verändert, dann ändert sich das zweite, entfernte Photon parallel und gleichzeitig. Die Eigenschaften werden in Nullzeit über eine große Entfernung übertragen.

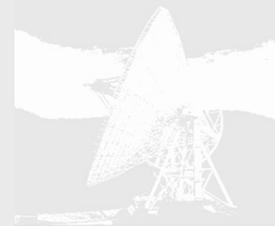
# Teleportation



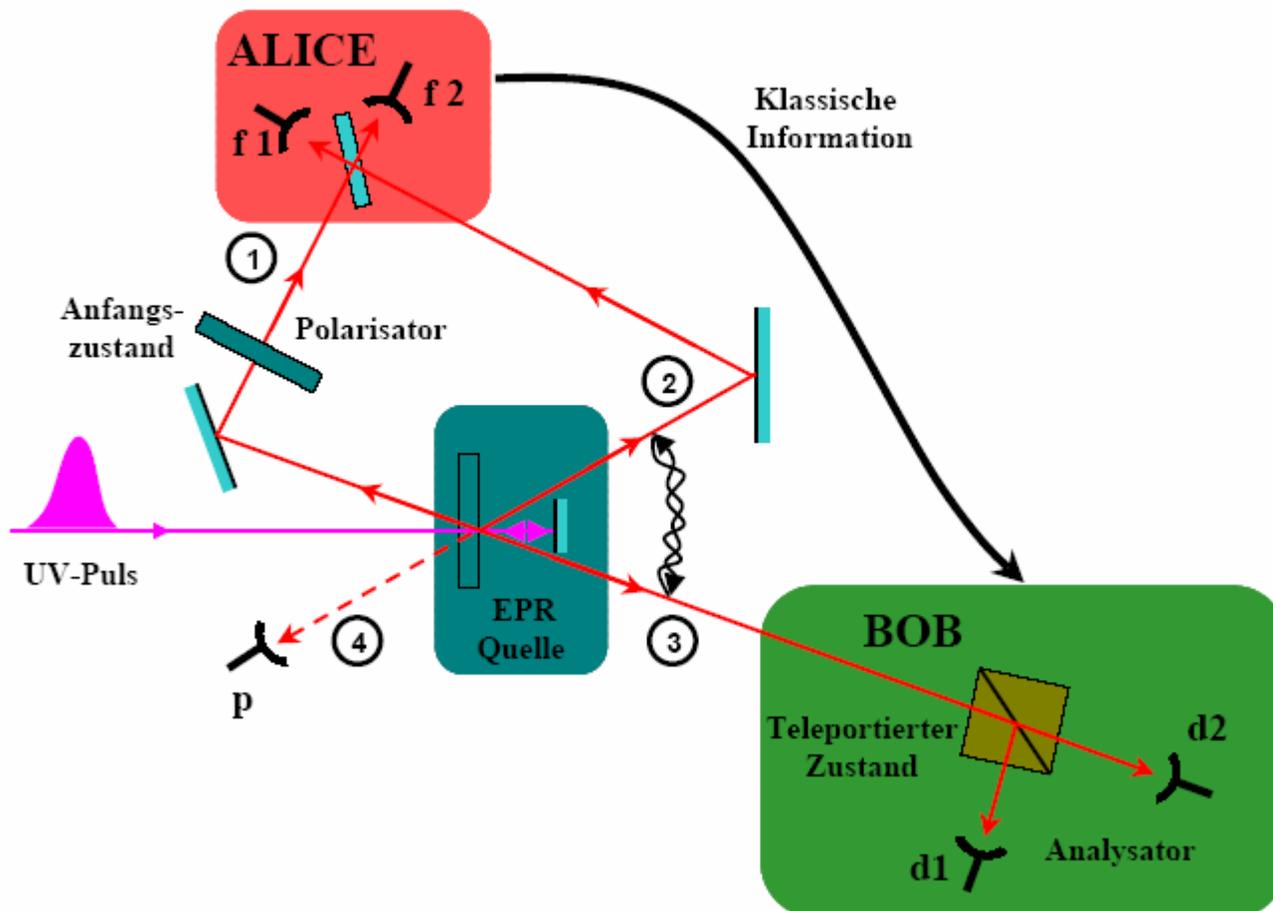
- **Teleportation:** Teleportation bislang erst im Laboratorium gezeigt
- **Verschränkung:** Teleportation über Entfernungen von bis zu 20 km demonstriert, neue Methode: 50 – 100 km (Zeilinger)
- Weltweit arbeiten ein oder zwei Gruppen an der Frage der Teleportation von Atomen oder einfachen Molekülen; Menschen beamen reine Utopie, CD-Rom Turm von der Erde bis zum Zentrum der Milchstraße (Problem: makroskopische Systeme in einen Quantenzustand zu setzen)

