

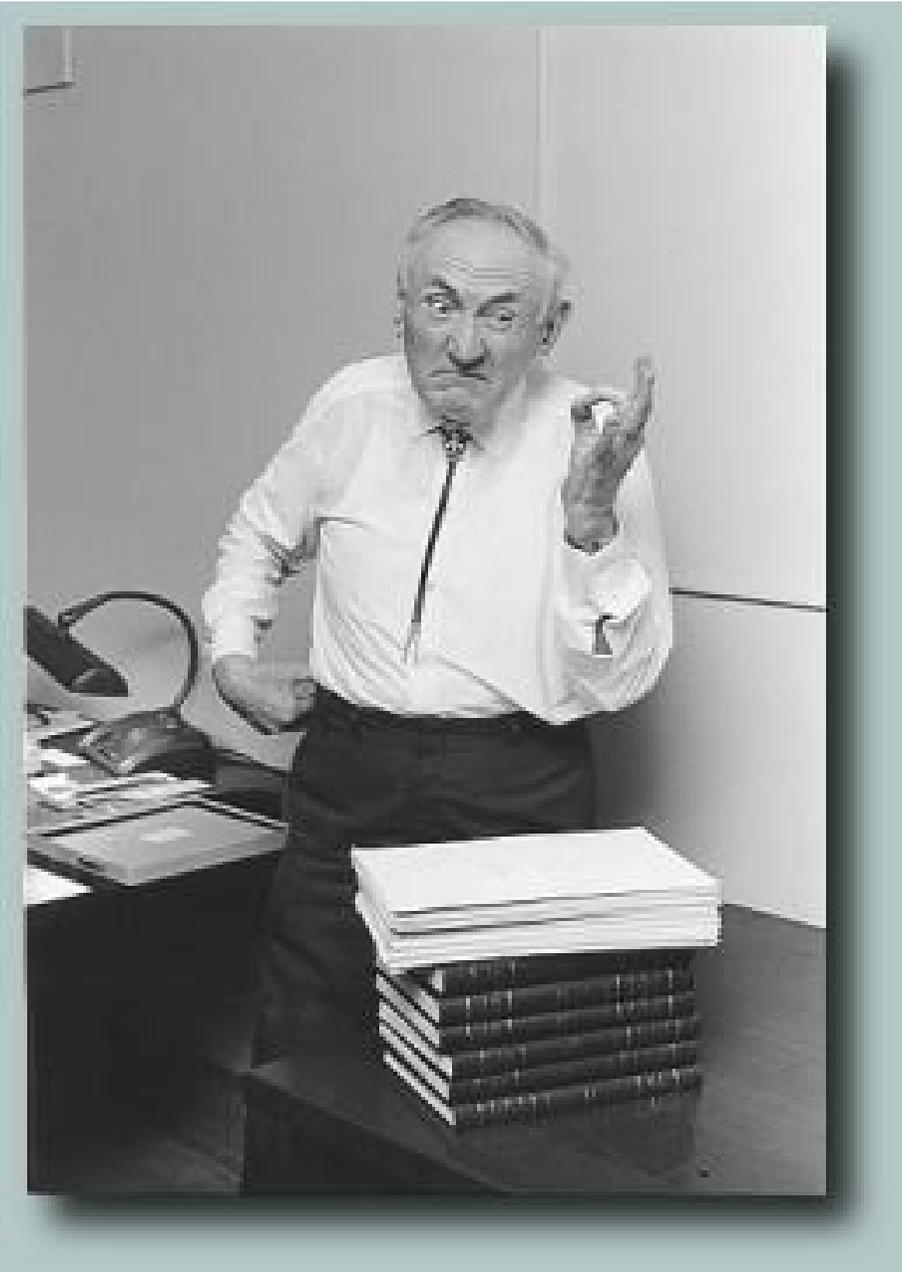
Dunkle Materie und Dunkle Energie:  
Grosse Rätsel der Kosmologie  
und der Grundlagenphysik

