

Fig. 20.1. A comparison of the rotation curve for the Andromeda galaxy with that considered for the Milky Way, after the first HI observations of M31 were made at Dwingeloo (from van de Hulst, H.C., Raimond, E., van Woerden, H. 1957, *Bull. Astron. Inst. Neth.*, **14**, 1). The curve marked as adopted refers to that suggested by the radio data.

of stars in elliptical galaxies inside the sphere that contains half of the total luminosity of the system is very close to $\rho_* \sim r^{-2}$ (for a constant M/L ratio) (see Chap. 22).

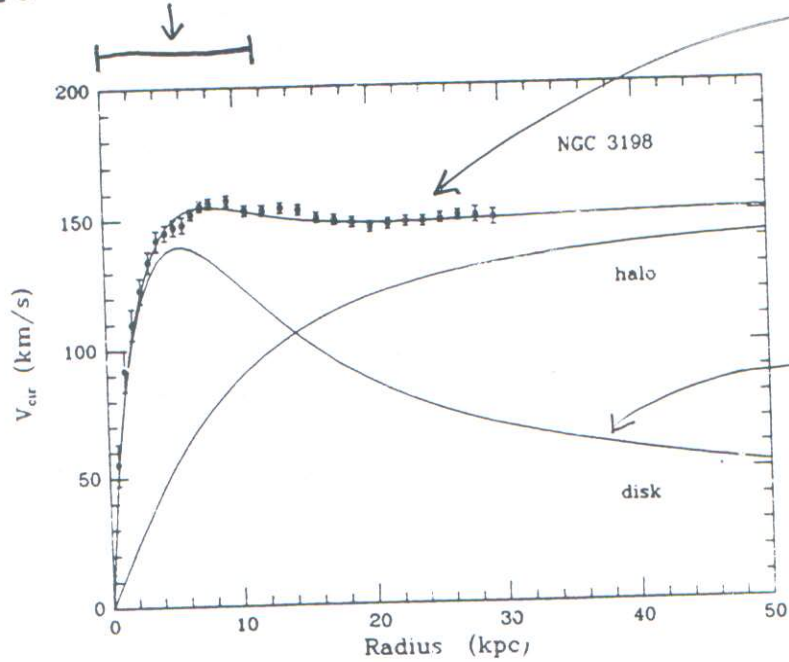
In the 1970s the issue of flat rotation curves rapidly became the focus of various observational and theoretical studies.¹¹ Initially emphasis was placed on the flatness of the rotation curve with no special qualification placed on its radial range. In other words, the existence of dark halos was often inferred simply on the basis of optically derived rotation curves.¹² However, it was soon pointed out that kinematical studies restricted to the optical disk would actually be unable to provide convincing evidence for the existence of dark halos; in fact, by including the role of the bulge when present, we could show that in general the photometric profile of the disk could be converted, with a constant M/L ratio, into a mass distribution reasonably consistent with the optically derived rotation curves¹³ (see Fig. 20.2). The decisive evidence for dark halos comes from the radially extended radio rotation curves, as proved by the clear-cut case of the spiral galaxy NGC 3198¹⁴ (see Fig. 20.3). The study of high-quality radio rotation curves shows that dark matter is indeed required even for the rare cases in which the rotation curve shows a declining trend in the outer parts.¹⁵ It should be emphasized that, to convert the measurements of rotation curves into meaningful statements about the overall gravitational field, the velocity field of the investigated galaxy should be highly symmetric so that we are not misled by distortions in the field that are known to be induced by bars or warps.

If we admit that dark halos exist, we should try to find constraints on their intrinsic shapes. First, we should ask whether their symmetry conforms to that of the disk, that is, whether they can be considered as essentially axisymmetric. Then we should ask whether they are fairly round or instead are very flat. The case of our Galaxy would suggest axisymmetry and argues against the distribution of dark matter in a thin disk. The study of radially extended rotation

1985 van Albada, Bahcall, Begeman & Sancisi

V_{cir} →

ESTENSIONE DEL DISCO OTTICO



DATI SUL MOTO DEL GAS (DATI RADIO)

