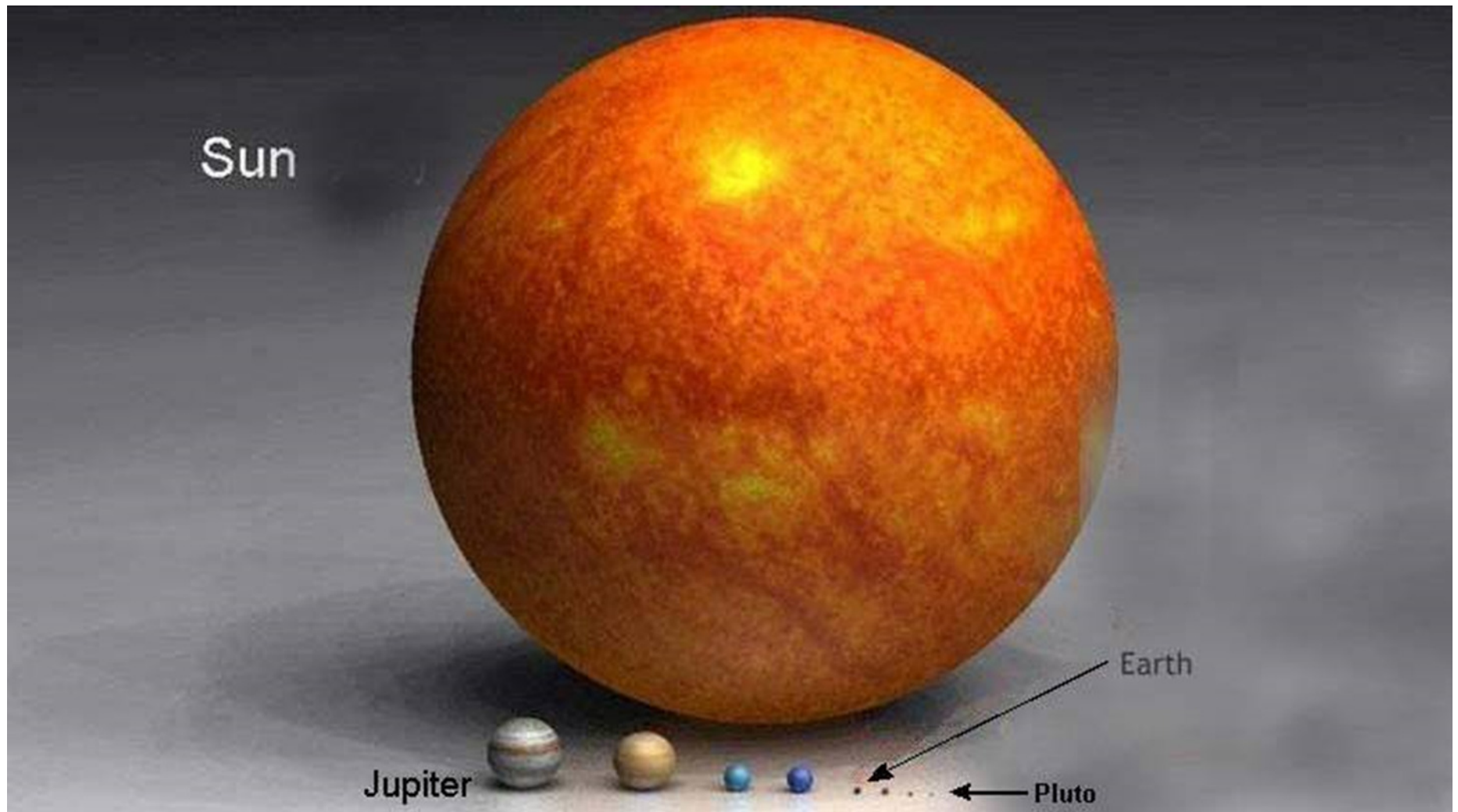


Dr Tomasz Płazak

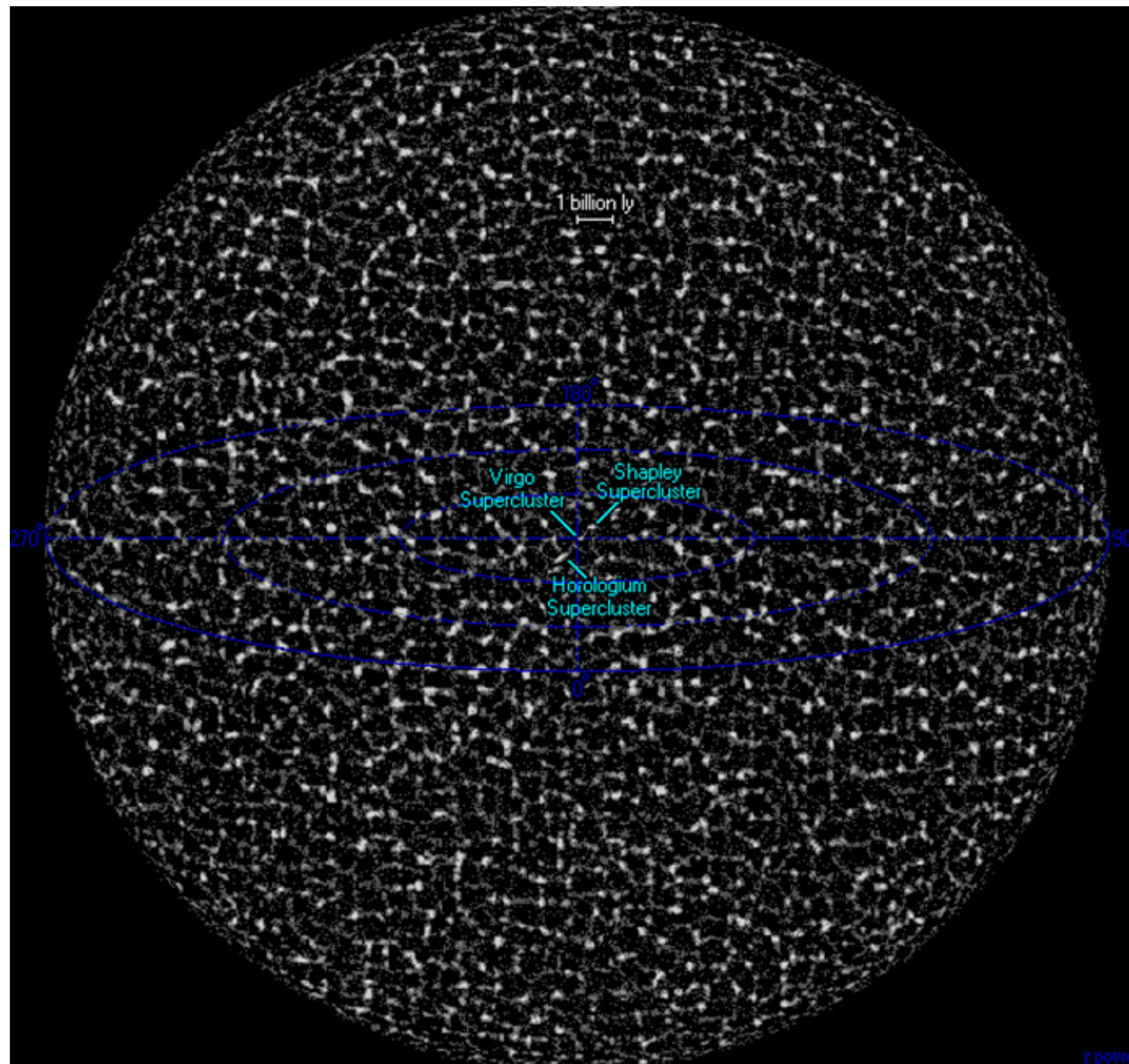
**CIEMNA ENERGIA DOMINUJĄCA
WSZECHŚWIAT**

(Nagroda Nobla 2011)

SŁOŃCE i ZIEMIA



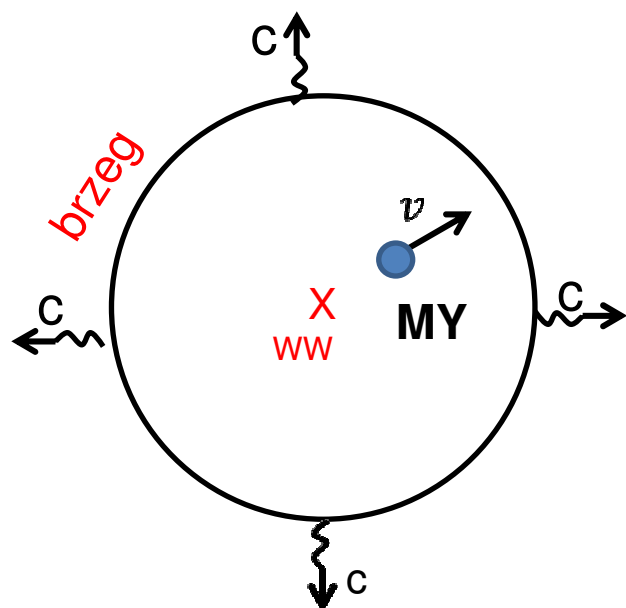
Wszechświat OBSERWOWALNY



ZABICIE IDEI LOKALNEGO („ZWYKŁEGO”) WIELKIEGO WYBUCHU

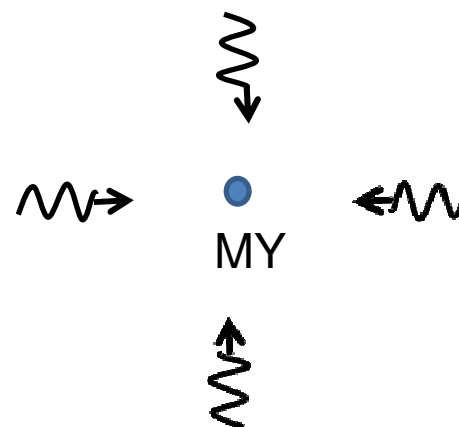
„Powinno” być tak

Promieniowanie reliktowe



czyli w ogóle odbiorniki w MY
nie mogłyby rejestrować
promieniowania relikтового !