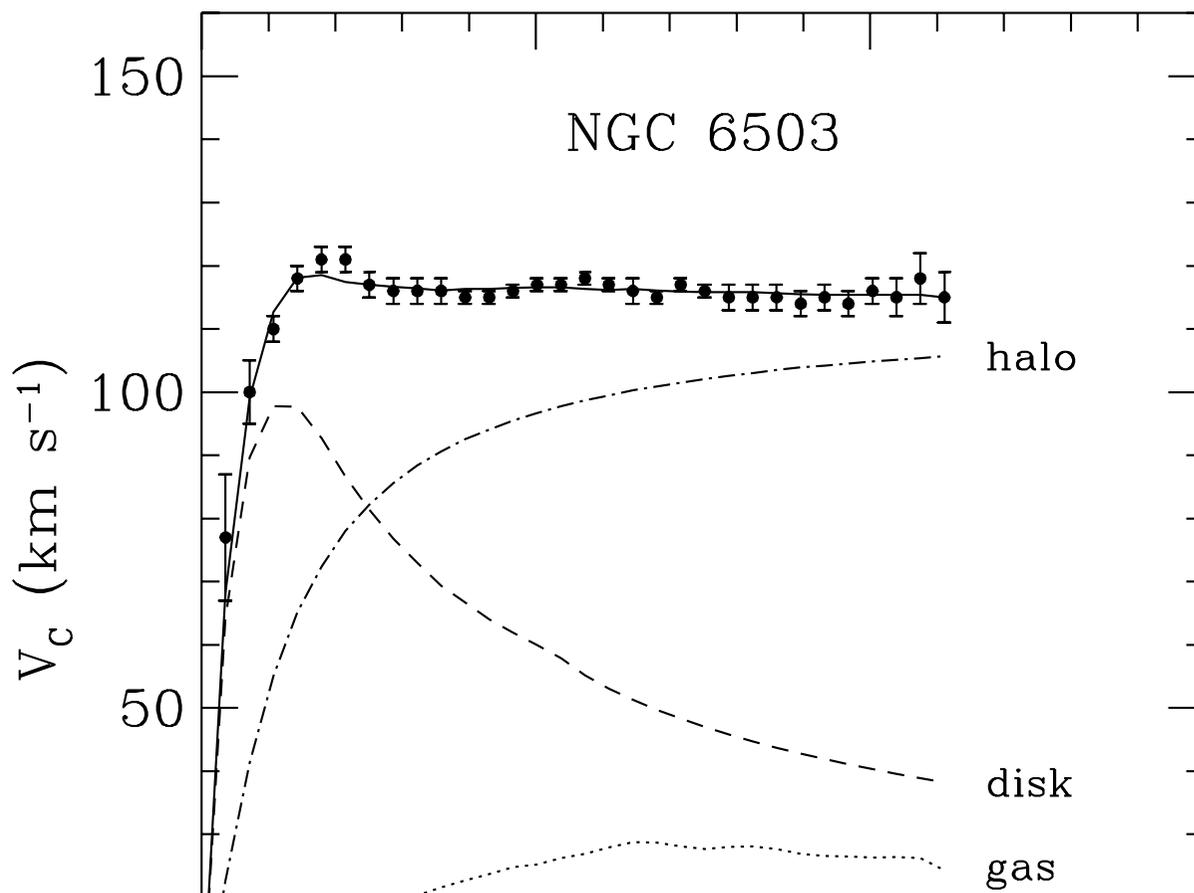
**Norbert Straumann**

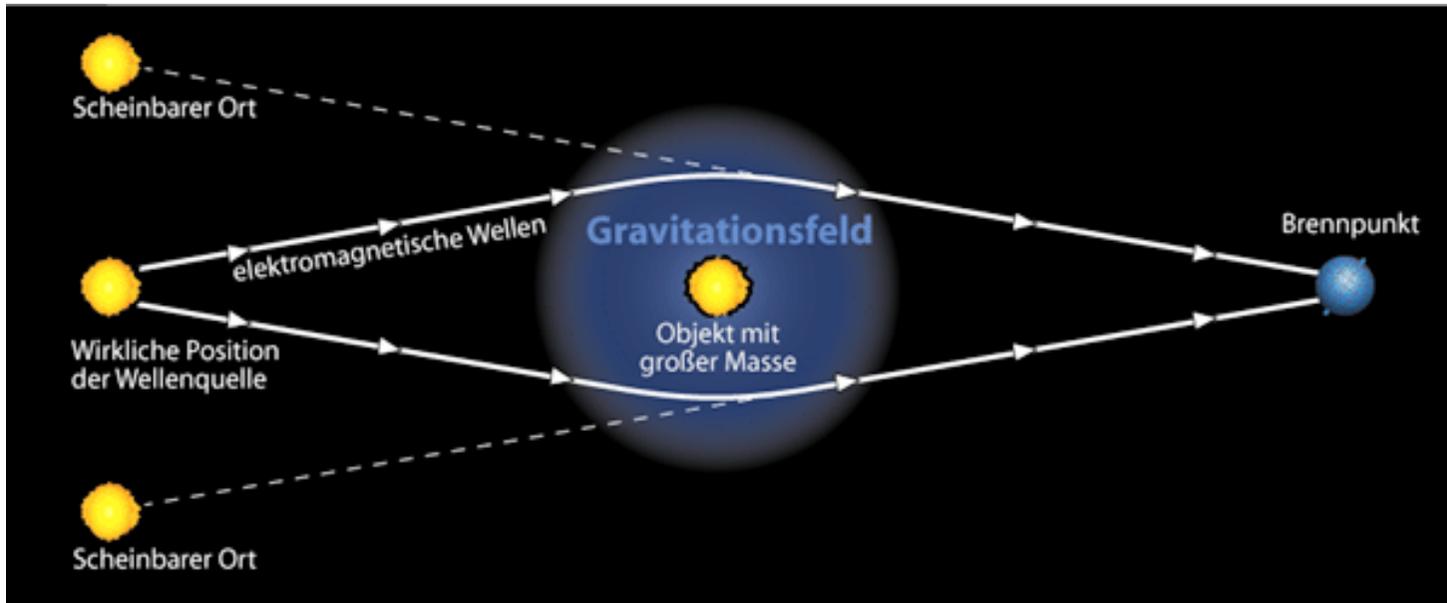
# Das Problem der dunklen Materie

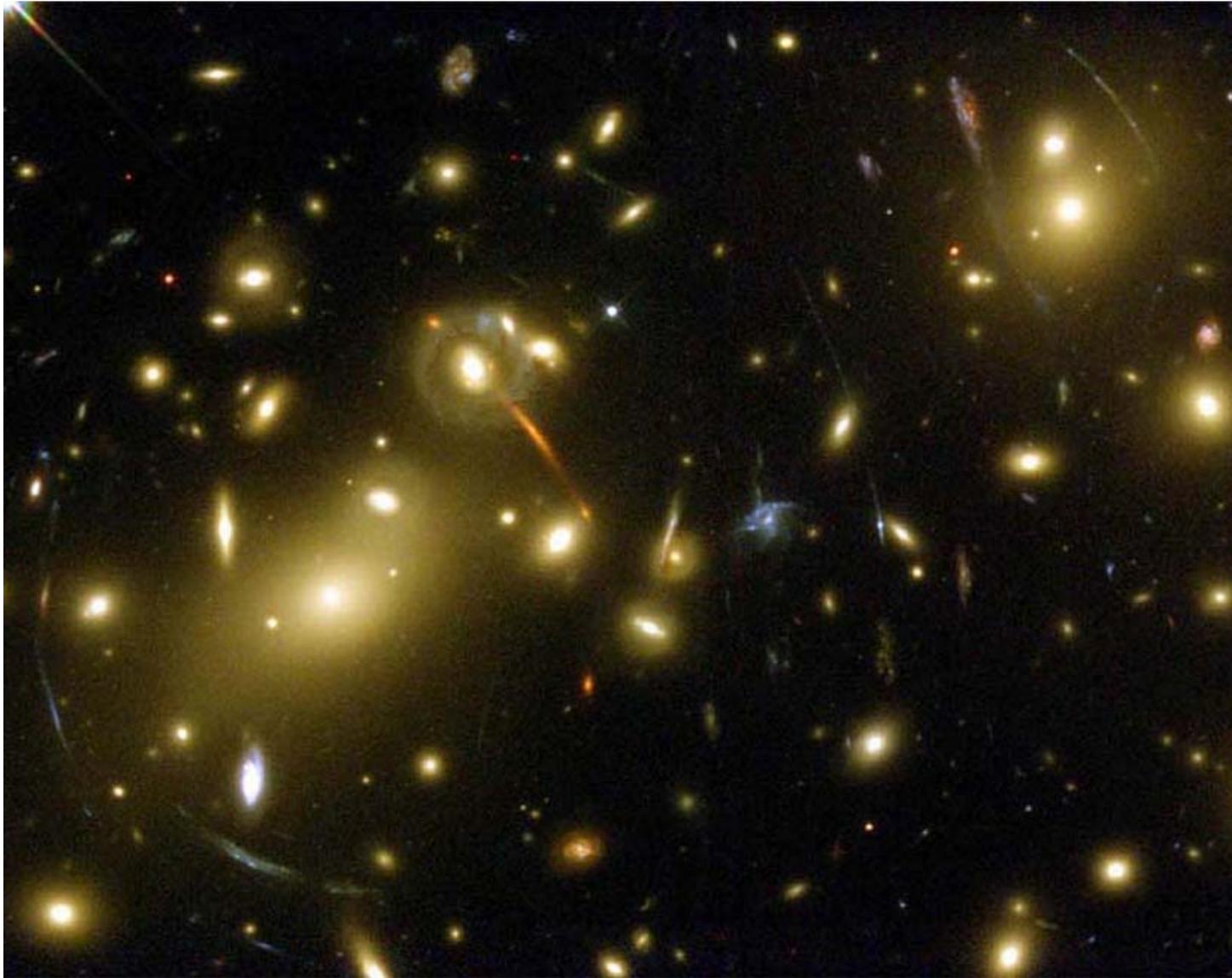
**Fritz Zwicky (1933):**

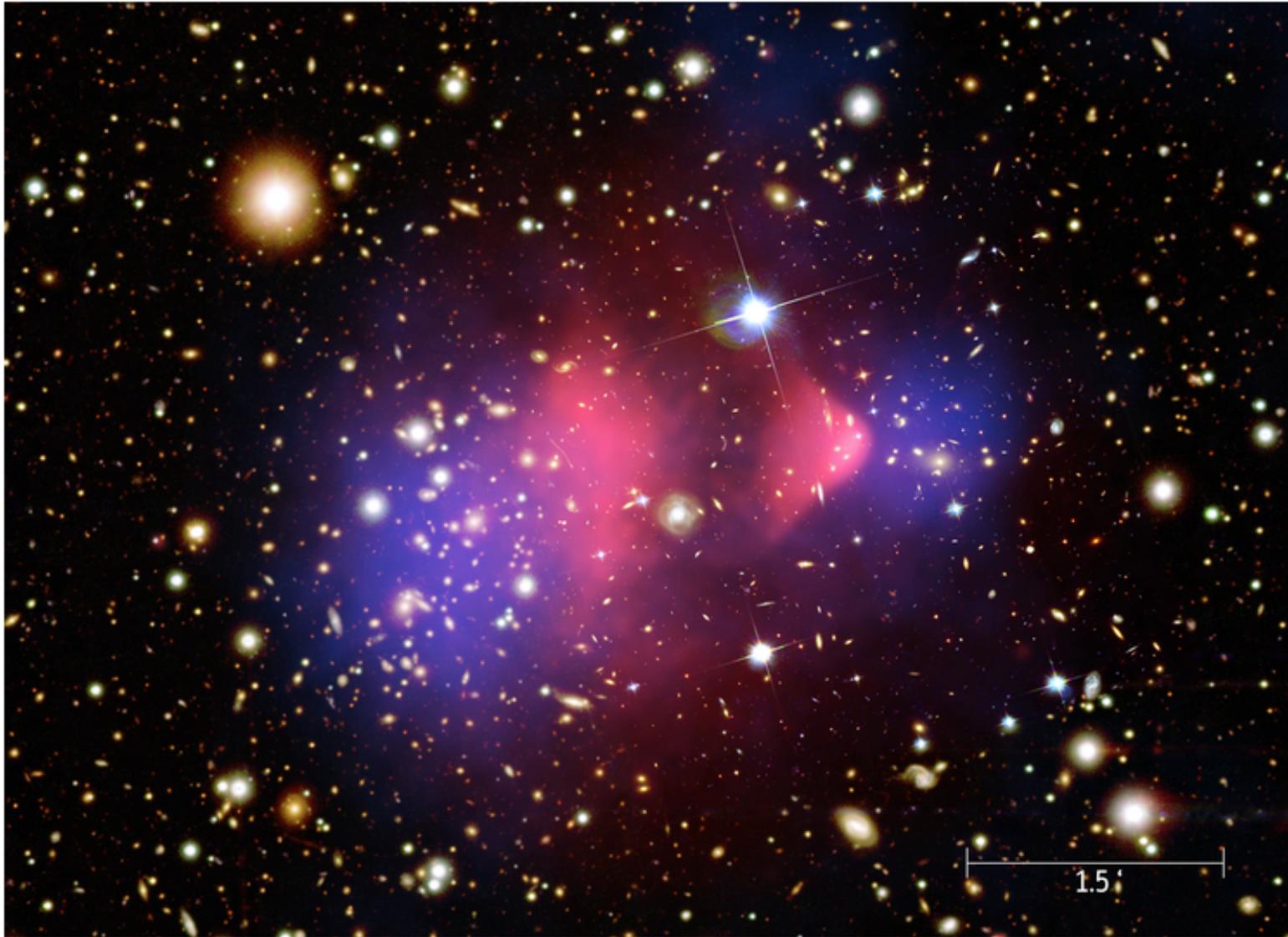
*“Um, wie beobachtet, einen mittleren Dopplereffekt von 1000 km/s oder mehr zu erhalten, müsste also die mittlere Dichte im Comasystem mindestens 400mal grösser sein als die auf Grund von leuchtender Materie abgeleitete. Falls sich dies bewahrheiten sollte, würde sich also das überraschende Resultat ergeben, dass dunkle Materie in sehr viel grösserer Dichte vorhanden ist als die leuchtende Materie.”*











