

Kosmische Distanzleiter

Die kosmische Distanzleiter kombiniert verschiedene Messmethoden, um Entfernungen im Universum zu bestimmen.

Direkte Methoden (Nahe Distanzen)

Radar

- Einsatzgebiet liegt innerhalb unseres Sonnensystems.
- Ein Lichtsignal wird ausgesendet und die Zeit bis zur Reflexion und Rückkehr gestoppt.

Trigonometrische Parallaxe

- Messung der Positionsänderung eines Sterns im Abstand von 6 Monaten.
- Die Basislinie bildet der Durchmesser der Erdbahn, was 2 Astronomischen Einheiten entspricht.
- Als Bezugspunkte dienen sehr weit entfernte Hintergrundsterne.
- Ein Parsec entspricht etwa 3,26 Lichtjahren.
- Diese Methode ist nur für nahe Sterne bis ca. 100 Parsec geeignet.

Distanz (d) aus dem Parallaxenwinkel (p) in Bogensekunden:

$$d = 1 / p$$

Helligkeitsmessung & Standardkerzen

Grundlagen der Helligkeit

- **Scheinbare Helligkeit (m):** Gibt an, wie hell ein Stern von der Erde aus erscheint.
- **Absolute Helligkeit (M):** Gibt an, wie hell ein Stern wäre, wenn er exakt 10 Parsec entfernt stünde.
- Die Differenz zwischen m und M steht in einem festen Zusammenhang zur Entfernung D.

Entfernungsmodul:

$$D = 10^{(m - M + 5) / 5}$$

Spektroskopische Parallaxe

- Eine Spektralanalyse liefert Informationen zu Temperatur und Dichte des Sterns.
- Breite Absorptionslinien deuten auf eine hohe Dichte und Hauptreihensterne hin, schmale Linien auf eine geringe Dichte und Riesensterne.
- Aus Leuchtkraftklasse und Spektralklasse ergibt die Position im Hertzsprung-Russell-Diagramm die absolute Magnitude M.
- Der Vergleich mit der scheinbaren Magnitude liefert die Distanz über das Entfernungsmodul.
- Diese Methode ist weniger genau als die trigonometrische Parallaxe, da interstellarer Staub die Messung beeinflussen kann.

Hauptreihenanpassung

- Dient der Bestimmung der Entfernung ganzer Sternhaufen.
- Die beobachtete Hauptreihe (scheinbare Helligkeit) der Sterne im Diagramm wird mit einer bekannten Referenz-Hauptreihe (absolute Helligkeit) verglichen.

- Die vertikale Verschiebung der beiden Kurven entspricht exakt dem Distanzmodul.

Cepheiden

- Cepheiden sind pulsationsveränderliche Sterne und dienen als verlässliche Standardkerzen.
- Ein Kappa-Mechanismus treibt die Pulsationen an: Schwankende Opazität durch Helium-Ionisation führt zu gestautem Strahlungsdruck und periodischen Helligkeitsschwankungen.
- Sie weisen eine stabile Perioden-Leuchtkraft-Beziehung auf.

Kalibrierung der absoluten Helligkeit aus der Periodenlänge (P):

$$M = A \cdot \log_{10}(P / 1d) + B$$

Supernovae Typ Ia

- Schnell eintretendes, helles Aufleuchten eines Weißen Zwergs durch thermonukleare Explosion.
- Der Stern sammelt Masse an, was zu Dichte- und Temperaturanstieg führt.
- Nahe der Chandrasekhar-Grenze (ca. 1,4 Sonnenmassen) entzündet sich die Kohlenstofffusion ohne Selbstregulation zur vollständigen Zerstörung.
- Bedingungen sind ähnlich, daher nahezu konstante maximale absolute Helligkeit als Standardkerzen.
- Helligkeitsunterschiede entstehen durch die Menge an Nickel-56 (Zerfall sendet Gammastrahlung aus) und die Masse des Auswurfs (mehr Absorption).
- Kalibrierbarkeit der Leuchtkraftkurve ermöglicht präzisere Entfernungsbestimmung.

Große Distanzen (Kosmologie)

Tully-Fisher-Relation

- Rotationsgeschwindigkeit einer Spiralgalaxie wird gemessen, meist über Blau- und Rotverschiebung der 21cm-Linie.
- Leuchtkraft lässt sich berechnen: Helle Galaxien (viele Sterne/Gravitation) rotieren schneller als dunkle.
- Über die Leuchtkraft wird schließlich die Distanz ermittelt.

Rotverschiebung (Redshift)

- Das Spektrum wird gemessen, um die Rotverschiebung (z) zu berechnen.

Rotverschiebung:

$$z = (\lambda_{\text{beobachtet}} - \lambda_{\text{labor}}) / \lambda_{\text{labor}}$$

Fluchtgeschwindigkeit:

$$v = z \cdot c$$

Entfernung (Hubble-Lemaître):

$$d = v / H_0$$