Tymczasem **JEST** tak



totalna klęska idei
„lokalnego”

Wielkiego Wybuchu

NARODZINY KOSMOLOGII (Einstein, r. 1917)

- 1916 r.: „Literacki” skrót OTW → **Masy zakrzywiają czasoprzestrzeń**

↓
dając grawitację

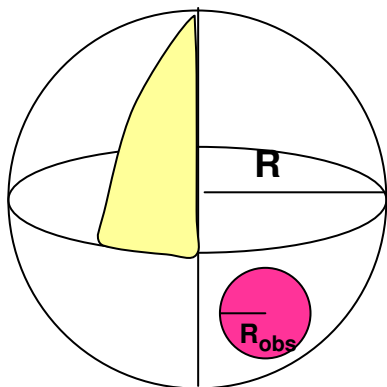
↘
 $k = +1, 0, -1$

- Równania OTW – w kosmologii (r. 1917)

rodzaj geometrii (typ krzywizny)	+	Λ	$g_{ik} =$	gęstości energii i ciśnień (rozkład przestrzenny)	$\Lambda = \Lambda_E$
		↑			

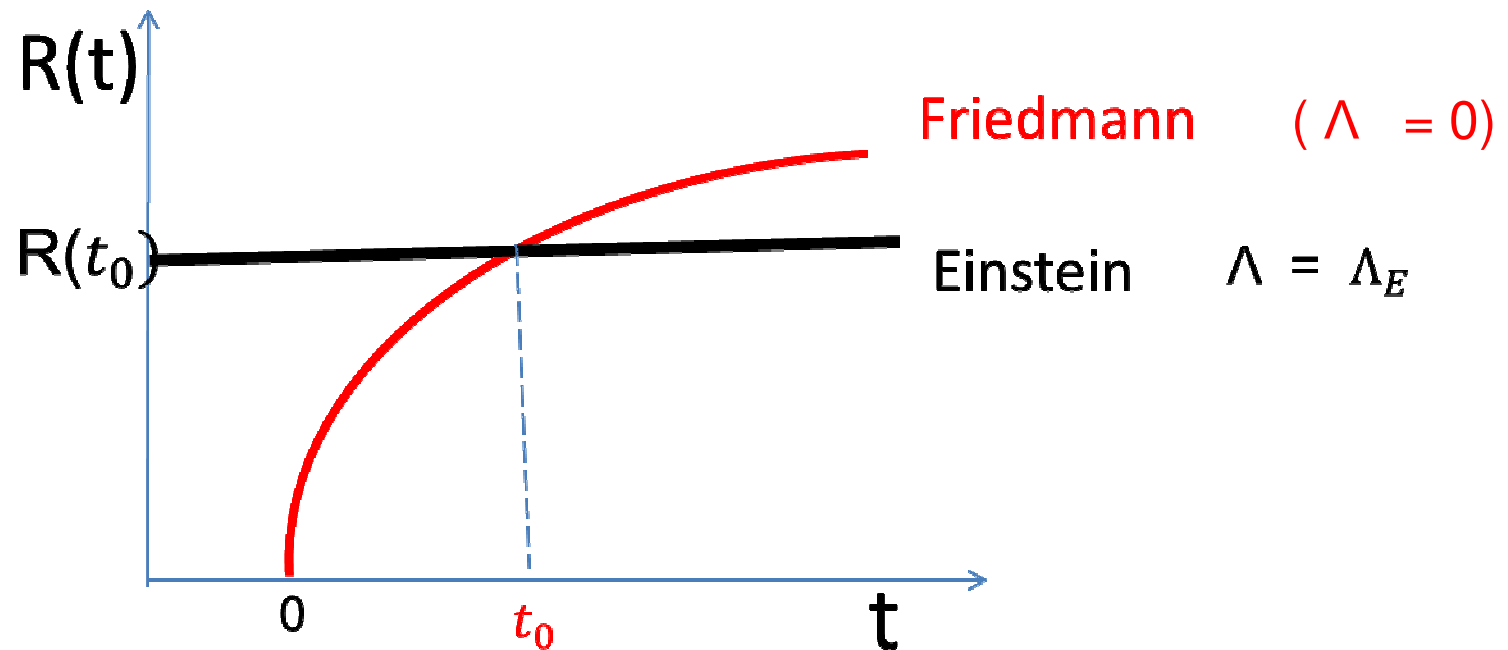
Czy tajemnicza „stała kosmologiczna” jest różna od zera?

- Wszechświat Einsteina ma geometrię **analogiczną** do **dwuwymiarowego (!)** „wszechświata płaszczków” żyjących na **SFERZE**



- przestrzeń rzeczywista to TYLKO sfera
 - suma kątów $> 180^\circ$
 - brak równoległych
 - długość okręgu $< 2 \pi r$
- } - geometria nie-euklidesowa (typu $k = +1$)
- pr. wszechśw. = pr. sfery: $R=1/\sqrt{\rho}=\text{const.}$

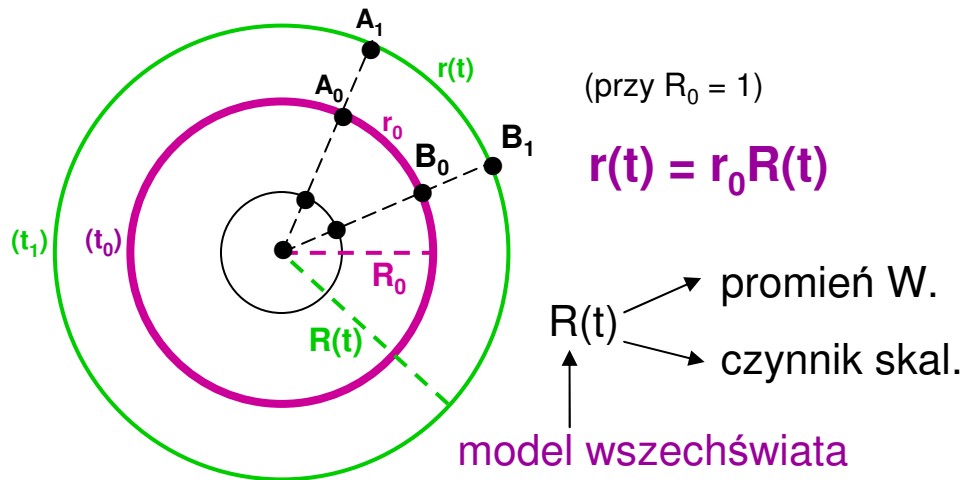
CZYNNIK SKALUJĄCY $R(t)$ W MODELACH EINSTEINA I FRIEDMANNA



Odległość dwóch dowolnych punktów wszechświata
 $r(t) = r(t_0) R(t)$

WSZECHŚWIATY FRIEDMANNA

- A. Friedmann: $\Lambda = 0 \rightarrow$ dla $k=+1$ **SFERA** (jak Einstein), ale **R rośnie !!**



poglądowo
dla $k=+1$:

**Powierzchnia balonu
nadmuchiwanego od środka**

Główna cecha: Przestrzeń (guma) **rozszerza się**
i **unoszą** galaktyki **nieruchome** względem niej

- Fundamentalne odkrycie: Przestrzeń (globalna) może być 1^o **zakrzywiona** (Einstein) 2^o **dynamiczna** (Friedmann)

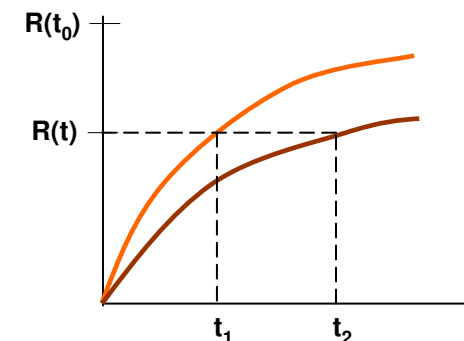
- Taka przestrzeń: 1^o automatycznie daje (czyli tłumaczy): $v = Hr$ (czyli **prawo Hubble'a**)
2^o : $\lambda > \lambda_0$ (czyli **red-shift**)

wszechświat
Friedmanna poprawny !

gdyż:

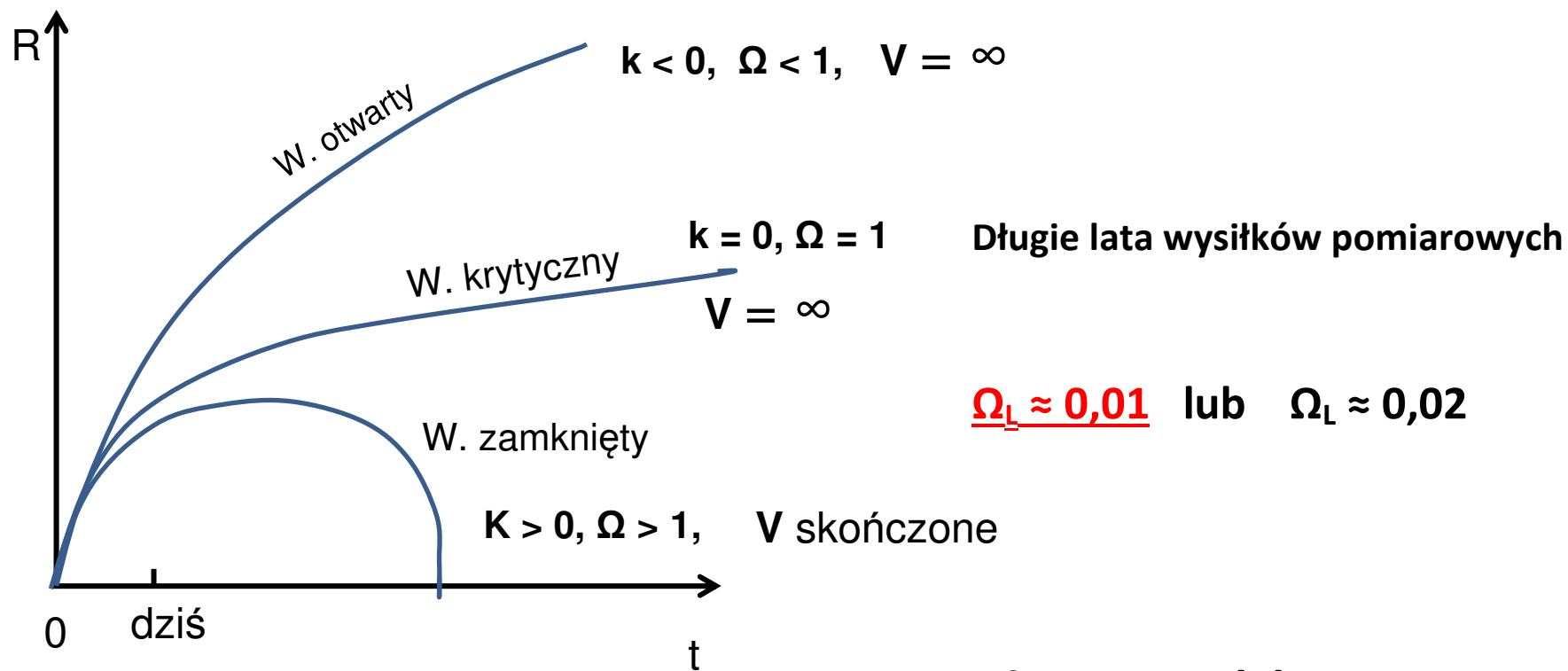
$$z + 1 = R(t_0) / R(t) \quad (z \text{ określa przeszłość})$$

- 1^o „Początek był **wszędzie**”
2^o „14 mld lat temu **narodziła się** przestrzeń mająca <wrodzoną> **cechę rośnięcia**”
- Tempo rośnięcia przestrzeni (wszechświata) podaje funkcja $R(t)$



MOŻLIWE WSZECHŚWIATY (MODELE) FRIEDMANNA

Rozwiązania równań OTW (Friedmann)



$$\underline{\Omega_L \approx 0,01} \text{ lub } \Omega_L \approx 0,02$$

$$\Omega_k = \frac{3H^2}{8\pi G}$$

$$\Omega = \frac{\rho}{\rho_k}$$

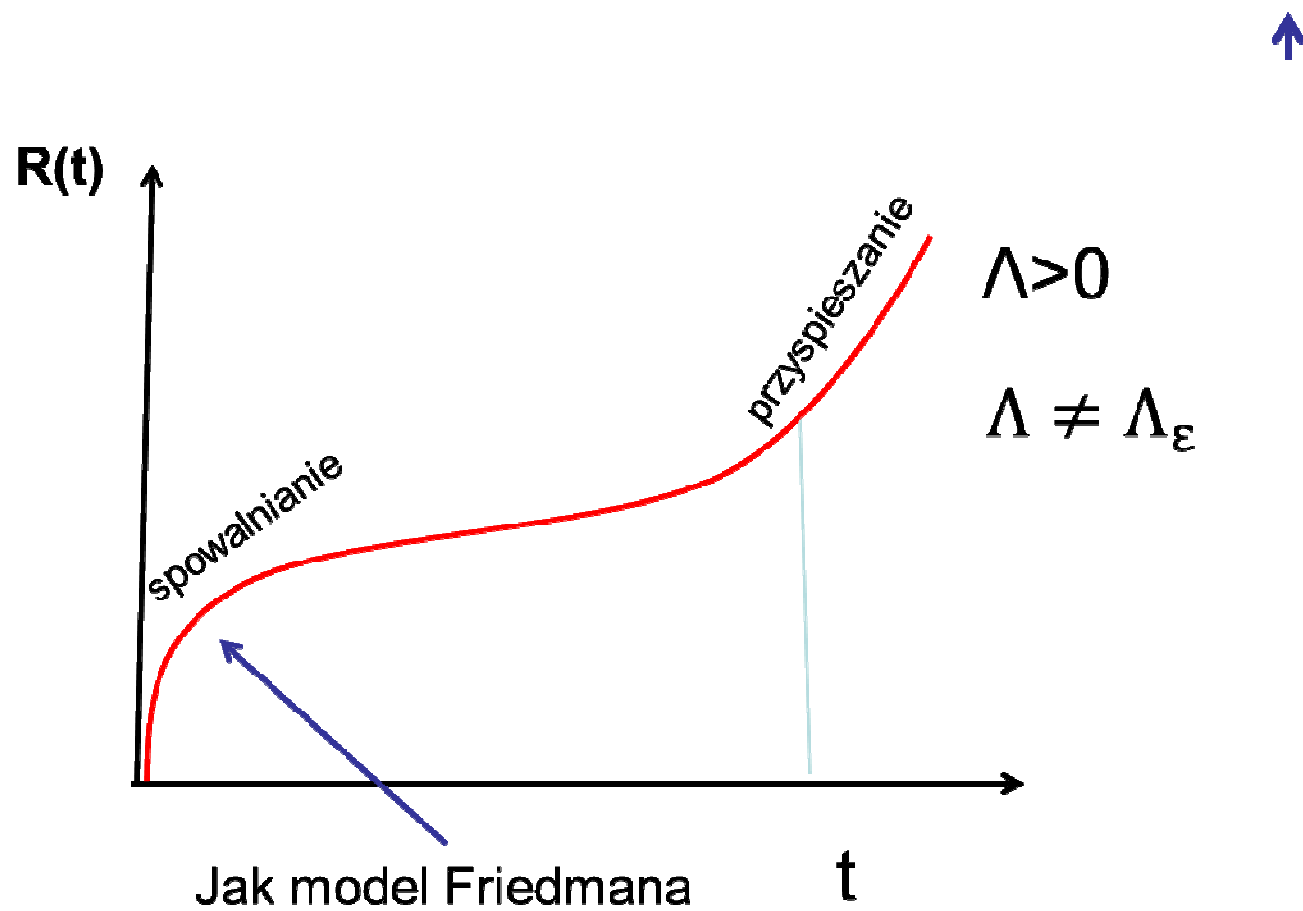
Czy materia świecąca (L) to
jedyny rodzaj materii wszechświata?

ODRZUCENIE STAŁEJ KOSMOLOGICZNEJ PRZEZ EINSTEINA (r.1930)

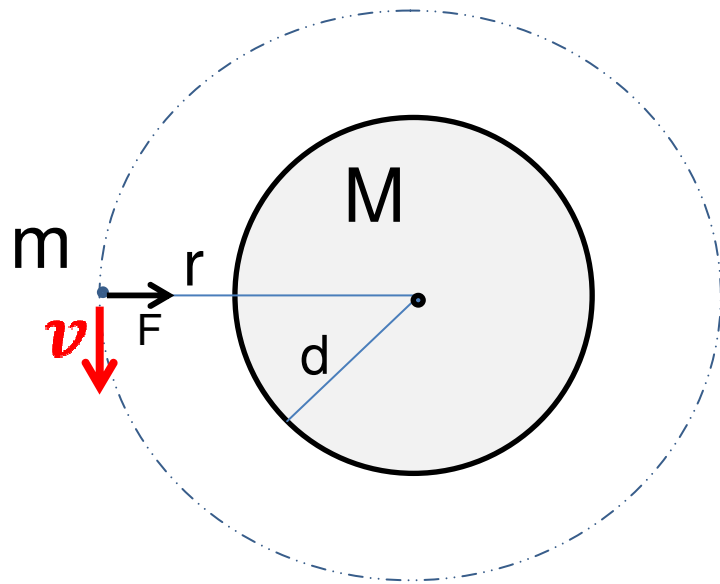


„Cosmological constant
was
the biggest blunder
of my life”