# Einstein und die abstossende Gravitation

Brief von **Einstein an P. Ehrenfest** vom 4. Februar, 1917:

*“Ich habe wieder etwas verbochen in der Gravitationstheorie, was mich ein wenig in Gefahr bringt, in ein Tollhaus interniert zu werden.”*

- Ursprüngliche Motive (Mach'sches Prinzip) und Schwierigkeiten (Unmöglichkeit eines statischen Universums);
- Einführung des kosmologischen Gliedes → **statisches Modell**

$$4\pi G\rho = \frac{1}{a^2} = \Lambda$$

## **Newton:**

“... the stars would, through their gravity, gradually fall on each other, were they not all carried back by a divine plan.”

## Illustration des abstossenden Charakters

Die Verallgemeinerung der Schwarzschild-Lösung mit  $\Lambda$ -Term führt für eine radiale Bewegung eines Testkörpers zur Differentialgleichung

$$\ddot{r} = -\frac{GM}{r^2} + \frac{1}{3}\Lambda r \quad \left(\dot{r} = \frac{dr}{d\tau}\right).$$

**Bemerkung:** Das Einstein-Universum ist die einzige **statische** Staub-Lösung (unstabil).

Einstein beschliesst seine Arbeit mit folgenden Sätzen:

*“Um zu dieser widerspruchsfreien Auffassung zu gelangen, mussten wir allerdings eine neue, durch unser tatsächliches Wissen von der Gravitation nicht gerechtfertigte Erweiterung der Feldgleichungen der Gravitation einführen. Es ist jedoch hervorzuheben, dass eine positive Krümmung des Raumes durch die in demselben befindliche Materie auch dann resultiert, wenn jenes Zusatzglied nicht eingeführt wird; das letztere haben wir nur nötig, um **eine quasistatische Verteilung der Materie zu ermöglichen, wie es der Tatsache der kleinen Sterngeschwindigkeiten entspricht.**”*

Newton'scher Limes des kosmologischen Terms.

