

■ Dekohärenz mit Einstein?

Das Einsteinsche Gravitationsfeld kann zu neuen, von Newtons Theorie nicht erfassten Kopplungen von Freiheitsgraden führen, die quantenmechanisch neue Kanäle für Dephasierungen öffnen.

Der „Heilige Gral“ der theoretischen Physik ist eine mathematisch konsistente und physikalisch korrekte Quantenfeldtheorie der Gravitation. Eine solche „Quantengravitation“ dürfte jedoch nicht erforderlich sein, wenn es um die Frage geht, welchen Einfluss ein äußeres Gravitationsfeld auf die Dynamik eines Atoms oder Moleküls ausübt. So trivial diese Frage erscheint, gibt sie dennoch Anlass zu grundlegenden und kontroversen Diskussionen.

Diese Diskussion bereichert nun eine Arbeit von Igor Pikovski (Harvard), Magdalena Zych, Fabio Costa und Časlav Brukner (Wien) [1]. Die Physiker untersuchen darin theoretisch ein quantenmechanisches Mehrteilchensystem, etwa ein großes Molekül, in einem äußeren Gravitationsfeld, z. B. dem der Erde. Letzteres darf man in hinreichender Näherung als homogen annehmen. Die Autoren separieren auf übliche Weise die Bewegung des Schwerpunktes von der inneren (Relativ-) Bewegung ab, berücksichtigen aber allgemeinrelativistische Korrekturen der Ordnung Φ/c^2 , mit dem Newtonschen Gravitationspotential Φ . Dabei stellen sie fest, dass die Schwerpunktsbewegung durch einen Zusatz $H_0 \cdot \Phi(\vec{x})/c^2$ an die innere Freiheitsgrade rückkoppelt. H_0 bezeichnet die Hamilton-Funktion (Energie) der inneren Freiheitsgrade und $\Phi(\vec{x}) = gx$ das Potential des Gravitationsfeldes $\vec{g} = -g\vec{e}_x$ mit Feldstärkebetrag g und der Höhe x über der Erdoberfläche. Für die Quantenmechanik dieses Systems hat diese Rückkopplung die Konsequenz, dass die innere Bewegung von der Lage des Schwerpunktes „weiß“. Damit bilden sich dynamisch typisch quantenmechanische Verschränkungen zwischen den durch die Relativ- bzw. Schwerpunktskoordinaten beschriebenen Teilsystemen. Betrachtet man nun das innere Teilsystem als „Umgebung“ für das System „Schwerpunkt“, so bewirkt diese Wechsel-

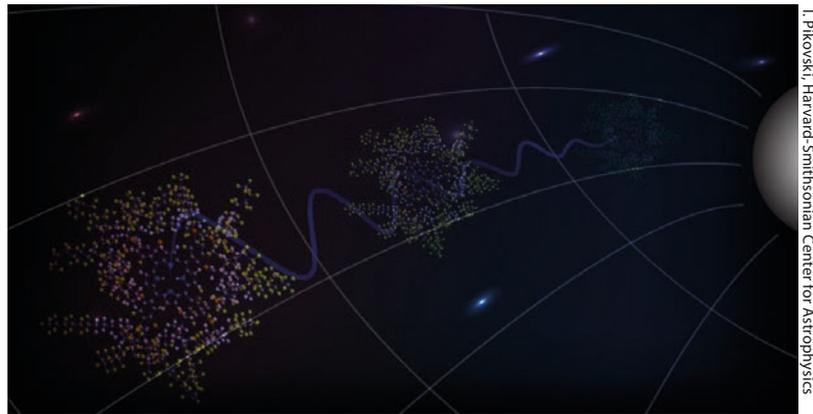


Abb. 1 Durch die Zeitdilatation trägt das Schwerfeld bei zur Dephasierung von

Quantensuperpositionen räumlich lokalisierter Zustände eines Moleküls.

wirkung auch Dephasierungen, d. h. Delokalisierung von Kohärenzen, zwischen Zuständen des Schwerpunktes in die „Umgebung“.

