

# Wielki wybuch, ciemna materia a optyka morza: jak oceanografia może wspomóc kosmologię i fizykę cząstek elementarnych

Jacek Piskożub – wykład habilitacyjny

IOPAN, Sopot, 29 września 2005

# Plan wykładu

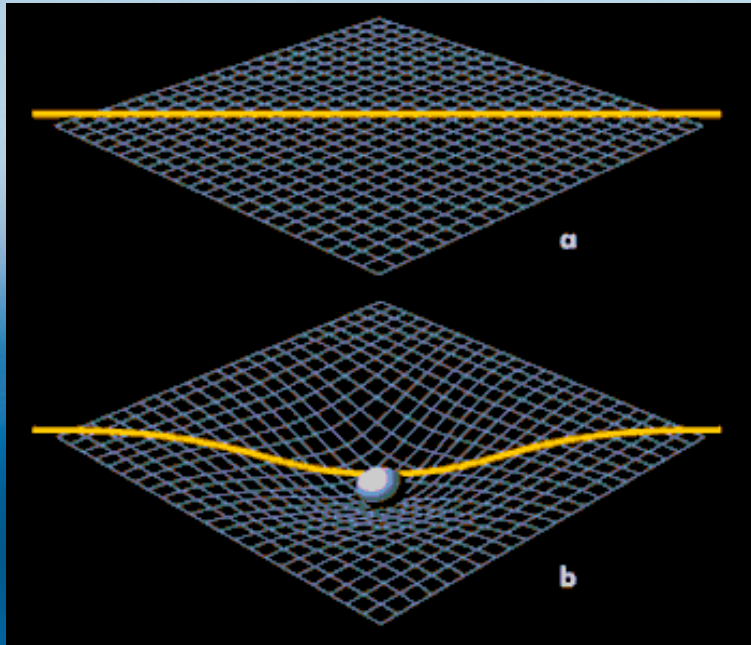
- **Dlaczego fizycy sądzą, że czegoś im brakuje?**
- **Czego im brakuje?**
- **Jak i gdzie tego szukać?**
- **Dlaczego akurat w oceanie?**
- **Co już zrobiono i jakie są plany?**

# Wielki Wybuch

## Historia odkrycia:

- 1924: odkrycie galaktyk (Edwin Hubble)
- 1927: Georges Lemaitre: “eksplozja pierwotnego atomu”
- 1929: prawo Hubble’a: “ucieczka galaktyk”
- 1949: Fred Hoyle: nazwa
- 1965: Penzias i Wilson: promieniowanie tła

# Ogólna Teoria Względności



$$G_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = 8\pi G T_{\mu\nu}$$

- $G_{\mu\nu}$  – tensor Einsteina (ugięcia)
- $T_{\mu\nu}$  – tensor napięcia i energii
- $g_{\mu\nu}$  – tensor metryczny
- $\Lambda$  – stała kosmologiczna
- $G$  – stała grawitacji

- 1916: ogłoszenie Ogólnej Teorii Względności
- 1917: dodanie stałej kosmologicznej
- 1931: “największy błąd życia”



Albert Einstein

# Ogólna Teoria Względności

Rozwiązania:

Friedman (1922)

Lemaitre (1927)