Zapomniany MODEL LEMAITRE'A

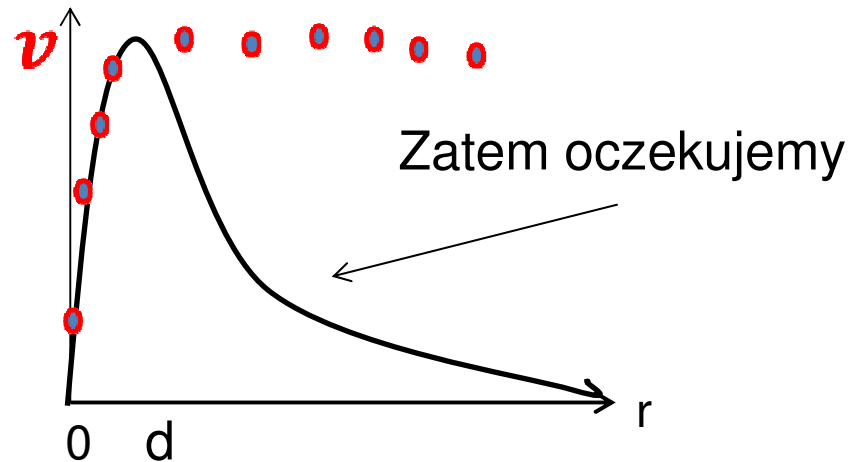


Krzywe rotacji galaktyk – wykrycie CIEMNEJ MATERII (MASY)



$$G \frac{mM}{r^2} = m \frac{v^2}{r} \rightarrow v = \sqrt{\frac{GM}{r}}$$

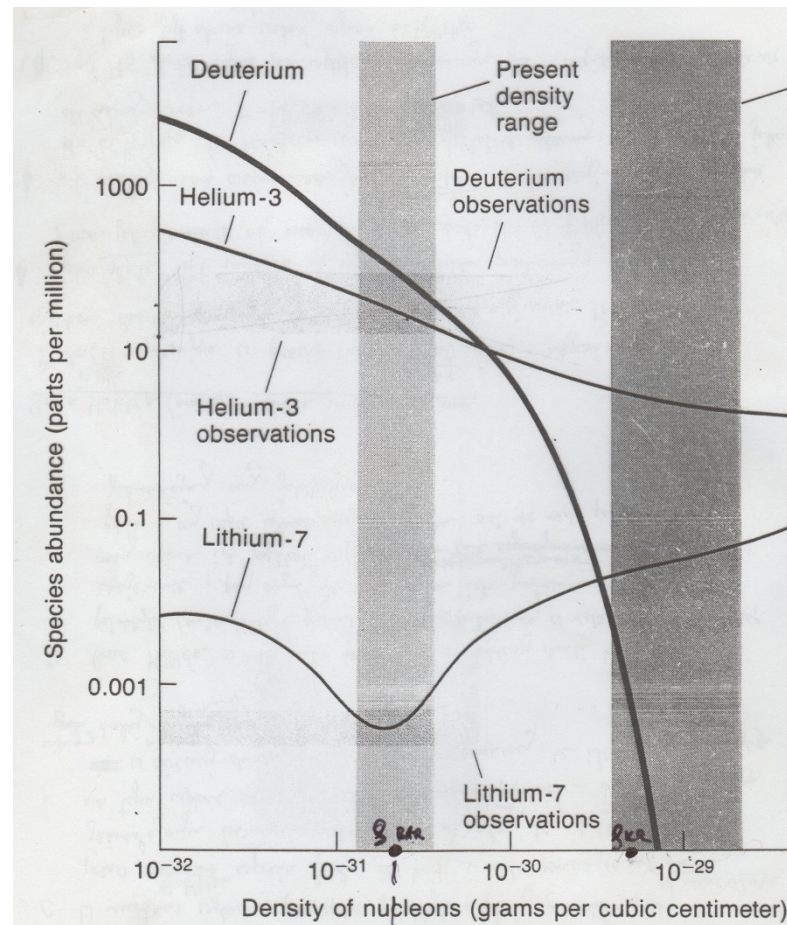
A jest tak - pomiary



$$\square = \text{const} \rightarrow M \sim r$$

A zatem wokół świecących dysków galaktycznych istnieją **wielkie** ilości **MATERII (MASY) CIEMNEJ (Dark Matter)** dające wartość $\Omega > 0,20$ (a może nawet $\Omega \approx 2.0$?)

Osiągnięcia badań NUKLEOSYNTAZY PIERWOTNEJ



Nałożenie na obliczone krzywe zmierzonych procentowych zawartości (abundancji) **wszystkich** pierwiastków które tworzą się w Wielkim Wybuchu wskazuje zgodnie że obecna gęstość ciężkich cząstek (**barionów**, czyli protonów i neutronów) we wszechświecie – z wliczeniem nawet tych które są obecnie ukryte np. w czarnych dziurach – wynosi

$$\rho_{BAR} = 4 \cdot 10^{-31} \text{ g/cm}^3$$

czyli

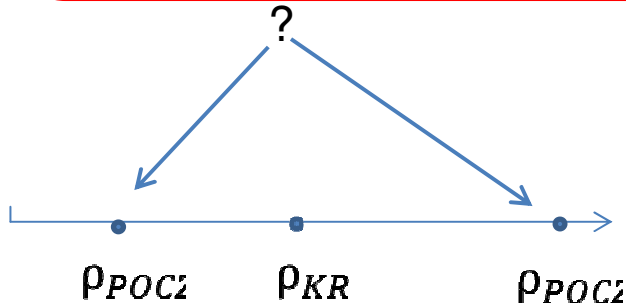
$$\Omega_{BAR} = 0,04 !!!$$

Pamiętając że $\Omega_{DM} > 0,20$ (a może nawet 2.0) osiągamy niezwykły wniosek

Wszechświat jest zdominowany przez materię (masę) o **nieznanej fizykom naturze !!**

Lata 80-te: NIEROZWIĄZANE PROBLEMY

1. PŁASKOŚĆ WSZECHŚWIATA
2. HORYZONTY
3. MONOPOLE MAGNETYCZNE
4. STRUKTURY WE WSZECHŚW.
5. WIEK WSZECHŚWIATA



Gdyby „początkowa” gęstość wszechświata miała wartość przypadkową to należałoby oczekiwać $\rho_{POCZ} \ll \rho_{KR}$

lub $\rho_{POCZ} \gg \rho_{KR}$

Przykład:

PROBLEM PŁASKOŚCI WSZECHŚWIATA

$k = 0$ oznacza $\Omega = 1.0$ (czyli $\rho = \rho_{KR}$)

Ile wynosi obecnie i ile **wynosiła** wartość Ω ?

*Z pomiarów wiemy że obecnie czyli

przy $t \approx 14$ miliardów lat $0.1 < \Omega < 2.0$

*Ale to oznacza (**obliczenia!**) że

przy $t = 300$ tys. lat (atomy) $\Omega = 1 \pm 10^{-2}$

przy $t = 100$ sek (lekke jądra) $\Omega = 1 \pm 10^{-14}$

przy $t = 10^{-36}$ s (okres inflacji) $\Omega = 1 \pm 10^{-52}$

przy $t = 10^{-43}$ s (kres czasu) $\Omega = 1 \pm 10^{-60}$

Dlaczego więc ρ_{POCZ} było aż tak skrajnie bliskie ρ_{KR} ?

Czyli dlaczego wszechświat początkowy był tak skrajnie bliski płaskiemu ($k = 0$)?