# Teleportation: Alice & Bob

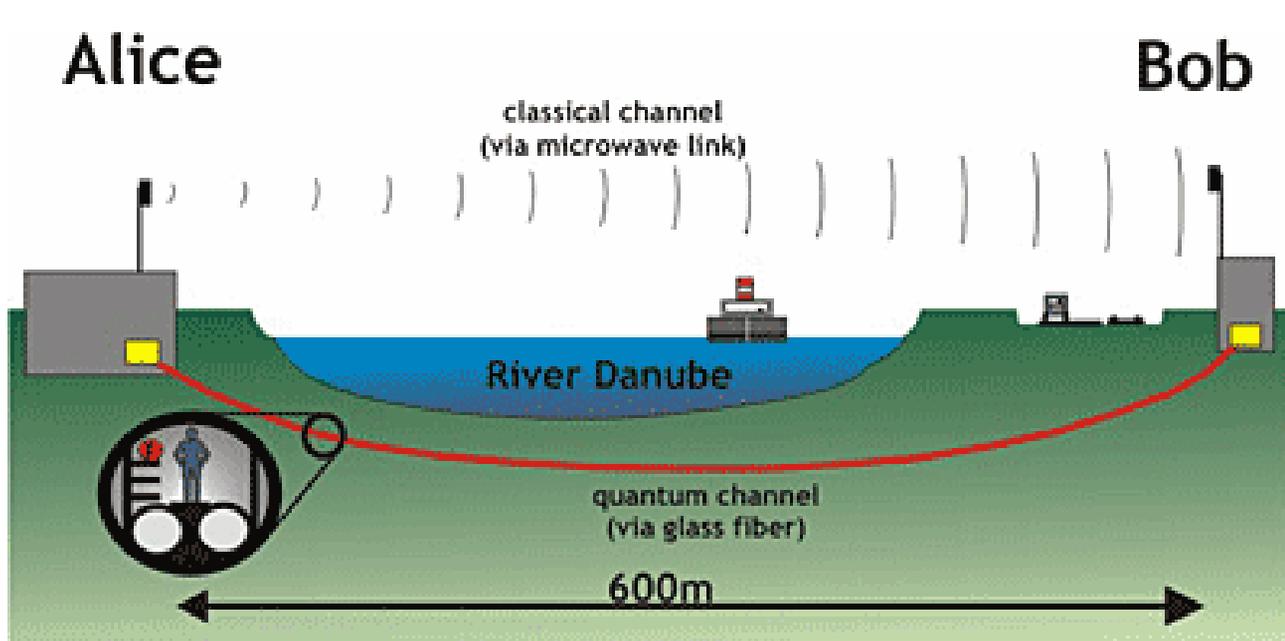
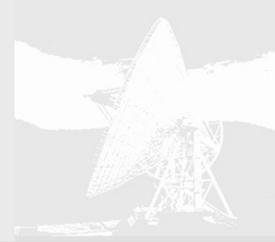




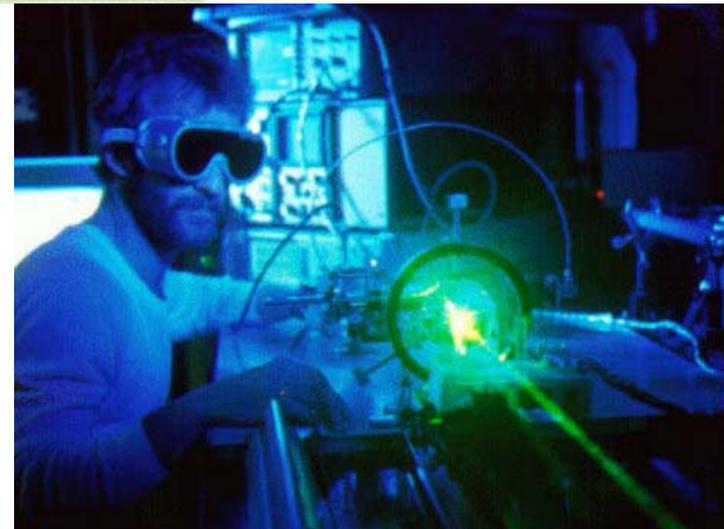
## 1.2 Experimenteller Nachweis in Innsbruck