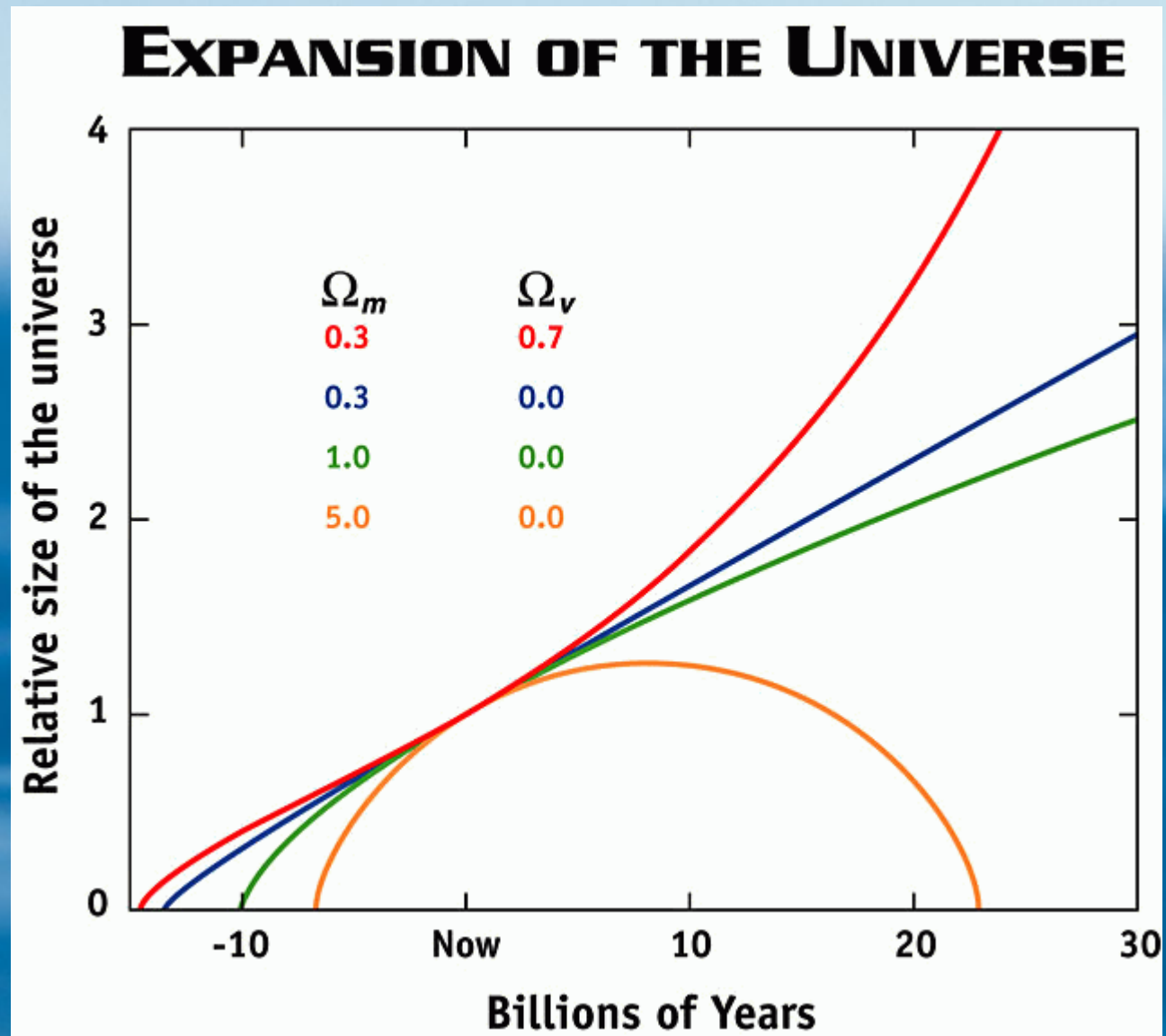
Rozwiązanie zależy od gęstości Wszechświata:

$$\Omega = \Omega_m + \Omega_v$$

$\Omega > 1$  geometria zamknięta

$\Omega < 1$  geometria otwarta

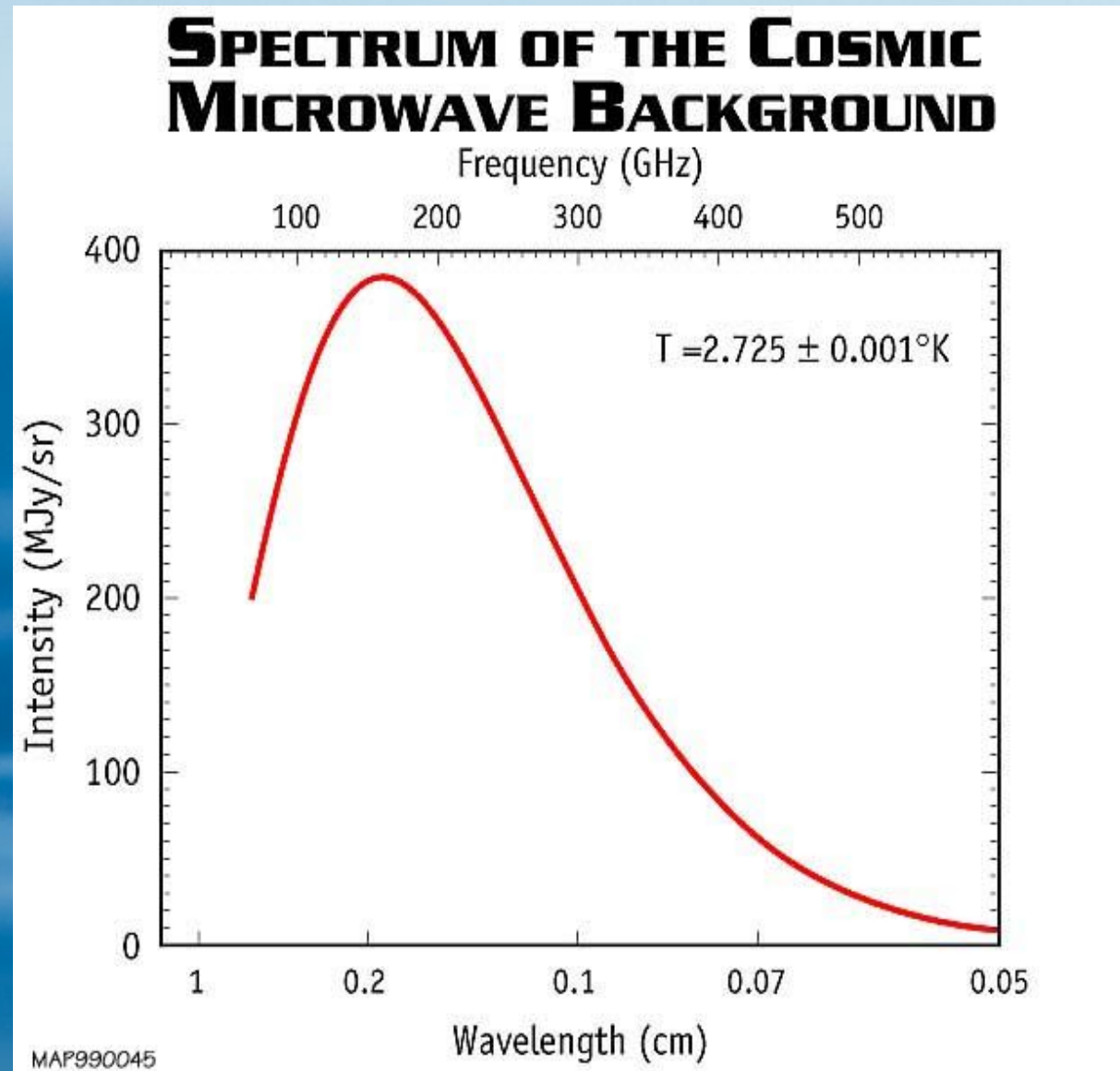
$\Omega = 1$  geometria płaska  
(euklidesowa)