DECRESCITA "KEPLERIANA" ($\sim R^{-1/2}$) PREVISTA PER LA PRESENZA DEL DISCO

⇒ ALONI DI MATERIA OSCURA

V_{cir} = VELOCITA' DEL MOTO CIRCOLARE

$$\Omega = \frac{8\pi G \rho_0}{3 H_0^2} ; \Omega_\Lambda = \frac{\Lambda}{3 H_0^2} \quad (25)$$

$$\Omega + \Omega_R + \Omega_\Lambda = 1$$

$$H^2 \equiv \left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = H_0^2 \left[\Omega (1+z)^3 + \Omega_R (1+z)^2 + \Omega_\Lambda \right]$$

$$\frac{\ddot{a}}{a} = H_0^2 \left[\Omega_\Lambda - \frac{1}{2} \Omega (1+z)^3 \right]$$

$$q_0 \equiv -\frac{\ddot{a}_0 a_0}{\dot{a}_0^2} = \frac{\Omega}{2} - \Omega_\Lambda$$

$$H_0, \Omega, \Omega_\Lambda$$

$$\frac{3H_0^2}{8\pi G} \approx 1.88 \times 10^{-29} h^2 \text{ g cm}^{-3}$$

$$\frac{1}{H_0} \approx 0.98 \cdot 10^{10} h^{-1} \text{ yr}$$

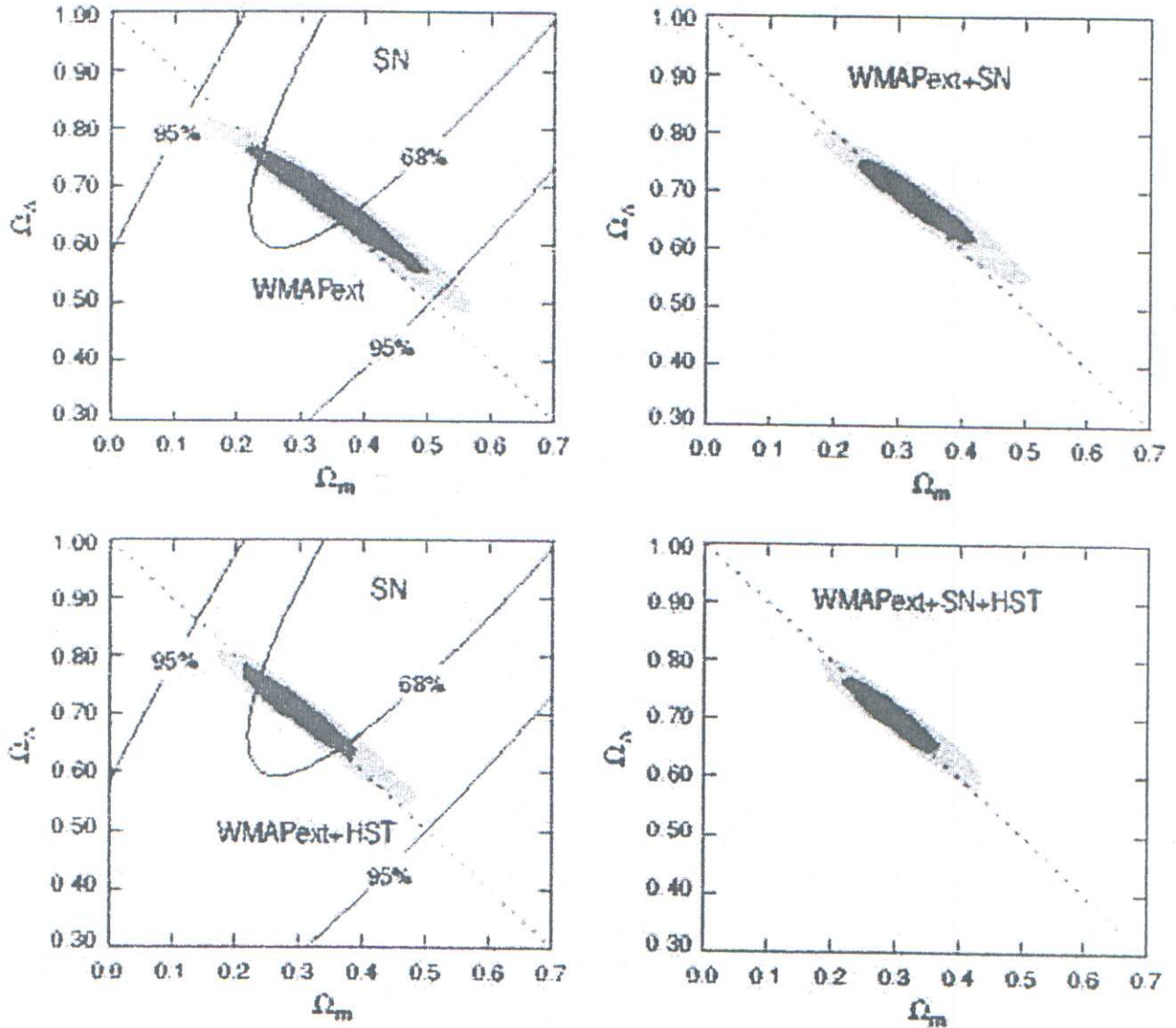


Fig. 13.— Constraints on the geometry of the universe: $\Omega_m - \Omega_\Lambda$ plane. This figure shows the two dimensional likelihood surface for various combinations of data: (upper left) WMAPext + $H_0 > 50$ km/s/Mpc prior (supernova limits (Riess et al. 1998, 2001) are shown in the panel but not used in the likelihood in this part of the panel); (upper right) WMAPext+ supernova data; (lower left) WMAPext+ HST Key Project; (lower right) WMAPext+ HST Key Project + supernova

