

Die Rotverschiebung von extragalaktischen Nebeln

von F. Zwicky.

(16. II. 33.)

Inhaltsangabe. Diese Arbeit gibt eine Darstellung der wesentlichsten Merkmale extragalaktischer Nebel, sowie der Methoden, welche zur Erforschung derselben gedient haben. Insbesondere wird die sog. Rotverschiebung extragalaktischer Nebel eingehend diskutiert. Verschiedene Theorien, welche zur Erklärung dieses wichtigen Phänomens aufgestellt worden sind, werden kurz besprochen. Schliesslich wird angedeutet, inwiefern die Rotverschiebung für das Studium der durchdringenden Strahlung von Wichtigkeit zu werden verspricht.

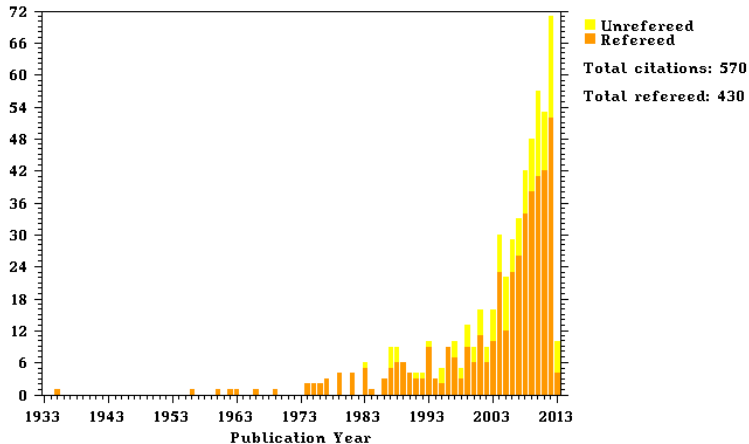
§ 1. Einleitung.

Es ist schon seit langer Zeit bekannt, dass es im Weltraum gewisse Objekte gibt, welche, wenn mit kleinen Teleskopen beobachtet, als stark verschwommene, selbstleuchtende Flecke erscheinen. Diese Objekte besitzen verschiedenartige Strukturen. Oft sind sie kugelförmig, oft elliptisch, und viele unter ihnen haben ein spiralartiges Aussehen, weshalb man sie gelegentlich als Spiralnebel bezeichnet. Dank des enormen Auflösungsvermögens der modernen Riesenteleskope gelang es, festzustellen, dass diese Nebel ausserhalb der Grenzen unseres eigenen Milchstrassensystems liegen. Aufnahmen, die mit dem Hundert-Zoll-Teleskop auf dem Mt. Wilson gemacht worden sind, offenbaren, dass diese Nebel

in Zusammenhang gebracht werden. Einer Expansion von 500 km/sek pro Million Parseks entspricht nach EINSTEIN und DE SITTER eine mittlere Dichte $\rho \approx 10^{-28}$ gr/cm³. Aus den Beobachtungen an selbstleuchtender Materie schätzt HUBBLE $\rho \sim 10^{-31}$ gr/cm³. Es ist natürlich möglich, dass leuchtende plus dunkle (kalte) Materie zusammengenommen eine bedeutend höhere Dichte ergeben, und der Wert $\rho \sim 10^{-28}$ gr/cm³ erscheint daher nicht

¹⁾ A. EINSTEIN und W. DE SITTER, Proc. of the Nat. Acad. Sci., Vol. 18, S. 213, 1932.

Citations/Publication Year for 1933AcHPh...6..110Z



CDM

Non-relativistic at the time of structure formation.

- ▶ Motivated by hierarchy problem of the SM.
- ▶ Freeze-out leads to the right relic density (independent of mass).
- ▶ Can be searched for using ID, DD and at colliders.

Small scale structure? (Satellite problem, cusp vs core, ...)

CDM

Non-relativistic at the time of structure formation.

- ▶ Motivated by hierarchy problem of the SM.
- ▶ Freeze-out leads to the right relic density (independent of mass).
- ▶ Can be searched for using ID, DD and at colliders.

Small scale structure? (Satellite problem, cusp vs core, ...)

WDM

Mass range 1–10 keV and not cold.

- ▶ Lyman- α constraints:

$$\text{thermal relic} \Rightarrow m \gtrsim 1.5 \text{ keV} \quad (1)$$

$$\text{non-thermal relic} \Rightarrow m \gtrsim 3 - 8 \text{ keV} \quad (2)$$

- ▶ Tremaine-Gunn bound: $m_{\text{fermion}} \gtrsim 1 \text{ keV}$

Model dependent upper bound from sterile $\chi \rightarrow \nu\gamma$ decay ($\Gamma \propto m_\chi^5$).

Typically super-weak interactions with SM particles \Rightarrow non-thermal.

WDM

Mass range 1–10 keV and not cold.

- ▶ Lyman- α constraints:

$$\text{thermal relic} \Rightarrow m \gtrsim 1.5 \text{ keV} \quad (1)$$

$$\text{non-thermal relic} \Rightarrow m \gtrsim 3 - 8 \text{ keV} \quad (2)$$

- ▶ Tremaine-Gunn bound: $m_{\text{fermion}} \gtrsim 1 \text{ keV}$

Model dependent upper bound from sterile $\chi \rightarrow \nu\gamma$ decay ($\Gamma \propto m_\chi^5$).

Typically super-weak interactions with SM particles \Rightarrow non-thermal.

Mass range 1–10 keV and not cold.

- ▶ Lyman- α constraints:

$$\text{thermal relic} \Rightarrow m \gtrsim 1.5 \text{ keV} \quad (1)$$

$$\text{non-thermal relic} \Rightarrow m \gtrsim 3 - 8 \text{ keV} \quad (2)$$

- ▶ Tremaine-Gunn bound: $m_{\text{fermion}} \gtrsim 1 \text{ keV}$

Model dependent upper bound from sterile $\chi \rightarrow \nu\gamma$ decay ($\Gamma \propto m_\chi^5$).

Typically super-weak interactions with SM particles \Rightarrow non-thermal.

Gravitino

- ▶ Gravitational interactions \rightarrow non-thermal.
- ▶ NLSP is metastable and can source \tilde{g} . Can be detected at the LHC.

$$\tilde{l} \rightarrow \tilde{g} + l$$

- ▶ Constraints from BBN (NLSP decays + ${}^4\text{He}$ bound states).
- ▶ Cosmological gravitino problem: overproduced if stable at the TeV mass and spoils BBN if unstable. Possible solution: R-parity violation, makes it observable.

keV sterile neutrino

Add three sterile neutrinos (SM singlets that mix with the neutrinos) below the electroweak scale.

- ▶ Two ν 's are needed to explain oscillations and the matter-antimatter asymmetry. They are the heaviest and taken to be almost degenerate in mass.
- ▶ Adding a third neutrino, in the keV mass-range, provides a DM candidate and makes the matter content left-right symmetric.

Shaposhnikov, Gorbunov, Ruchayskiy, Boyarski, *et al.*

- ▶ $|M_2 - M_3| \ll M_2$ amplifies oscillations in primordial plasma and redistributes lepton asymmetry between active and sterile neutrinos.
- ▶ Lepton number is violated by Majorana mass and complex Yukawas trigger CP-violation \Rightarrow leptogenesis.
- ▶ N_1 forms the DM and is unstable because of mixing: decays into three active neutrinos.