Względna wielkość Wszechświata w funkcji czasu dla kilku wartości gęstości materii i stałej kosmologicznej (NASA 1999)

# Promieniowanie tła

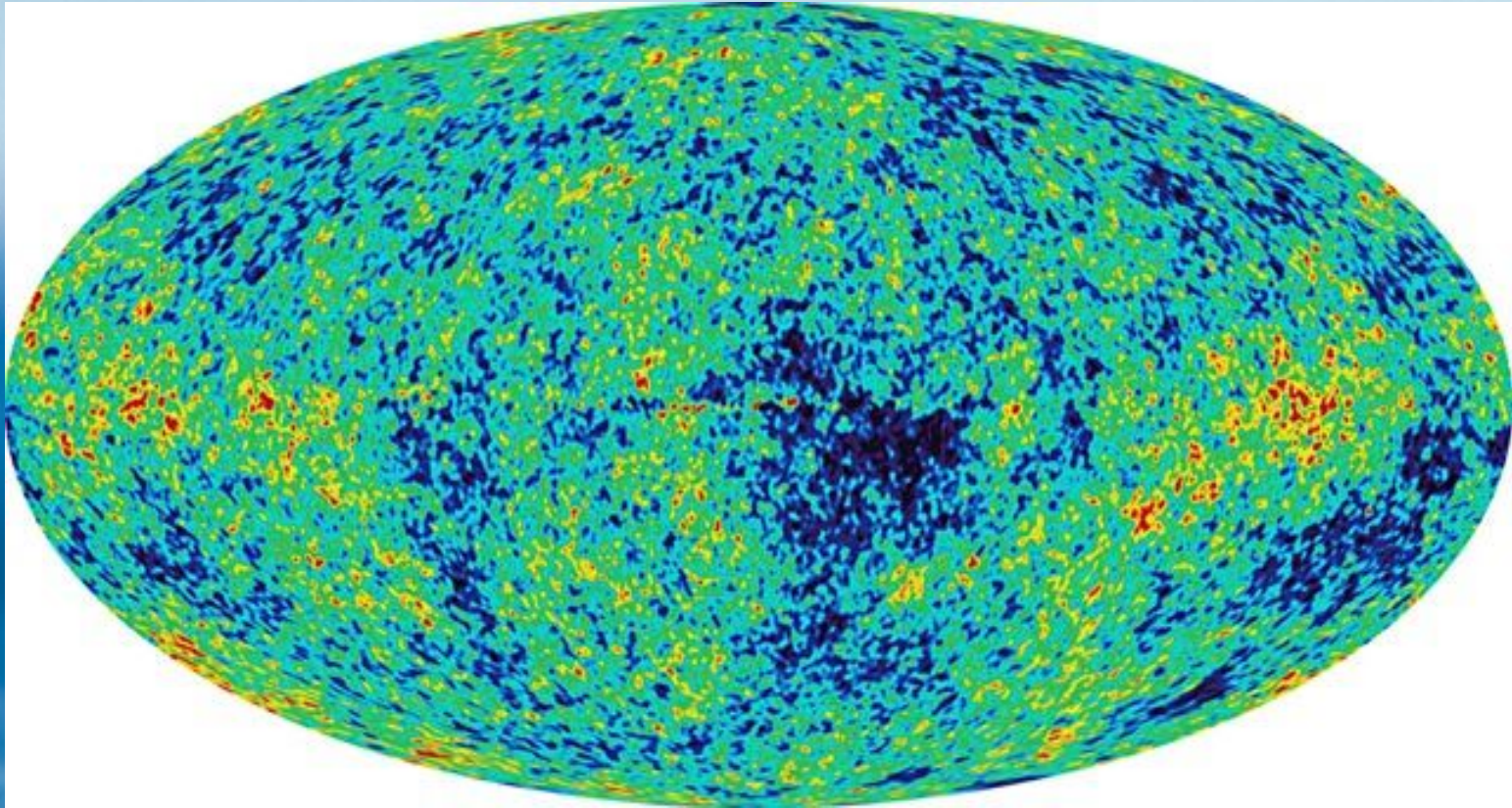
- 1965: Penzias i Wilson odkrywają mikrofalowe promieniowanie tła
- 1992: Cosmic Background Explorer (COBE)
- 2003: Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP)



