

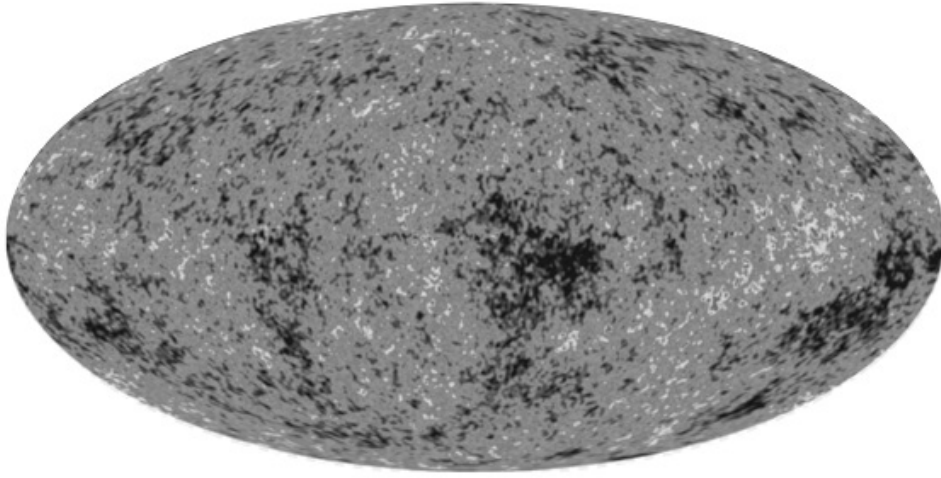


Abbildung 1.3: Kosmische Hintergrundstrahlung CMB: Sie hat die Temperatur $T = 2.72$ K. Der gesamte Himmel ist entsprechend galaktischen Koordinaten dargestellt und die Graustufen stehen für die geringen Temperaturschwankungen $\Delta T/T \approx 0.000024$ des CMB. Dunkel: kälter, Hell: wärmer. Abbildung: NASA/WMAP Science Team, 9 year WMAP image of background cosmic radiation (2012).

Die beobachtete dunkle Energie sollte mit den bekannten und gut getesteten physikalischen Gesetzen erfolgen. Als Test vergleichen wir die skalierte beobachtete Dichte $\tilde{\rho}_v$ der dunklen Energie mit der aus den physikalischen Gesetzen hergeleiteten Energiedichte.

Welche physikalischen Gesetze sind bei der dunklen Energie wesentlich?

1.1.4 Quantengravitation

In diesem Abschnitt analysieren wir, welche physikalischen Gesetze zur Erklärung der dunklen Energie wesentlich sind. Dabei verwenden wir die treffende Bezeichnung *Quantengravitation*. Die Quantengravitation ist ein spannendes Gebiet aktueller Forschung mit vielen unterschiedlichen Forschungsrichtungen. Als

Orientierungshilfe unterscheiden wir mithilfe des üblichen Begriffspaares *im weiteren Sinne* - *im engeren Sinne* in *Quantengravitation im weiteren Sinne* und *Quantengravitation im engeren Sinne*, siehe die zwei folgenden Unterabschnitte.

Die dunkle Energie wird nur durch Gravitation beobachtet. Daher sind die *Gesetze der Gravitation* mit der maßgeblichen Naturkonstante, der *Gravitationskonstante* G , wesentlich: Hierzu zählen das Newton'sche Gravitationsgesetz (siehe Newton (1686)), die ART (siehe Einstein (1915)) und deren Verallgemeinerung zu höheren Raumdimensionen (siehe z. B. Carmesin (2017)).

Das Vakuum kann keine Ruhemasse haben, denn anderenfalls könnte man eine Geschwindigkeit relativ zum Vakuum messen. Das ist aber nicht möglich, wie bereits Michelson und Morley (Michelson u. Morley (1887)) experimentell erkannt haben. Daher sind die Gesetze der *Relativitätstheorie* (siehe Einstein (1905)) mit der dabei maßgeblichen Naturkonstanten *Lichtgeschwindigkeit* c essenziell.

Das Vakuum ermöglicht höchste physikalische Auflösungen. Daher sollten auch die Gesetze des Mikrokosmos, die *Quantenphysik* mit der maßgeblichen Naturkonstanten des Planck'schen Wirkungsquantums h oder $\hbar = h/2\pi$ relevant sein.