Teleskop HUBBLE i Ziemia

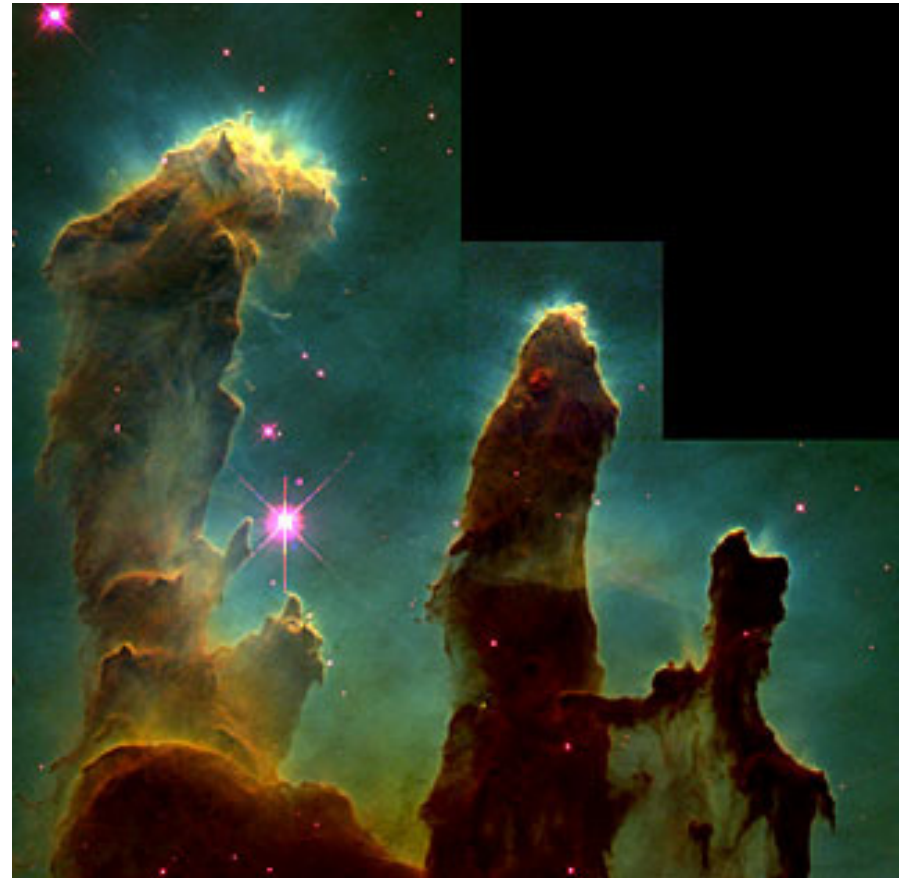






23

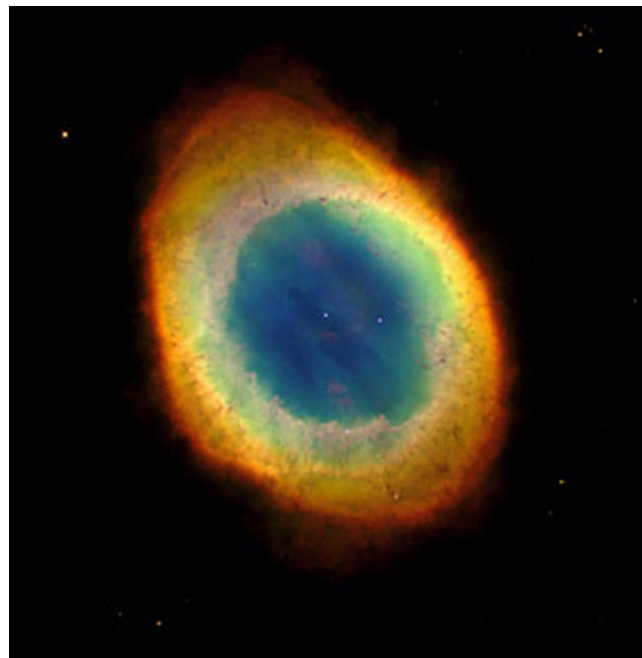
35



12



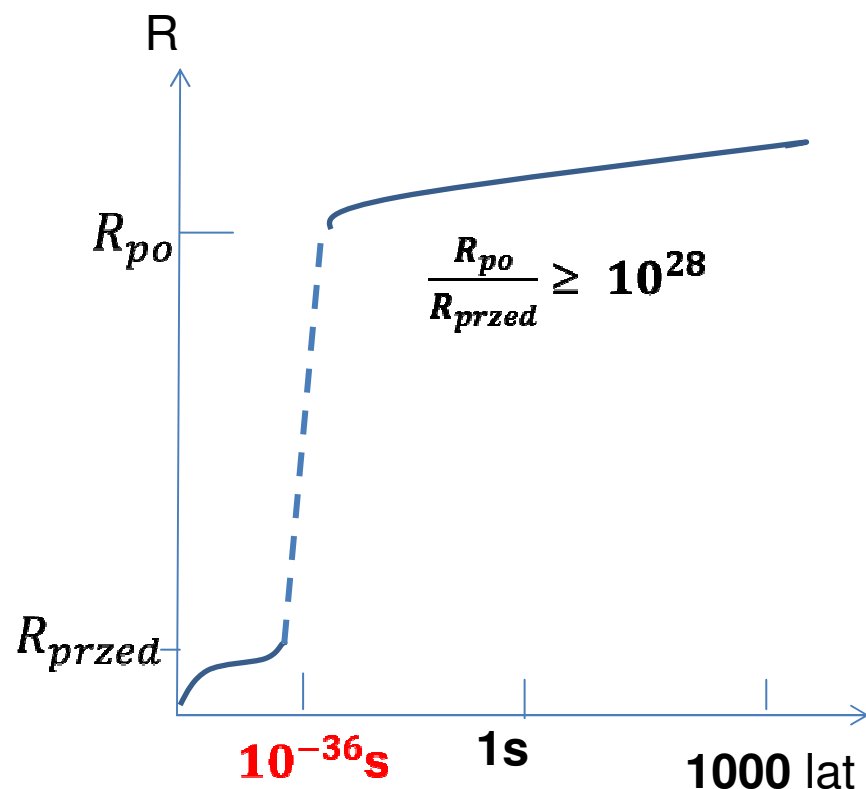
99



1

INFLACJA WSZECHŚWIATA

(to inflate = gwałtownie nadymać)



•W fazie inflacji gęstość energii jest ogromna, przy czym

$\rho = \text{const (!)}$ („fałszywa próżnia”)

pomimo rozszerzania się przestrzeni

•W konsekwencji r. Friedmanna dają

$$\dot{R}^2 = \frac{8\pi G}{3} \rho R^2 \rightarrow R = Ae^{Ht}$$

•Ciśnienie jest **ujemne** $p = -\rho c^2$ co **relatywistycznie** oznacza akcelerację

•Skok inflacyjny (rozwiązujący problemy) wynosi

$$\frac{R_{po}}{R_{przed}} \geq 10^{28}$$

•Teza o inflacji przyszła **spoza** kosmologii (Guth, r.1980)

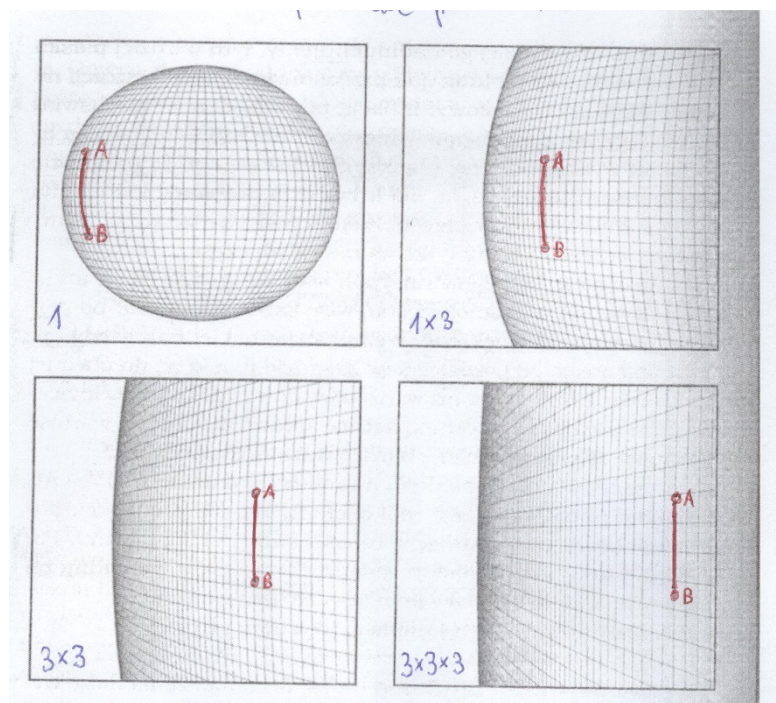
•*Inflacja wszechświata okazała się **panaceum** na wszystkie główne problemy kosmologii

I następuje w czasie zaledwie $t \approx 10^{-36} \text{ s}$

Przykład: **ROZWIĄZANIE PROBLEMU PŁASKOŚCI** ($k = 0$)

POPRZECZ INFLACJĘ

Wzrost skali (puchnięcie przestrzeni)
a problem płaskości



AB – rozmiar wszechświata OBSERWOWALNEGO

*Konsekwencja: Ponieważ pomiarowo $\Omega_L = 0.01$ to inflacja **przewiduje** istnienie DM i **prognozuje** jej gęstość na $\rho_{DM} = 0.99$!

Lata radości: Inflacja rozwiązuje **także pozostałe** problemy – co umacnia przekonania (powzięte spoza kosmologii) że **naprawdę istniała**.

Klatki ilustrują puchnięcie **dwuwymiarowego wszechświata zakrzywionego** (to jest sfery). Już po 27-krotnym spuchnięciu **wykrycie krzywizny w obserwowalnym obszarze AB** ($AB/2 = ct$) byłoby trudne. Staje się **zupełnie niemożliwe** po spuchnięciu 10^{28} - krotnym (co najmniej) wywołanym przez inflację.

Wniosek: inflacja **każdy** wszechświat (obserwowalny) **zamienia na płaski**. To zaś ($k = 0$) oznacza że już na stałe **musi być** **$\Omega = 1.0$** (czyli $\rho = \rho_{KR}$) !!

Pomiarowy CLOS: FAKTYCZNA GĘSTOŚĆ („ilość we wszechświecie”) CIEMNEJ MATERII (MASY) Ω_{DM}

- * Inflacja **musi** produkować wszechświat $k = 0$ czyli $\Omega = 1.0$
- * Tymczasem nowe źródła pomiarów (począwszy od r.1985; struktury, symulacje komputerowe) doprowadziły do rezultatu

$$\Omega_{DM} = 0.30 ! \text{ (aż i tylko)}$$

- * Wniosek I : **Ciemna materia** (masa) radykalnie **dominuje** nad świecą (wobec $\Omega_L = 0.01$, $\Omega_{BAR} = 0.04$)
- * Wniosek II : Ponieważ jednak ciemna materia (masa) **nie** występuje w ilościach dających $\Omega_{DM} = 0.99$ to

inflacji nie było ???

Teoretycy: niemożliwe!

(zbyt straszne)

Pomiarowcy: płaczcie sobie

I w kosmologii nastąpiły lata zamętu i nerwów, bezowocnych prób wyjaśniania..