Die durch die Allgemeine Relativitätstheorie geforderte universelle Rotverschiebung aller Energieformen führt also zu einer dynamischen Kopplung des Schwerpunktes an die inneren Freiheitsgrade, die einen neuen und bisher weitgehend unbeachteten Kanal quantenmechanischer Dephasierungen ermöglicht – unter Umständen auch eine effektive Dekohärenz. Das wäre ein genuiner Effekt der Allgemeinen Relativitätstheorie, der sich prinzipiell in zukünftigen Experimenten der Materiewellen-Interferometrie für Schwerpunktszustände nachweisen lassen könnte, allerdings nur, wenn es gelänge, alle anderen Ursachen möglicher Dekohärenz abzustellen bzw. zu isolieren. Dies ist die zentrale, hier absichtlich zurückhaltend formulierte Aussage von [1].

So faszinierend diese Aussichten sind, bedarf es durchaus noch Klärung und Richtigstellung. So ist die in [1] gegebene Ableitung noch unvollständig, denn sie berücksichtigt zwar die Φ/c^2 -Korrekturen der Allgemeinen Relativitätstheorie, vernachlässigt aber die v^2/c^2 -Korrekturen der Speziellen Relativitätstheorie. Das ist unzulässig, wenn das System im Gravitationsfeld frei fällt. Dann sind nämlich beide

Korrekturen von gleicher Größenordnung. Tatsächlich haben beide Korrekturen beim freien Fall im homogenen Gravitationsfeld sogar entgegengesetzt gleiche Beiträge zur Phasenverschiebung [2, 3] und heben sich somit auf. Eine nicht-verschwindende Phasenverschiebung ließe sich allenfalls durch Stören des freien Falls (Impulsübertrag von außen) bewirken. Pikovski et al. diskutieren solche äußeren Einwirkungen, die das System im Gravitationsfeld „führen“, jedoch nicht. Damit bleibt offen, wie sich der neue Dephasierungs-Kanal isolieren und messen lassen könnte.

Nach Einsteins Äquivalenzprinzip müsste nicht nur ein statisches und homogenes Gravitationsfeld, sondern auch eine dazu äquivalente konstante Beschleunigung ohne Gravitationsfeld die oben beschriebenen Konsequenzen samt Dephasierung bewirken. Dies erscheint anderen Autoren absurd, die meinen, dass bei Wegfall des Gravitationsfeldes durch Beschleunigung einer Dephasierung jede Ursache entzogen sei [4]. Explizite Rechnungen haben zwar eine Dephasierung im Gravitationsfeld, nicht jedoch im beschleunigten Bezugssystem ergeben [5]. Diese Diskrepanz basiert allerdings auf einer vom Bezugssystem abhängigen Definition des Schwerpunktes. Beide Kritiken kommen nicht daran vorbei, dass auch in der Quanten-

mechanik eine mathematisch präzise Formulierung des Einsteinschen Äquivalenzprinzips für *homogene* Gravitationsfelder existiert [6, 3], die seine Konsistenz mit den in [1] getroffenen Aussagen sichert.

Schrödingers Katze gerettet?

Vielfach wurde in den Medien der Eindruck vermittelt, der von Pikovski et al. untersuchte dynamische Mechanismus könnte eine maßgebliche universelle Ursache dafür sein, dass sich die makroskopische Welt klassisch und nicht quantenmechanisch verhält. Doch nur *irreversible* Dephasierung zieht eine Dekohärenz nach sich. Die Effektivität der Dephasierung sowie die Möglichkeit und Zeitspanne einer Rephasierung (lokalen Wiederherstellung der Phasenbeziehungen) hängen von der „inneren Umgebung“ ab. Ihre Wirkung ist in Relation zu setzen sind mit den entsprechenden Prozessen anderer Dephasierungskanäle, die sich durch die dynamische Kopplung des Schwerpunktes an andere Umgebungen öffnen, wie Photonen oder Gasmoleküle.