Spiegel et al. (Feb. 2003)

The Astrophys. J. Suppl. Ser. 148, 175-194

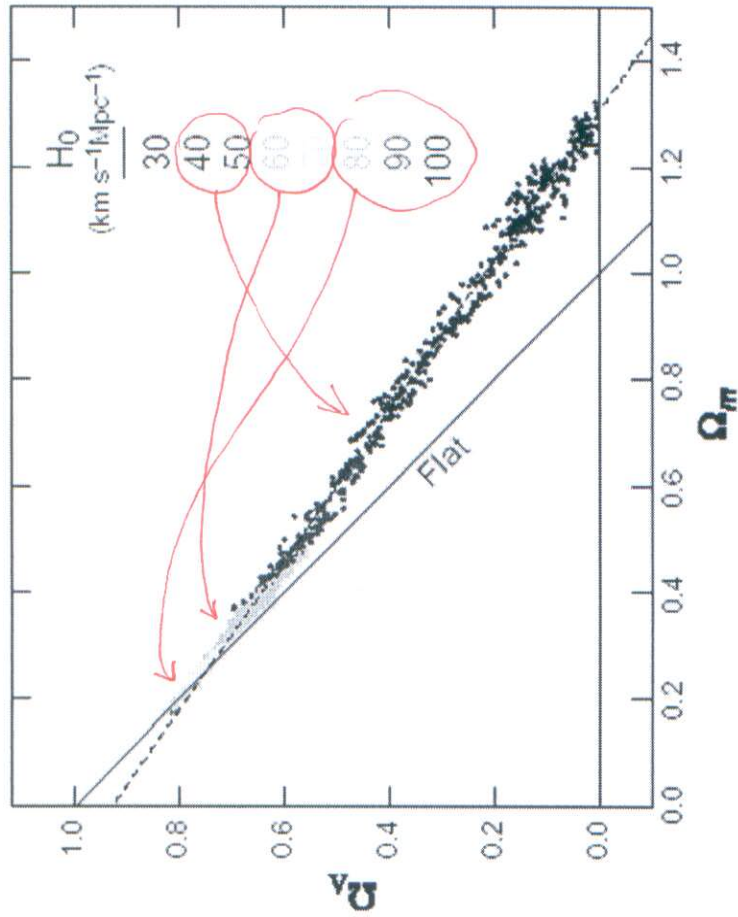


Fig. 24 — Range of non-flat cosmology models consistent with the WMAP data only. The models in the figure are all power-law CDM models with dark energy and dark matter, but without the constraint that $\Omega_m + \Omega_\Lambda = 1$ (model M10 in Table 3). The different colors correspond to values of the Hubble constant as indicated in the figure. While models with $\Omega_\Lambda = 0$ are not disfavored by the WMAP data only ($\Delta\chi^2_{eff} = 0$; Model M4 in Table 3), the combination of WMAP data plus measurements of the Hubble constant strongly constrain the geometry and composition of the universe within the framework of these models. The dashed line shows an approximation to the degeneracy track: $\Omega_K = -0.3040 + 0.4067\Omega_\Lambda$.

http://babbage.sissa.it/PS_cache/astro-ph/pdf/0603/0603449.pdf

Spiegel et al. (2007) *The Astrophys. J. Suppl. Ser.* 170, 377-408

26 bis

LOMBARDI 1998
2000 Ph.D.