Przebieg spektralny promieniowania tła na podstawie danych czujnika FIRAS misji COBE (NASA 1999)

# Promieniowanie tła, c.d.

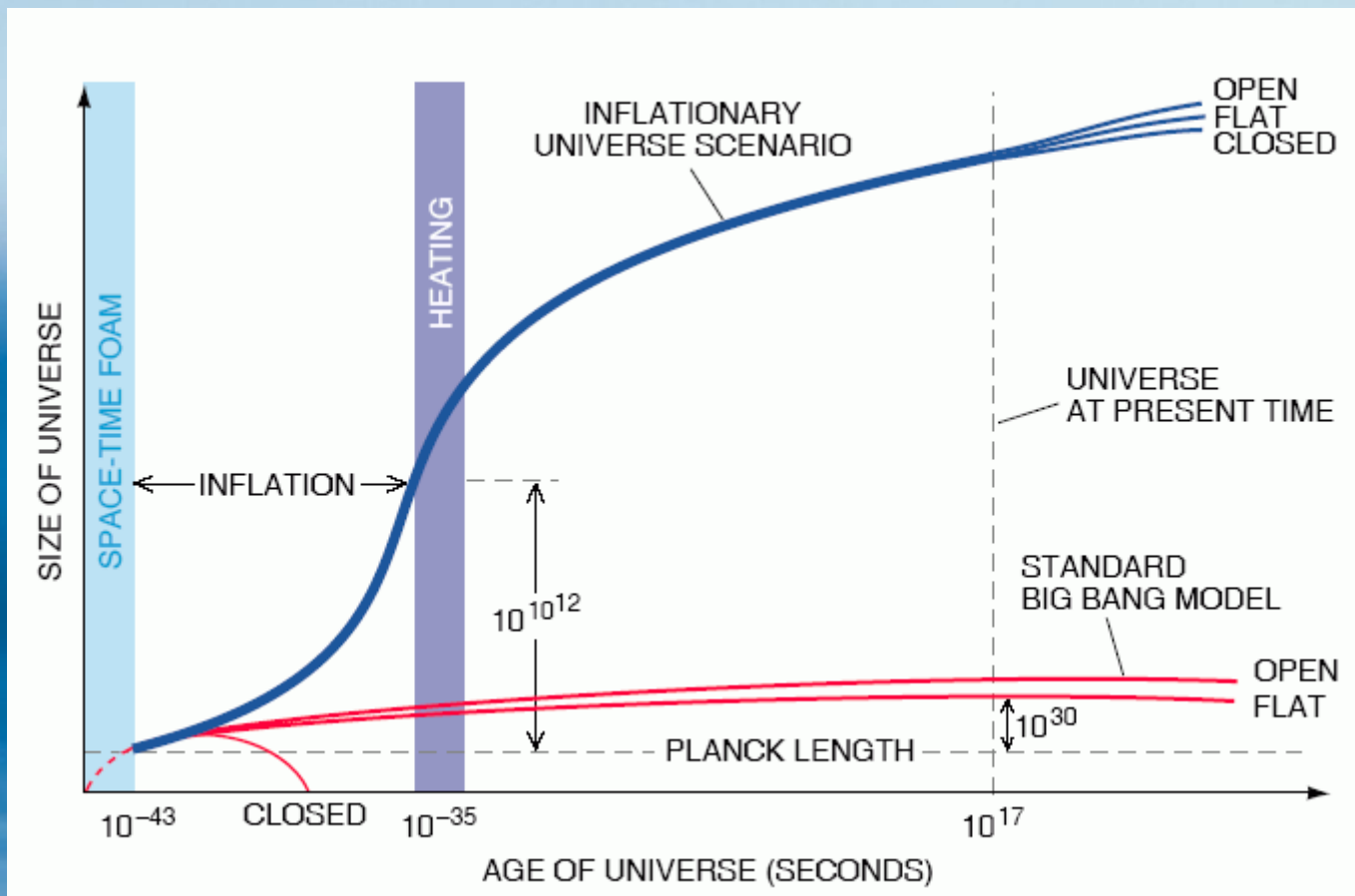
Dlaczego aż tak ( $10^{-5}$ ) izotropowe?