Wir sollten also diese drei physikalischen Theorien der Gravitation, der Relativität und der Quanten miteinander kombinieren. Das gelang Chandrasekhar für das Problem der Instabilität von weißen Zwergsternen spätestens 1931 (siehe Chandrasekhar (1931)). Für die allgemeine Theoriebildung erkannte Bronstein 1936 (Bronstein (1936)) die Notwendigkeit einer solchen Kombination dieser drei physikalischen Theorien. Seitdem wird diese Kombination weiter entwickelt, man spricht von *Quantengravitation* (siehe Giulini u. a. (2003) und Abbildung 1.4).

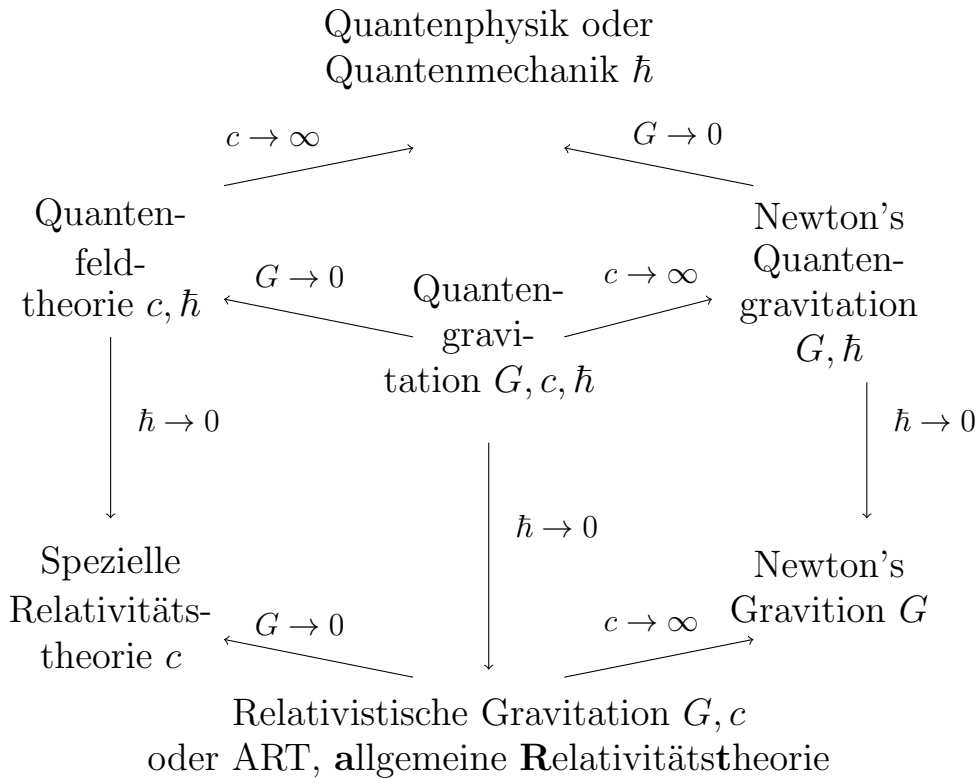


Abbildung 1.4: Quantengravitation: Relation zu anderen Theorien. Pfeile: Grenzfälle (siehe Giulini u. a. (2003)). Die Quantengravitation sollte die wesentlichen Konzepte der Physik kombinieren. Wichtig ist dabei: Können wir die Konzepte so kombinieren, dass wir physikalische Probleme lösen können?

1.1.5 Quantengravitation im weiteren Sinne

Chandrasekhar leitete eine Grenzmasse her, bis zu der weiße Zwergsterne (siehe Abbildung 1.5) stabil sind (siehe beispielsweise Chandrasekhar (1931)). Dafür erhielt er 1983 den Nobelpreis für Physik. Zur Berechnung der Grenzmasse wendete er das Gravitationsgesetz, die Relativitätstheorie und die Quantenphysik an. Entsprechend sind im Term für die Grenzmasse die drei Naturkonstanten G, c und $\hbar$ maßgeblich. Eine solche Entdeckung ist ein Beispiel für Quantengravitation im weiteren Sinne. Eine besonders spannende und ambitionierte Forschungsrichtung im Bereich der Quantengravitation ist die Suche nach