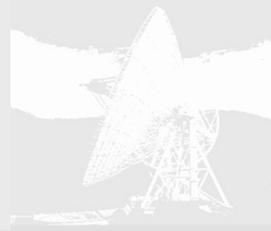
# Teleportation: Alice & Bob in Wien



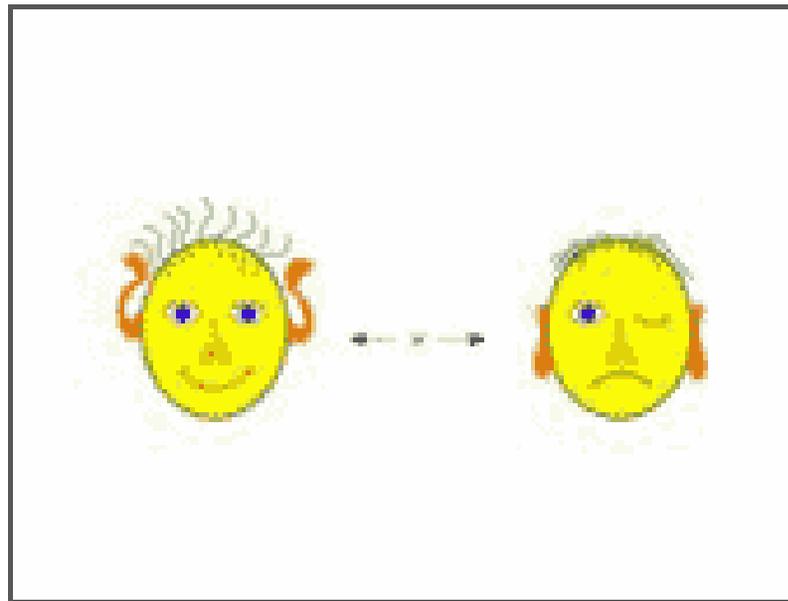
*"Alice" ist der Sender, "Bob" der Empfänger der Teleportation, als Quantenkanal dienen Glasfasern.*



# Teleportation von Quanten-Gicksen



- <http://homepage.univie.ac.at/franz.embacher/Quantentheorie/gicks/teleportation.html>





# Quantenkryptographie

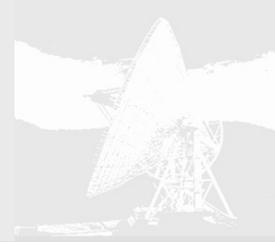
# Quantenkryptographie

- **Quantenkryptographie**: verwendet verschränkte Photonenpaare und erzeugt damit an zwei verschiedenen Orten dieselbe Folge von Zufallszahlen, dieser Schlüssel kann dann zur Verschlüsselung verwendet werden. Ein möglicher Lauscher würde sofort entdeckt werden, da er Korrelationen stört, was zu verschiedenen Zufallsfolgen auf beiden Seiten führt
- Ein Verfahren zur Übertragung der Schlüssel: BB84, 1984 von Bennett und Brassard veröffentlicht