Mapa anizotropii promieniowania tła zarejestrowanego  
przez misję WMAP (NASA, 2003)

Wyniki misji WMAP wskazują na płaską geometrię  
Wszechświata ( $\Omega = 1.02 \pm 0.02$ )  
(*Benett C.L. et al. 2003, Spergel et al. 2003*)

# Kosmiczna inflacja



Wszechświat inflacyjny (*Linde, 1994, Sci. Am., 271 (5), 48-55*)

Płaski i izotropowy Wszechświat da się wyjaśnić eksponencjalnym (wykładniczym) wzrostem jego rozmiarów w ciągu pierwszych  $10^{-35}$  s po Wielkim Wybuchu (*Guth A.H., 1981; Linde A., 1982*)

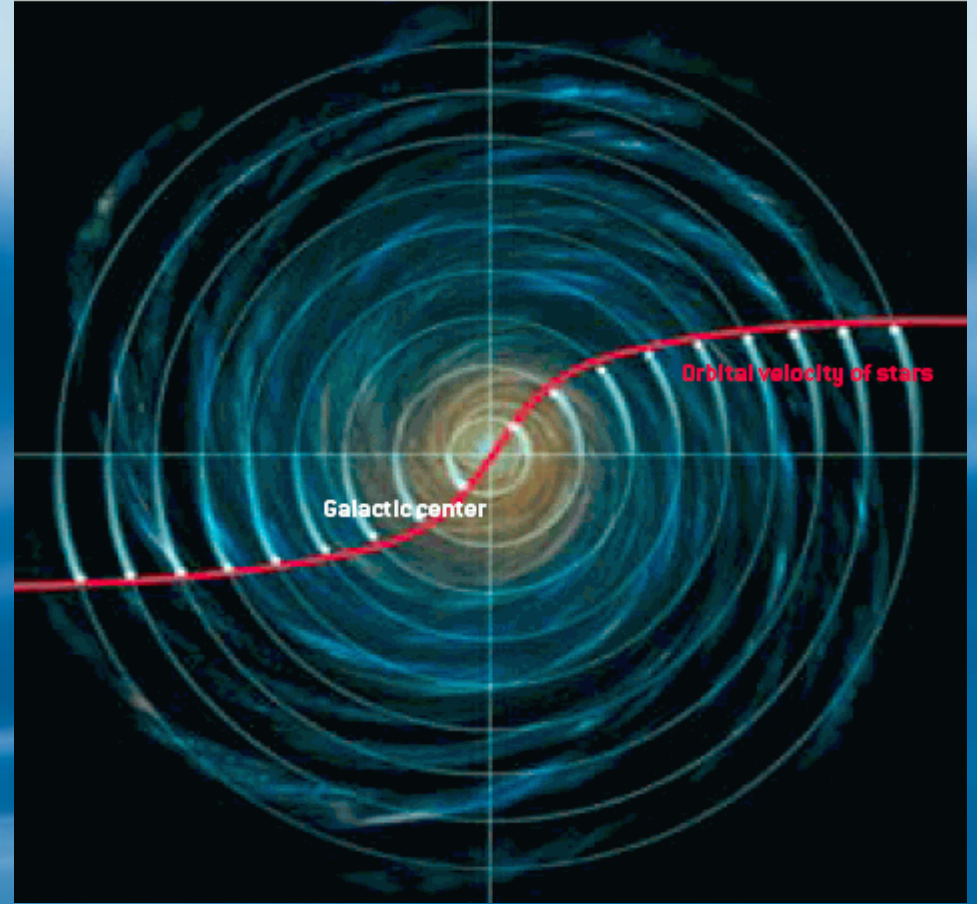


# Problem ramion galaktyk

Dlaczego galaktyki obracają się jak bryły sztywne?



Galaktyka spiralna M74 (*HST*)