LAUREACI NAGRODY NOBLA za rok 2011

(Supernowe Ia $\rightarrow$ Ciemna energia wszechświata)



1998: Dwa zespoły obserwatorów oddalonych Supernowych Ia, kierowane przez **Saula Perlmuttera** (z lewej) i **Briana Schmidta** (z prawej) odkryły **przyspieszanie** ekspansji wszechświata, co oznacza też wykrycie **Ciemnej Energii**

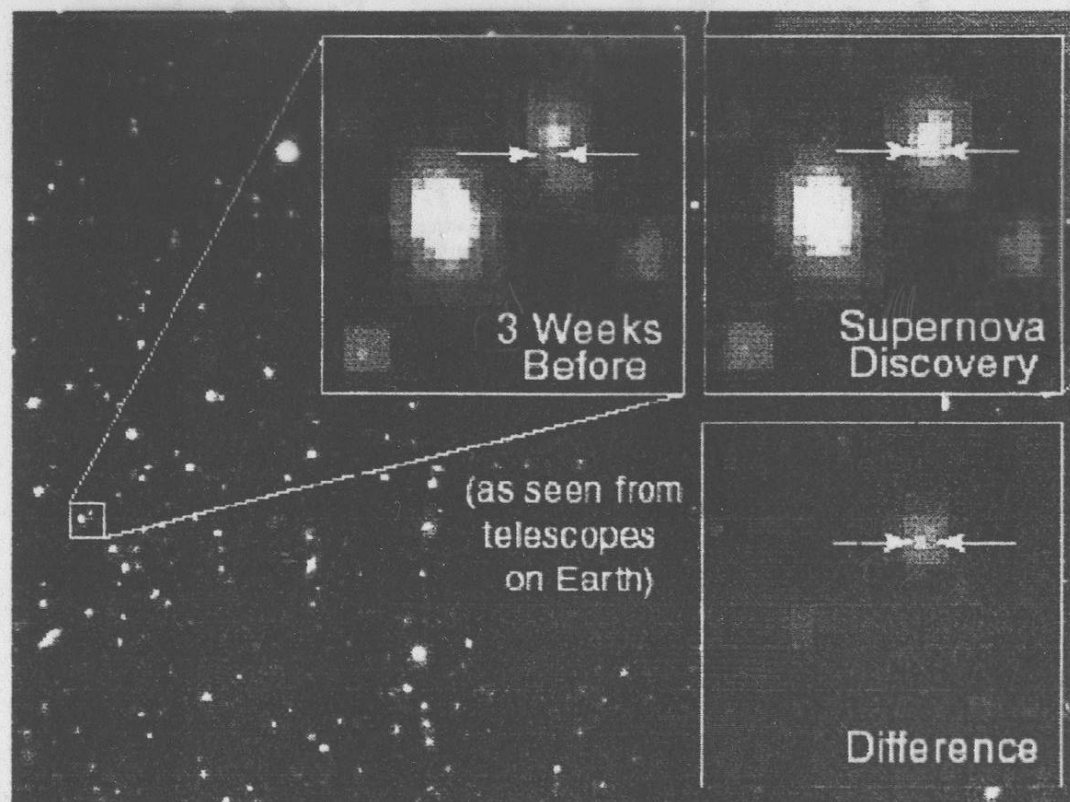
Adam Riess odkrył, że **przejście** od fazy hamowania do obecnej fazy przyspieszania nastąpiło ok 4 mld lat temu

SUPERNOWE Ia – CEL I METODA POMIARÓW

1. Cel pierwotny: pomiar Ω_{MAT} metodą „nie wprost”
2. Sposób: im gęstość materii Ω_{MAT} jest większa tym hamowanie grawitacyjne jest większe a więc odległości r galaktyk od nas stają się mniejsze.
Zatem dokładny pomiar odległości r wyznaczy stopień hamowania grawitacyjnego (parametr deceleracji q) i wartość Ω_{MAT}
3. Metoda: Świece standardowe (identyczna moc świecenia L) jako indykatory odległości

$$j = \frac{L}{4\pi r^2} \quad \rightarrow \quad \frac{j_2}{j_1} = \left(\frac{r_2}{r_1} \right)^2$$

Supernowe Ia okazują się idealnymi (niemal) świecami standardowymi, toteż pomiary ich jasności (obserwowanych !) j wyznaczają dokładne odległości r do galaktyk w których wybuchają.



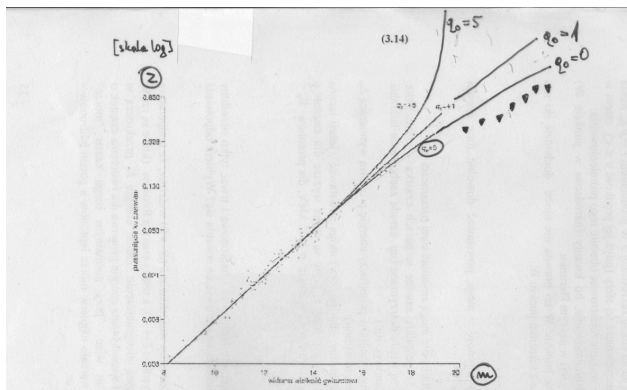
Rysunek 30: *Sposób na wykrycie supernowej. Komputer dokonuje odjęcia dwóch zdjęć tego samego obszaru nieba, wykonanych w pewnym odstępie czasu, w poszukiwaniu zmian. Nie zawsze pozytywny wynik oznacza odkrycie supernowej typu Ia. Dlatego wymagana jest dodatkowa analiza, która pozwoli stwierdzić czy wykryty obiekt jest faktycznie supernową.*

SUPERNOWE Ia – REZULTATY POMIAROWE (r.1998)

1. Pomiarowy szok

Galaktyki (z Supernowymi Ia) leżą **znacząco dalej** niż oczekujemy z obliczeń. Leżą dalej niż „powinny” nawet gdy założymy zupełny **brak** hamowania !

2. Bardziej „specjalistycznie” pokazuje to rysunek



Wobec $\Omega_{MAT} = 2q$ i postulowanej wartości $\Omega_{MAT} = 0.30$ można by oczekiwać $q = 0.15$.

Tymczasem:

1. Każda z Supernowych (o danym **z**) leży **dalej** (większe **m**) niż przy powyższym q
2. Ich wartości q są **ujemne (!)** czyli podlegały **akceleracji** rozszerzania.

Wniosek główny: Obok hamowania grawitacyjnego istnieje **dominujący** je (w obecnej fazie) tajemniczy **czynnik przyspieszający** rozszerzanie.

Czy kosmologia zna taki czynnik?

SUPERNOWE Ia – SENS REZULTATÓW POMIAROWYCH

„Dwoista” rola Λ

1. I-sze równanie Friedmanna – Lemaitre’a (z OTW)



Akcelerację powoduje **czynniki** Λ ; przy tym $a_{\Lambda} = +\Lambda r$ (Λ jest liczbą małą)

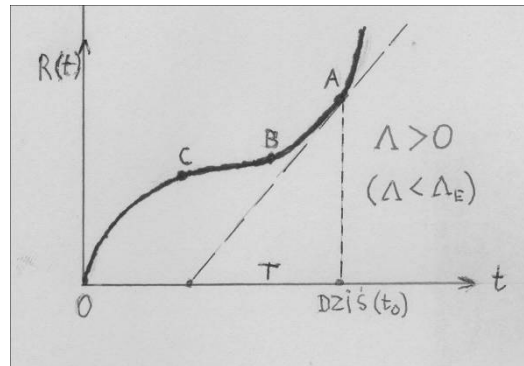
2. Ponieważ $a_{\text{grav}} \sim \frac{1}{r^2}$ zaś $a_{\Lambda} \sim \Lambda r$ to

1° przy małych odległościach $r \rightarrow$ hamowanie $\gg$ przyspieszanie

2° **dużych** $\rightarrow$ hamowanie $\ll$ **przyspieszanie**

Stąd wynika **model**

Lemaitre’a (~1925 r.!)



3. Pomiar Sup. Ia wskazują (sytuacja 2°) że **DZIŚ jest w punkcie A**

Rozwiązuje to „przy okazji” **problem wieku** ! (teraz $t > T$)

4. A.Riess potwierdził **obserwacyjnie** że w **odległej** przeszłości (punkt C) wszechświat **decelerował**. W punkcie B był około 4 miliardy lat temu.

SUPERNOWE Ia - SENS REZULTATÓW POMIAROWYCH cd.

„Dwoista” rola Λ

II-gie równanie Friedmanna – Lemaitre’a (OTW)

Obecność Λ ujawnia się w istnieniu **dodatkowej energii** wszechświata (nie związanej z masą) o gęstości

$$\Omega_{\Lambda} = \frac{\Lambda c^2}{3H^2}$$

Zatem stwierdzenie **akceleracji** jest zarazem stwierdzeniem **istnienia** („antygravitacyjnej”) **CIEMNEJ ENERGII** - o zupełnie **nieznanej** naturze.

Tak więc: $\Omega_{TOT} = \Omega_{MAT} + \Omega_{\Lambda}$

Kwestia: ile wynosi Ω_{Λ} ?