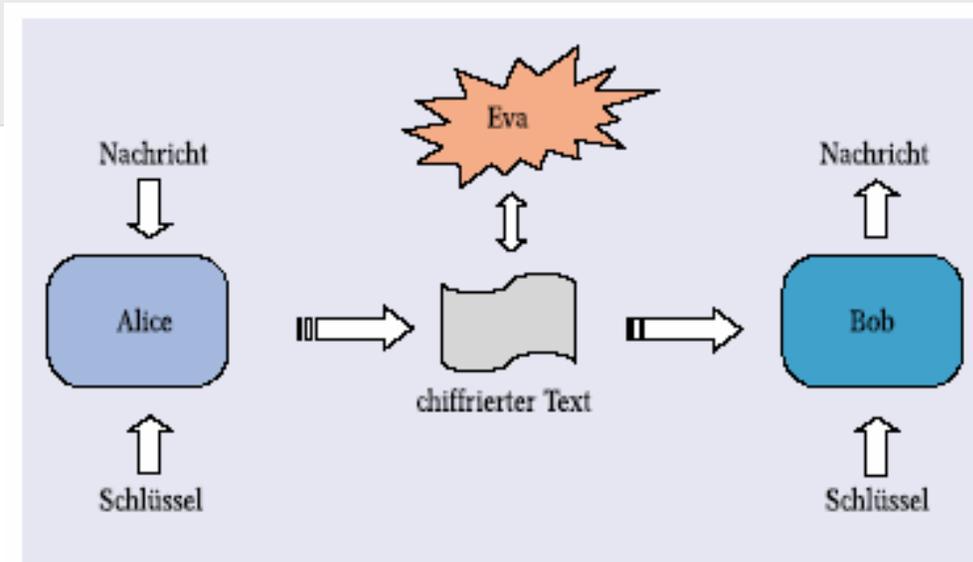
(top, left) Richard Jozsa, William K. Woollers, Charles H. Bennett. (bottom, left) Gilles Brassard, Claude Crépeau,





- **Quantenkryptographie**: verschiedene Verfahren:
  - Quelle verschickt polarisierte Photonen, die andere Seite empfängt sie
  - Quelle schickt verschränkte Photonen, andere Seite empfängt
  - Eine Quelle verschickt verschränkte Photonen an Sender und Empfänger, vermisst eine Station etwas, ist klar, was die andere gemessen hat

# Quantenkryptographie: one-time pad



## Alice

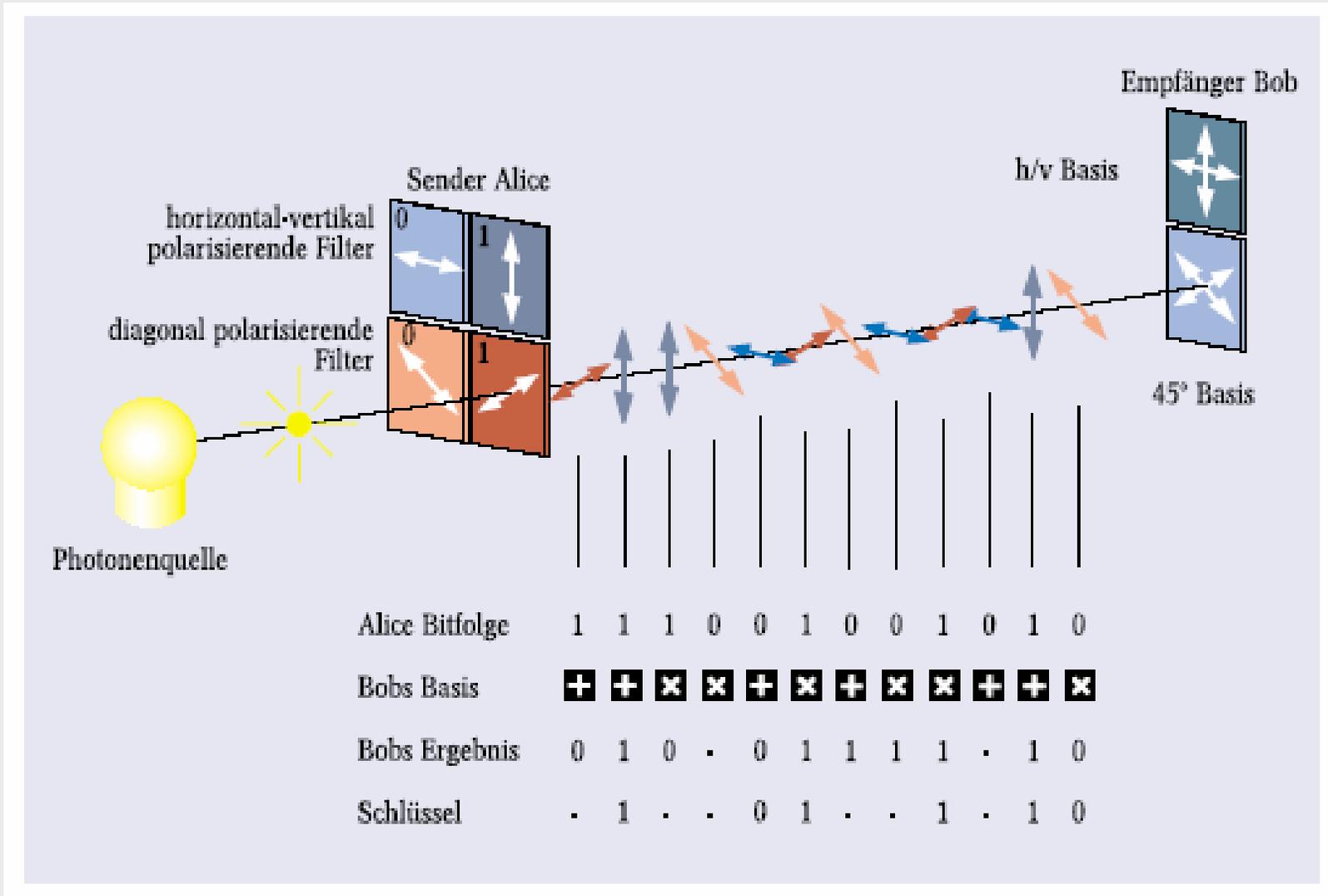
Nachricht	0	1	1	0	1	0	0	1
Schlüssel	1	0	0	1	1	0	1	0
<b>Summe (modulo 2) = chiffrierter Text</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>1</b>