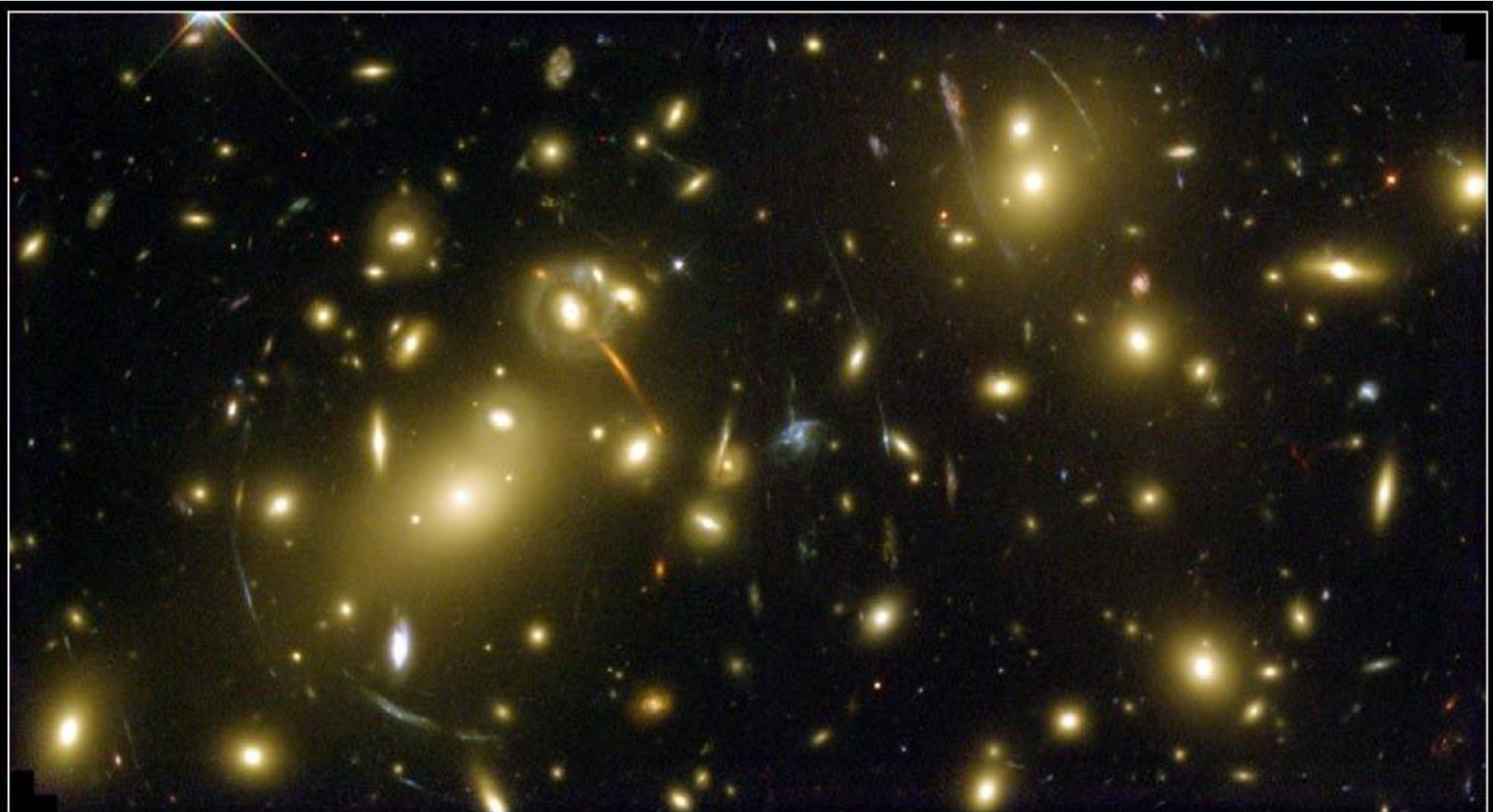


Prędkość orbitalna gwiazd w galaktyce  
(*Milgrom M., 2002, Sci. Am. 287 (2) 42-50*)

**Wniosek:** większość masy galaktyki (do 90%) stanowi kulę substancji nie oddziałującej z widzialną materią (*Ruben V. et al, 1985*)

# Gdzie jest brakująca masa?

Wyniki zliczania masy Wszechświata



**Galaxy Cluster Abell 2218**

**HST • WFPC2**

NASA, A. Fruchter and the ERO Team (STScI) • STScI-PRC00-08

Wyniki pomiarów ruchu galaktyk w gromadach oraz modelowanie sugerują wartość  $\Omega_m \approx 0.3$

(*Eke V.R., Cole S. & Frenk C.S. 1996; Eke V.R. et al. 1998*)

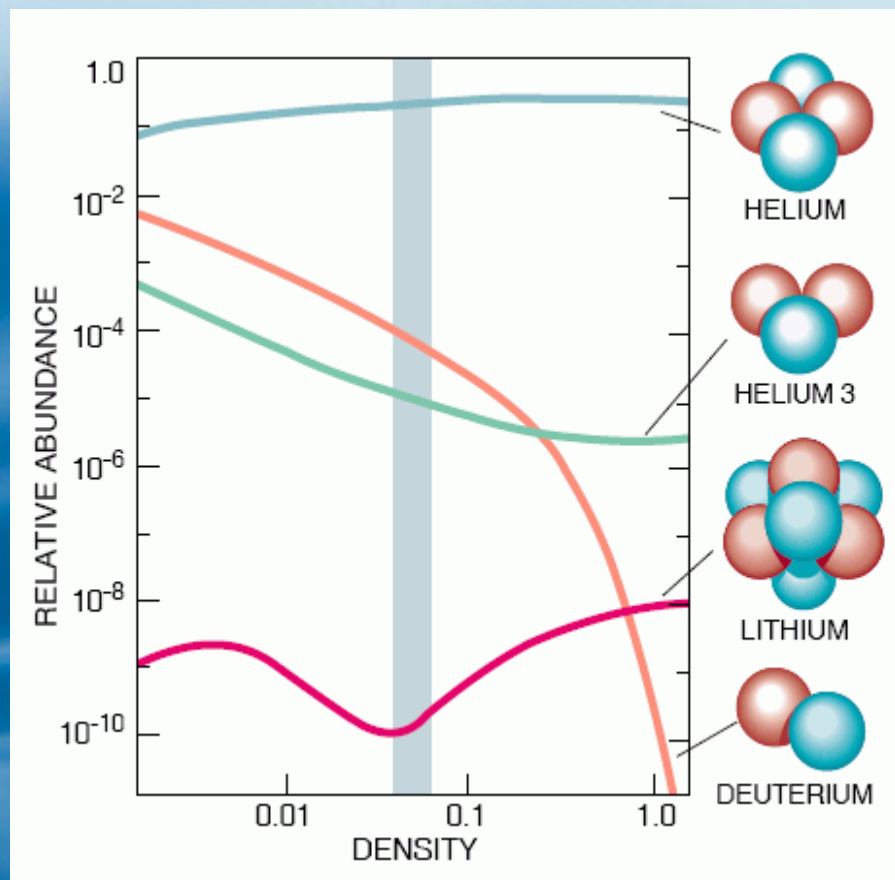
# Ile jest właściwie atomów?