Entscheidend ist die mögliche Größenordnung des Dephasierungseffektes. Pikovski et al. nehmen an, das System bestehe aus N harmonischen Oszillatoren im thermischen Zustand der Temperatur T . Die interferometrische Visibilität ist dann gegeben durch $V(t) := 2|\langle x_1 | \rho_{\text{cm}}(t) | x_2 \rangle|$. Dabei ist ρ_{cm} die reduzierte Dichtematrix des Schwerpunkt-Zustands, und x_1, x_2 sind zwei um Δx in Richtung des Gravitationsfeldes separierte

Orte des Schwerpunkts. Für kleine Zeiten $t \ll \sqrt{N} \tau_{\text{dec}}$ erhält man

$$V(t) \approx \exp(-t^2/\tau_{\text{dec}}^2), \quad (1)$$

wobei

$$\tau_{\text{dec}} := \sqrt{\frac{2}{N}} \frac{\hbar c^2}{k_B T g \Delta x} \quad (2)$$

die „Dekohärenzzeit“ (besser Dephasierungszeit) bezeichnet. Im Gegensatz zu bekannten Ausdrücken aus der Dekohärenztheorie steht t quadratisch im Exponenten von (1) und nicht linear, und Δx linear im Nenner von (2) statt wie üblich quadratisch. Für $N \approx 10^{23}$ Teilchen bei Raumtemperatur und $\Delta x \approx 10^{-3}$ cm ergibt sich $\tau_{\text{dec}} \approx 10^{-4}$ s, was angesichts der als „klein“ eingeschätzten gravitativen Rotverschiebung im Gravitationsfeld der Erde sicher bemerkenswert ist. Ernüchternd ist aber der direkte Vergleich mit Dekohärenzzeiten anderer Umgebungen, etwa Photonen bei Raumtemperatur oder Restmolekülen im Laborvakuum, für die man bei gleichem Δx viele Größenordnungen kürzere Zeiten zwischen 10^{-18} s und 10^{-14} s erhält [7]. Natürlich schließt dies nicht die Existenz von Parameterbereichen aus, in denen der hier betrachtete Dephasierungskanal dominiert. Eine echte Konkurrenz zu einer üblichen Umgebung mit einer effektiv unendlichen Anzahl von Freiheitsgraden wird aber gerade durch das beschränkte Phasenraumvolumen der inneren Freiheitsgrade erschwert [8].

Der dynamische Mechanismus hat also offensichtliche Schwächen, wenn es um das Potenzial zur Dekohärenz geht, das mit der typischen Kleinheit der „inneren

Umgebung“ einhergeht. Allerdings ist er auch *omnipräsent* und weitgehend *unabhängig* von weiteren äußeren Bedingungen.

Unser physikalisches Verständnis besitzt an der Schnittstelle zwischen Quantenmechanik und klassischer Gravitationstheorie einige interessante Lücken, die sich oft erst beim genaueren Hinsehen offenbaren. Dazu gehört auch die Frage nach der QM-kompatiblen allgemeinen – also nicht auf homogene Felder beschränkten – Formulierung des Äquivalenzprinzips. Direkt verbunden damit ist die Frage nach der Kopplung *aller* Komponenten des Einsteinschen Gravitationsfeldes an quantenmechanische Systeme. Nicht-Newtonsche Anteile des Gravitationsfeldes sind etwa das gravitomagnetische Feld der Erde oder Gravitationswellen. Ihr Einfluss auf genuin quantenmechanische Systeme ist theoretisch bisher nur unzureichend verstanden und experimentell überhaupt nicht untersucht.

Domenico Giulini

- [1] I. Pikovski et al., Nat. Phys. **11**, 688 (2015)
- [2] P. Storey und C. Cohen-Tannoudji, Journal de Physique **4**, 1999 (1994)
- [3] D. Giulini, in: F. Finster et al. (Hrsg.), Quantum Field Theory und Gravity, Birkhäuser, Basel (2012)
- [4] Y. Bonder et al., arXiv:1507.05320 (2015)
- [5] L. Diósi, arXiv:1507.05828 (2015)
- [6] D. M. Greenberger und A. W. Overhauser, Rev. Mod. Phys. **51**, 43 (1979)
- [7] E. Joos et al., Decoherence und the Appearance of a Classical World in Quantum Theory, Springer, Berlin, 2. Aufl. (2003)
- [8] S. L. Adler und A. Bassi, arXiv:1506.04414 (2015)

Prof. Dr. Domenico Giulini, Institut für Theoretische Physik der Leibniz Universität Hannover und Zentrum für angewandte Raumfahrttechnologie und Mikrogravitation, Bremen