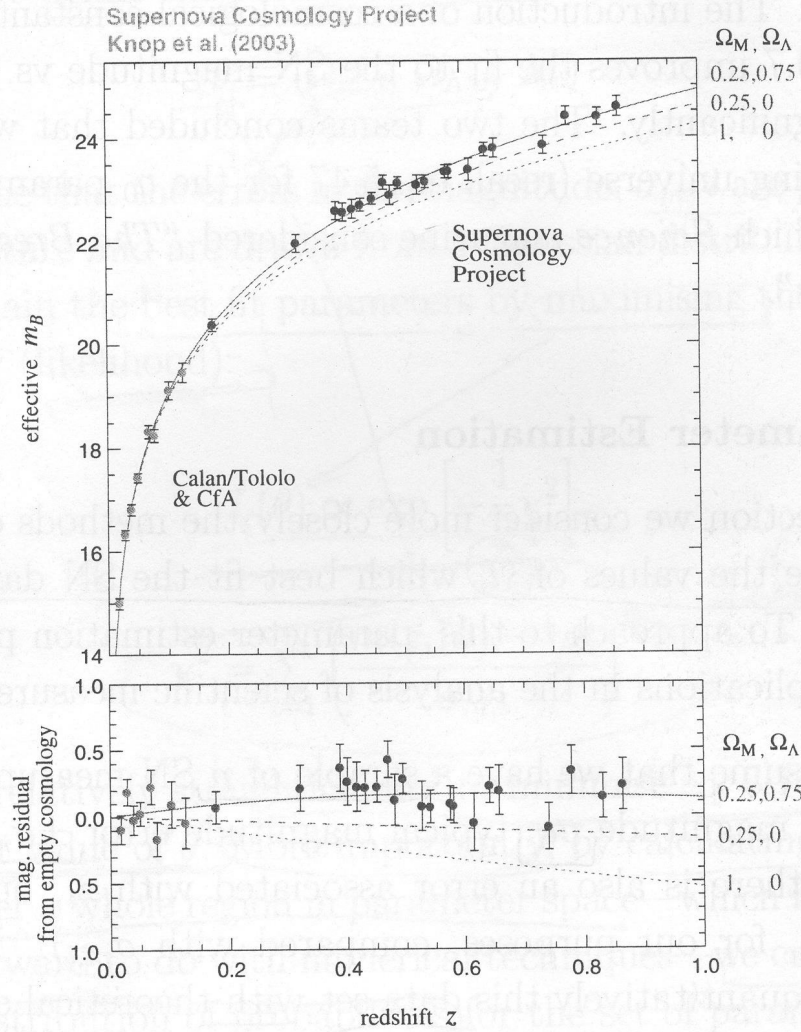
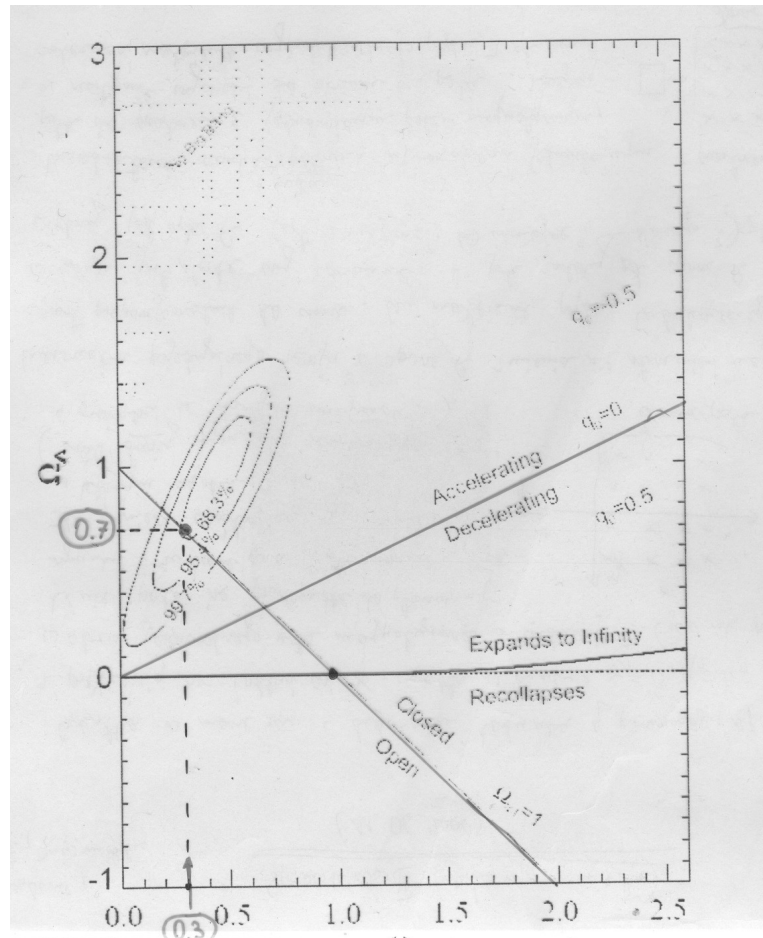


Figure 6.8: Hubble diagram for SNaI of type Ia up to $z = 0.86$, reproduced from Knop et al. 2003, ApJ, 598, 102. The observed B -band magnitudes of the SNaI at maximum light are compared with the predictions for three cosmological models, as indicated. The lower panel shows the difference relative to an empty universe with $\Omega_{m,0} = \Omega_{\Lambda,0} = 0$ and $\Omega_{k,0} = 1$.

SupCosPro oraz H'z'SupTeam (r.1998) - CIEMNA ENERGIA WSZECHŚWIATA

Wyniki analizy pomiarów



Pomiarowe elipsy wskazują, że w naszym obecnym wszechświecie

1. Następuje **przyspieszanie** rozszerzania (**akceleracja**, $q < 0$)

2. Istnieje **ciemna energia** (nie zamienialna na masę) w ilościach **dominujących** wszelką materię (masę) – czyli $\Omega_A > \Omega_{MAT}$

3. Zarówno teza o **inflacji**

(wymagająca $\Omega_{TOT} = 1$)

jak i zmierzona $\Omega_{MAT} = 0.3$ stają się **zgodne** z elipsami pomiarowymi. Po przyjęciu powyższych wartości pomiary ujawniają że