## Übertragung

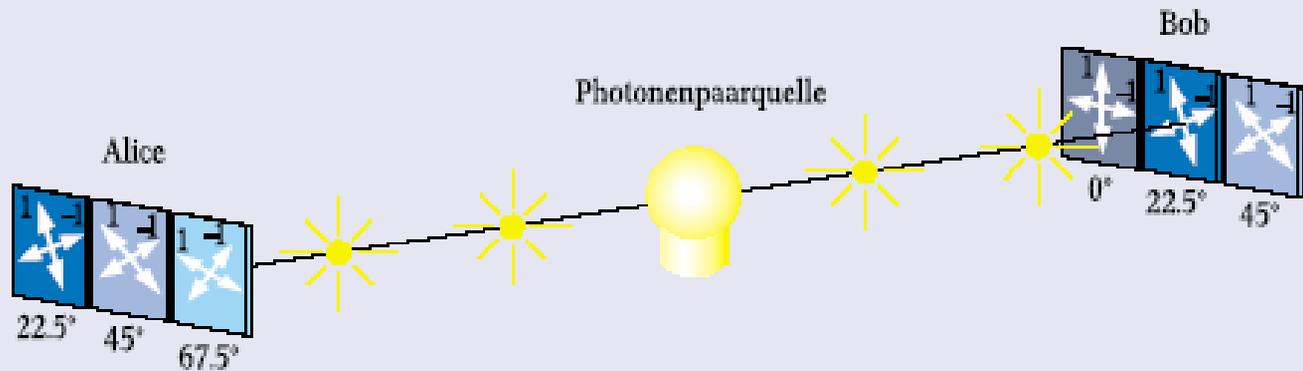
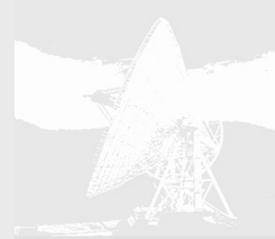
## Bob

chiffrierter Text	1	1	1	1	0	0	1	1
Schlüssel	1	0	0	1	1	0	1	0
<b>Summe (modulo 2) = Nachricht</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>1</b>

# Quantenkryptographie: BB84



# Quantenkryptographie



Alice Basis	22.5°	67.5°	45°	22.5°	67.5°	45°	45°	45°	67.5°	67.5°	22.5°	45°
Alice Ergebnis	-1	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1
Bobs Basis	45°	0°	45°	0°	22.5°	45°	22.5°	22.5°	0°	45°	22.5°	22.5°
Bobs Ergebnis	1	-1	-1	1	-1	-1	1	-	1	1	-1	1
Differenz	22.5°	67.5°	0°	22.5°	45°	0°	22.5°	22.5°	67.5°	22.5°	0°	22.5°
Klasse	Bell	Bell	Code	Bell	-	Code	Bell	-	Bell	Bell	Code	Bell
Schlüssel	-	-	0	-	-	0	-	-	-	-	0	-