Für nichtrelativistische Materie der Massendichte  $\rho_M$  ist der Newtonsche Limes

$$\Delta\phi = 4\pi G(\rho_M - 2\rho_\Lambda).$$

Einstein benutzte in seiner Arbeit aber eine falsche Analogie (Massenterm). Diese ist dann in den klassischen Lehrbüchern und Monographien übernommen worden, so z.B. bei von Laue, Weyl, Pauli und Pais' Einstein-Biographie; stellvertretend sei hier nur auf S. 215 des berühmten Enzyklopädieartikels von Wolfgang Pauli verwiesen.

# Einsteins Konversion

Einstein. A. (1931). **Sitzungsber. Preuss.** Akad. Wiss. 235-37.

Zitierungen:

A. Einstein. 1931. **Sitzsber. Preuss.** Akad. Wiss. ...

A. Einstein. **Sitzber. Preuss.** Akad. Wiss. ... (1931)

A. Einstein (1931). **Sber. preuss.** Akad. Wiss. ...

Einstein. A .. 1931. **Sb. Preuss.** Akad. Wiss. ...

A. Einstein. **S.-B. Preuss.** Akad. Wis. ...1931

A. Einstein. **S.B. Preuss.** Akad. Wiss. (1931) ...

Einstein, A., and Preuss, S.B. (1931). Akad. Wiss. **235**.

(*“General Relativity and Gravitation”*, One hundred years after the birth of Einstein, Vol.2, pp. 329-357.)

# Das Rätsel der Vakuumenergie

Nach moderner Auffassung beruht die kosmologische Konstante (die **Dunkle Energie**) auf einer **Energiedichte des leeren Raumes**. Quantentheoretisch ist das Vakuum ein komplexer Zustand, durchzogen von fluktuierenden Quantenfeldern und Kondensaten mannigfaltiger Art.

## Nullpunktenergien in der Quantenphysik

Heisenberg, 1925:

$$H(p, q) = \frac{1}{2m}p^2 + \frac{1}{2}m\omega^2q^2; \quad E_0 = \hbar\omega/2$$

Benutzung von  $[q, p] = i\hbar \Rightarrow \Delta q \cdot \Delta p \geq \hbar/2$ .

Born, Heisenberg und Jordan, 1925: Nullpunktenergie des Strahlungsfeldes.

## **Zusammenfassung:**

Sicher wissen wir bis heute nur, dass die Dunkle Energie etwa 70% der gesamten Energie des Universums ausmacht. Als Fazit können wir festhalten, dass wir bislang nur etwa 1/20 der gravitativ nachweisbaren Energie in Materie von uns heute bekannter Natur lokalisieren können. Die Physik ist wahrlich nicht ans Ende gekommen. Wie auch immer die Lösung der angesprochenen Probleme ausfallen mag, sie wird sowohl für die Grundlagenphysik als auch für die Astrophysik und Kosmologie enorme Auswirkungen haben.

Eine überzeugende Antwort auf das Rätsel der Vakuumenergie können wir uns nur von einem **einheitlichen Verständnis der fundamentalen Wechselwirkungen** erhoffen. Interessante Versuche in dieser Richtung, bekannt unter dem Namen “Stringtheorien”, gibt es schon seit längerer Zeit. Aber auch aus diesen Bemühungen ist bis jetzt kein überzeugender Vorschlag für einen winzigen positiven Wert der kosmischen Vakuum-Energiedichte hervorgegangen.

Einstein’s Beitrag von 1917 wirkt also weiter und sein kosmologisches Glied hat sich zum Problem der **Dunklen Energie** ausgeweitet. Der Aufklärung dieses grossen Rätsels sind zahlreiche künftige Projekte gewidmet.