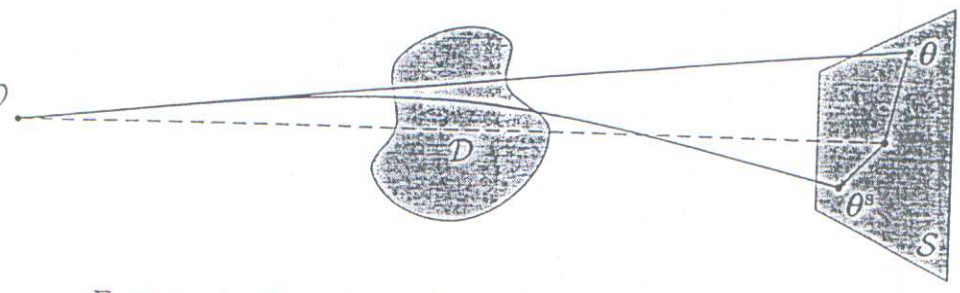


FIGURE 1. The effect of a gravitational lens on a point source S . The source, located at θ^s , is observed at position θ because of the lens effect.

$$n = 1 - \frac{2\Phi}{c^2}$$

LOMBARDI 1998
2000 Ph.D.

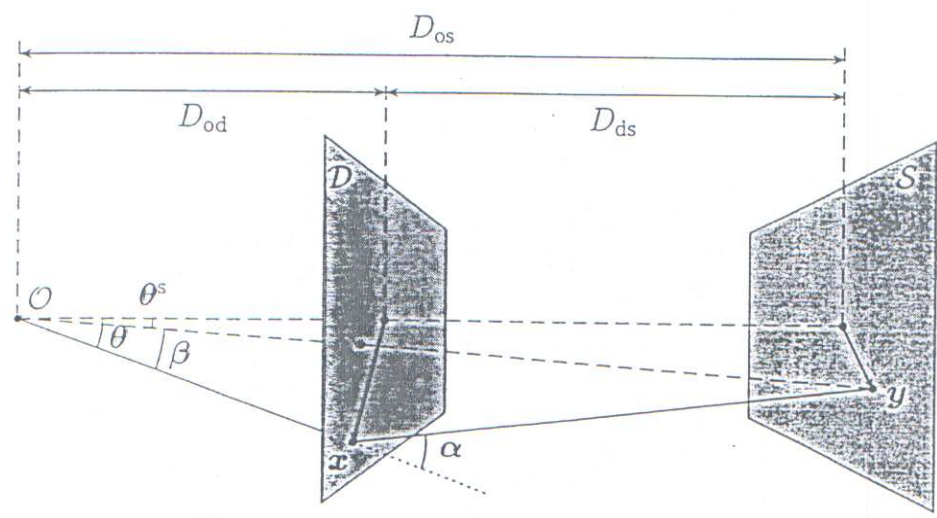


FIGURE 2. Definition of the lens deflection angle α , of the observed deflection angle β , and of distances D_{od} , D_{os} and D_{ds} .

$$\Sigma_c = \frac{c^2 D_{os}}{4\pi G D_{ds} D_{od}}$$

CRITICAL DENSITY

$$\theta^s = \theta - \beta(\theta) \quad \text{"RAY TRACING"}$$

$$\beta(\theta) = \frac{4G D_{ds} D_{od}}{c^2 D_{os}} \int \frac{\Sigma(\theta') (\theta - \theta')}{\|\theta - \theta'\|^2} d\theta' = \frac{D_{ds}}{D_{os}} \alpha(D_{od} \theta)$$

Materia oscura

di Giuseppe Bertin e Tjeerd S. van Albada

SOMMARIO: 1. Introduzione. □ 2. Note storiche e metodologiche. □ 3. Le vicinanze del Sole. □ 4. Galassie a spirale. □ 5. Galassie ellittiche. □ 6. Gruppi e ammassi. □ 7. Teorie alternative della gravitazione. □ 8. Cosmologia. □ Bibliografia.