## Teoria nukleosyntezy Wielkiego Wybuchu

Alpher, Bethe i Gamow zaproponowali w 1948 r. model tworzenia pierwiastków po Wielkim Wybuchu tłumaczący ich rozpowszechnienie we Wszechświecie.

Porównanie uaktualnionego modelu “ $\alpha\beta\gamma$ ” z danymi astronomicznymi sugeruje wartość dla materii barionowej (atomowej)  $\Omega_b = 0.04 \pm 0.01$

(*Schramm & Turner 1998*)



Peebles et al., 1994, *Sci. Am.*, 271 (4), 53-57 za Schramm & Turner 1998, *Rev. Mod. Phys* 70, 303



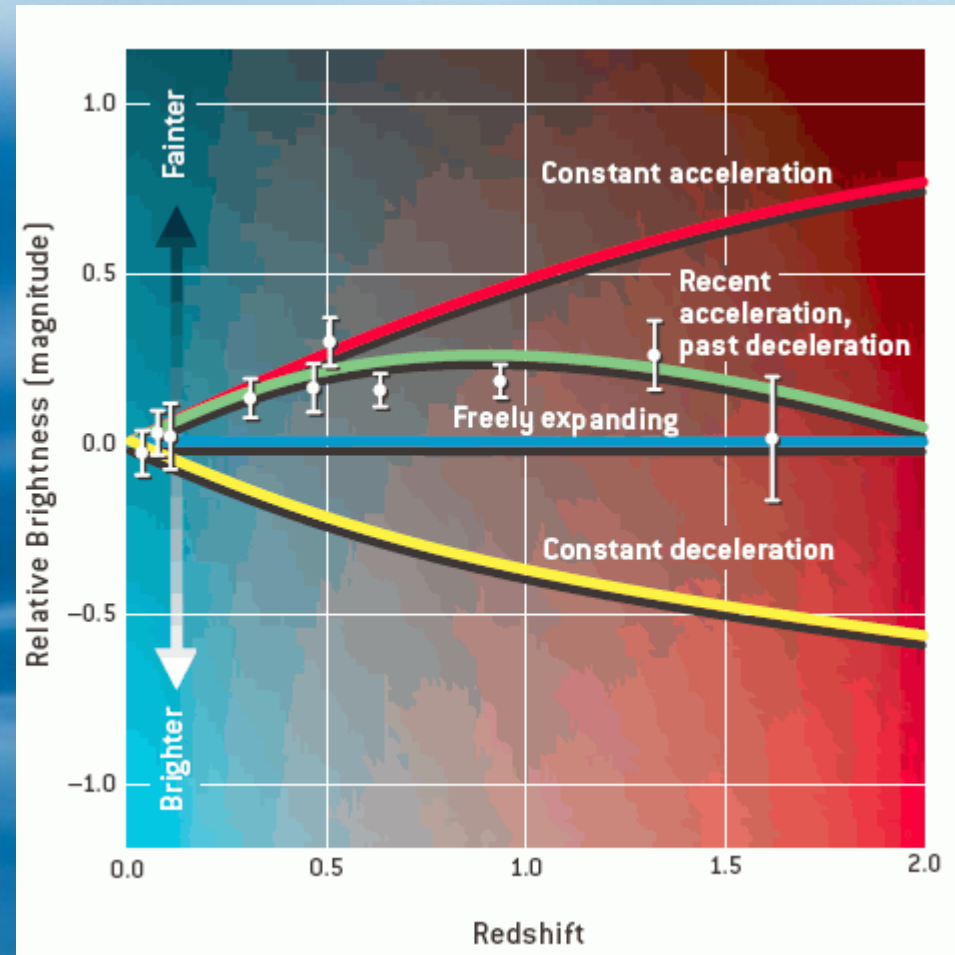
Supernowa w gromadzie galaktyk Virgo (Panna)

# Supernowe Ia

Standardowe świece kosmologii.