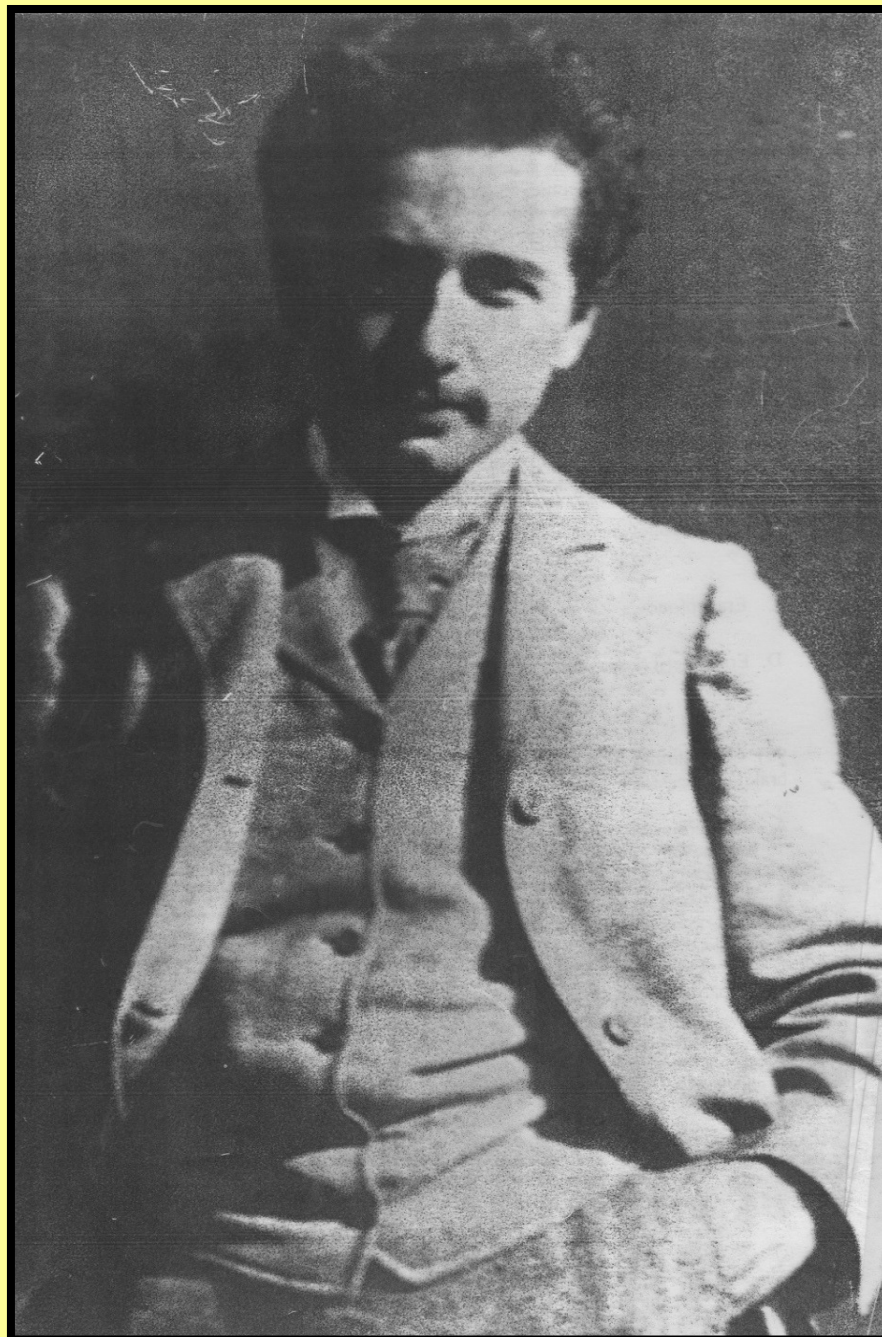
$$\Omega_A = 0.7 \quad \text{czyli}$$

ciemna energia dominuje wszechświat

**Ta równość cudownej zgodności
określa nasz wszechświat**

$$0.30 + 0.70 = 1.0 \quad !$$

$$\Omega_{MATTER} + \Omega_{DARK ENERGY} = \Omega_{TOTAL}$$



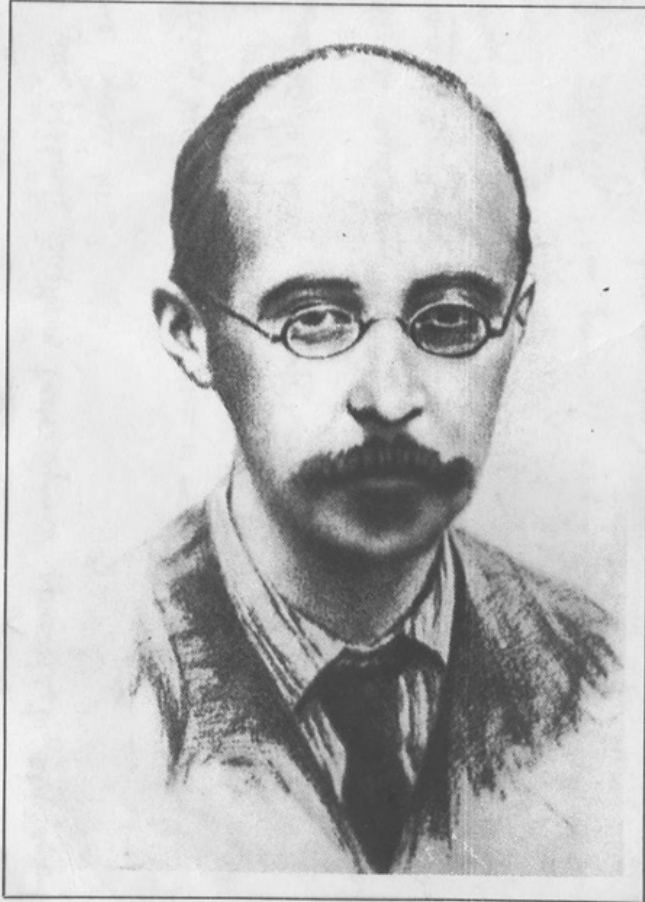
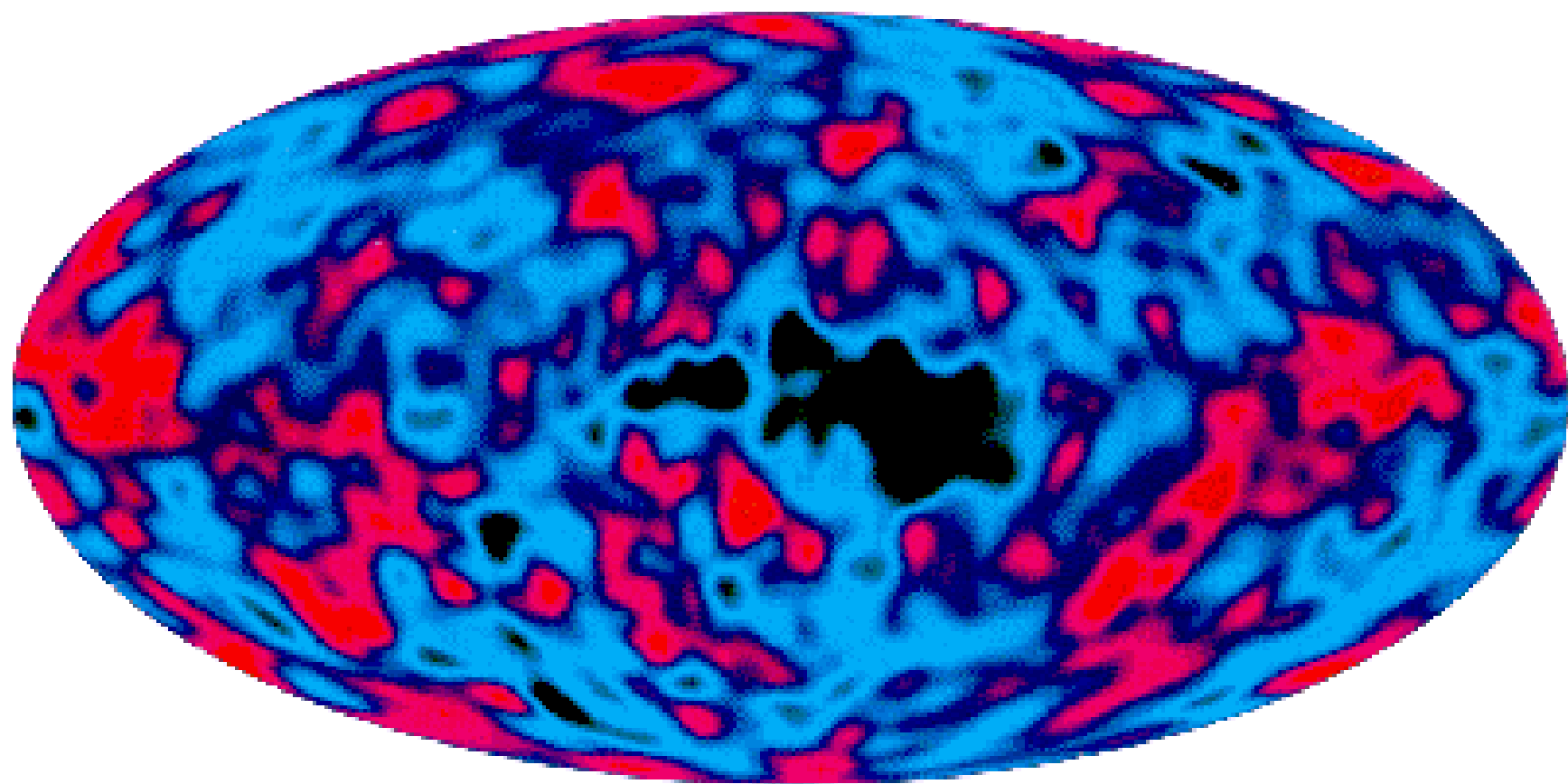


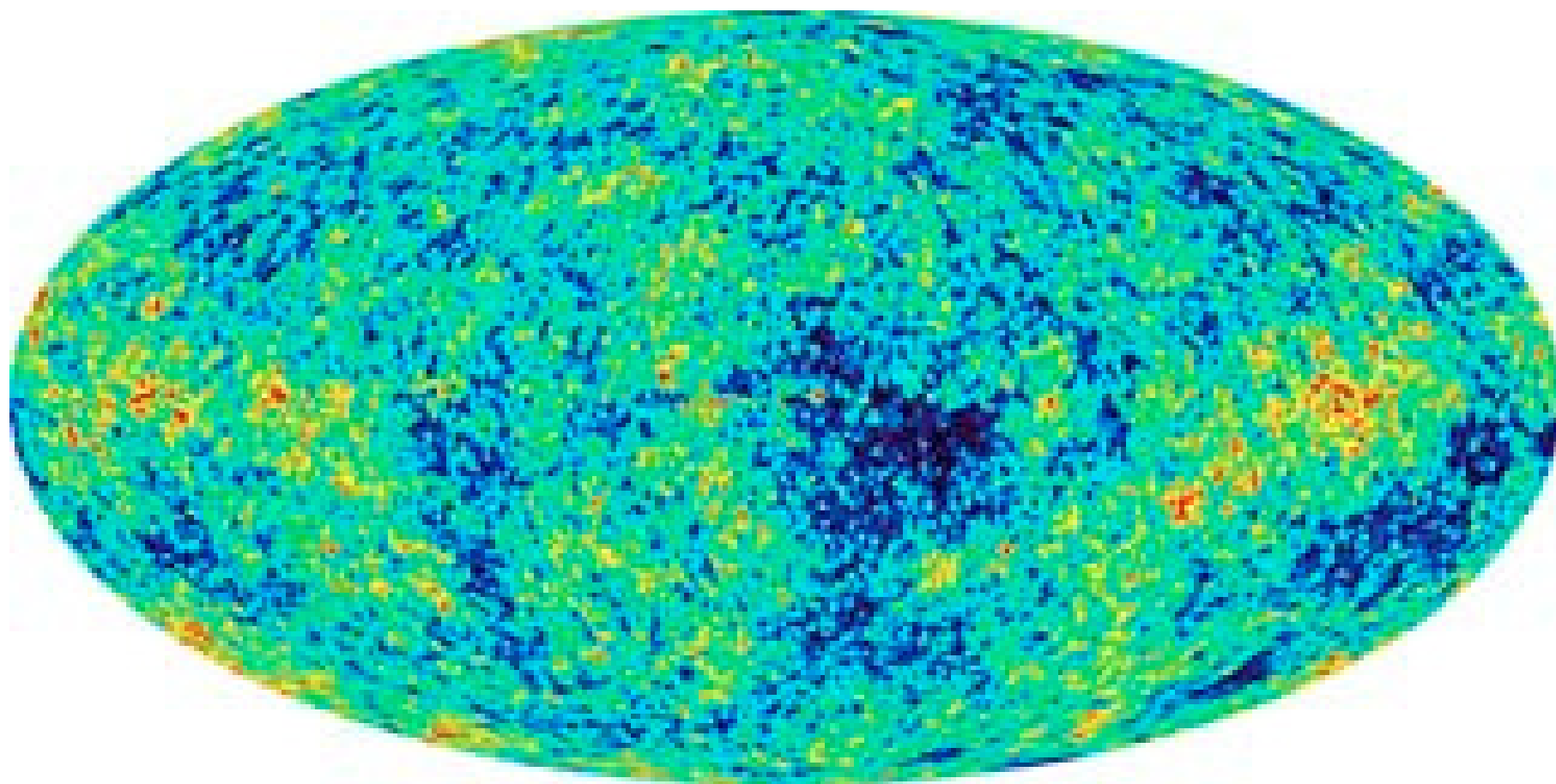
Figure 2.8
ALEXANDER FRIEDMANN (1888–1925)



Figure 2.9
GEORGES LEMAÎTRE (1894–1966)







Obszary największych odchyłeń zajmują na niebie około 10 łuku (2 średnice Księżyca) w momencie rekombinacji obszary te miały rozmiar około miliona lat świetlnych - teraz miliard lat świetlnych