1. Introduzione.

Attualmente, molti degli argomenti più scottanti e dei problemi irrisolti in astrofisica sono connessi con la materia oscura, cioè con la materia che non è osservabile attraverso la sua radiazione elettromagnetica. Telescopi e strumenti sofisticati, sulla Terra e nello spazio, permettono di esplorare l'universo da molte finestre aperte attraverso l'intero spettro delle onde elettromagnetiche – dalle onde radio ai raggi X; tuttavia, è ipotesi ormai generalmente accettata che in contesti differenti (nell'astronomia galattica ed extragalattica), debbano esistere quantità rilevanti di materia oscura, cioè non osservabile direttamente attraverso la sua radiazione elettromagnetica. È anzi possibile che il 90% dell'universo sia costituito da materiale finora non visto, della cui composizione a tutt'oggi non si ha ancora un'idea chiara e definitiva: non sappiamo, cioè, se sia costituito da corpi celesti a bassa luminosità come quelli conosciuti (pianeti o stelle nane; in questo caso essa viene spesso definita materia oscura 'barionica'), o da buchi neri o, addirittura, da qualche particella elementare non ancora rilevata, possibile residuo del *big bang* iniziale (in quest'ultimo caso si parla di materia oscura 'non barionica'). Diversi progetti sono in corso con l'obiettivo di identificare la natura di questa materia non vista.

È anche possibile che i costituenti principali della materia oscura siano differenti su scale diverse. D'altra parte, l'insoddisfazione derivante dall'incapacità di identificare da che cosa sia formata la materia oscura è così profonda, che è stato perfino suggerito che le leggi della fisica, così come sono state verificate su scala di laboratorio, non siano più valide, o almeno debbano essere riviste, quando si ab-

bia a che fare con scale astronomiche (v. cap. 7). In questo caso la materia oscura sarebbe come l'etere cosmico, qualcosa che viene chiamato in causa per mascherare le nostre lacune nella conoscenza delle leggi della fisica. In effetti, basta guardare le immagini di un ammasso globulare o di una galassia per avere la prova diretta che la forza dominante è quella gravitazionale; tuttavia – come ha detto Feynman (v. Feynman e altri, 1963) – "non si può provare che la legge sia in questo caso esattamente quella dell'inverso del quadrato, ma solamente che, a queste enormi distanze, c'è ancora un'attrazione che tiene insieme il tutto". Infatti, le misure che attualmente pongono l'esigenza che esista del materiale inosservato sono il risultato proprio di quegli 'esperimenti' che dovrebbero provare la validità delle leggi della fisica, e specialmente quella della legge di gravitazione, su grandi scale per distanze galattiche e intergalattiche.

D'altra parte occorre riconoscere che, secondo quanto appreso dagli esperimenti di laboratorio e da un piccolo numero di principi generali di simmetria e semplicità, le leggi della fisica hanno portato al quadro cosmologico del *big bang* che – nonostante varie questioni rimangano tuttora non risolte – ha ricevuto notevoli conferme osservative (come ad esempio la misura della radiazione di fondo cosmica). Forti di questo successo, in anni recenti i cosmologi hanno decisamente privilegiato uno scenario in cui $\Omega = \rho_0 / \rho_{crit} = 1$ (dove ρ_0 è la densità media attuale e ρ_{crit} la densità critica affinché l'universo sia chiuso; v. cap. 8), fornendo in tal modo un deciso contributo di entusiasmo e interesse a studiare il problema della materia oscura in astrofisica. La relazione principale tra la cosmologia e il problema della materia oscura, come vedremo, passa quindi attraverso il paragone tra la densità ρ_{crit} , interessante dal punto di vista cosmologico, e la densità reale ρ_0 , quale risulta dalle osservazioni. È chiaro da molto tempo che la quantità di massa associata alla materia visibile porta a un valore piccolissimo di ρ_0 ; d'altra parte, il fatto che le osservazioni su scala galattica indicassero chiaramente come