Wszystkie supernowe typu Ia mają jednakową jasność absolutną.

Pomiary jasności i odległości (widmo) supernowych pozwala na pomiar geometrii Wszechświata w funkcji czasu.



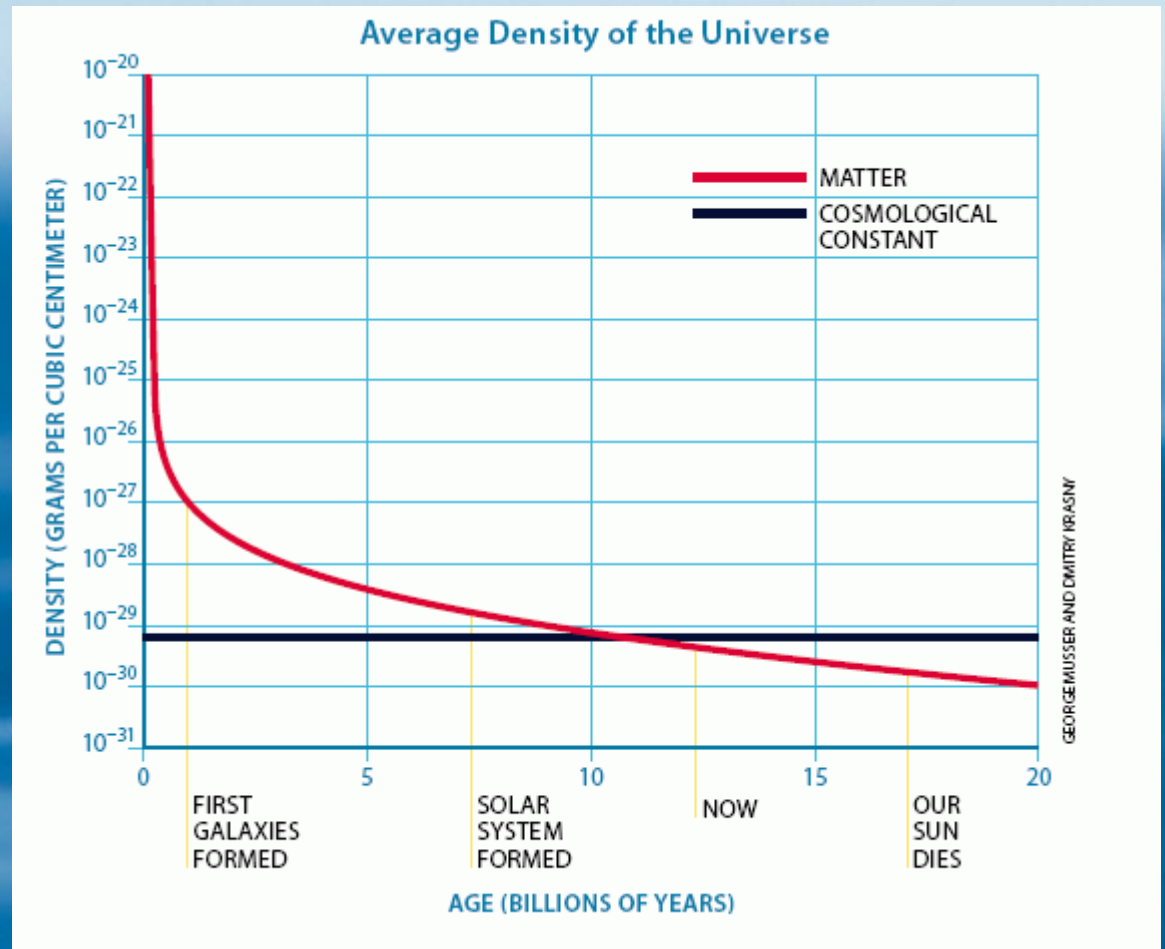
Riess A.G & Turner M.S., 2004, *Sci. Am.*, 290 (2), 62-67

# Supernowe, c.d.

Najpierw spowolnienie, potem przyśpieszenie

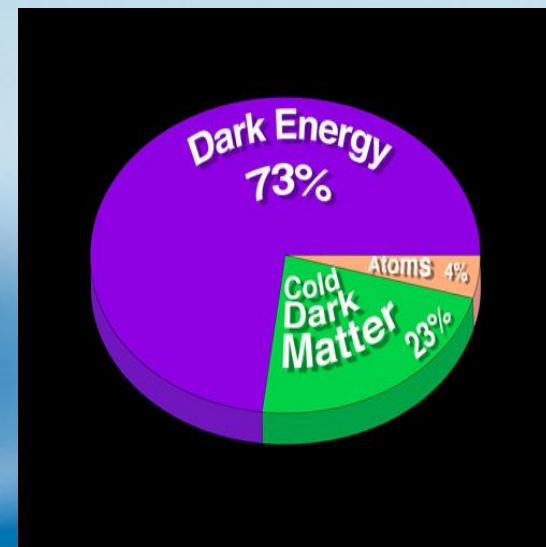
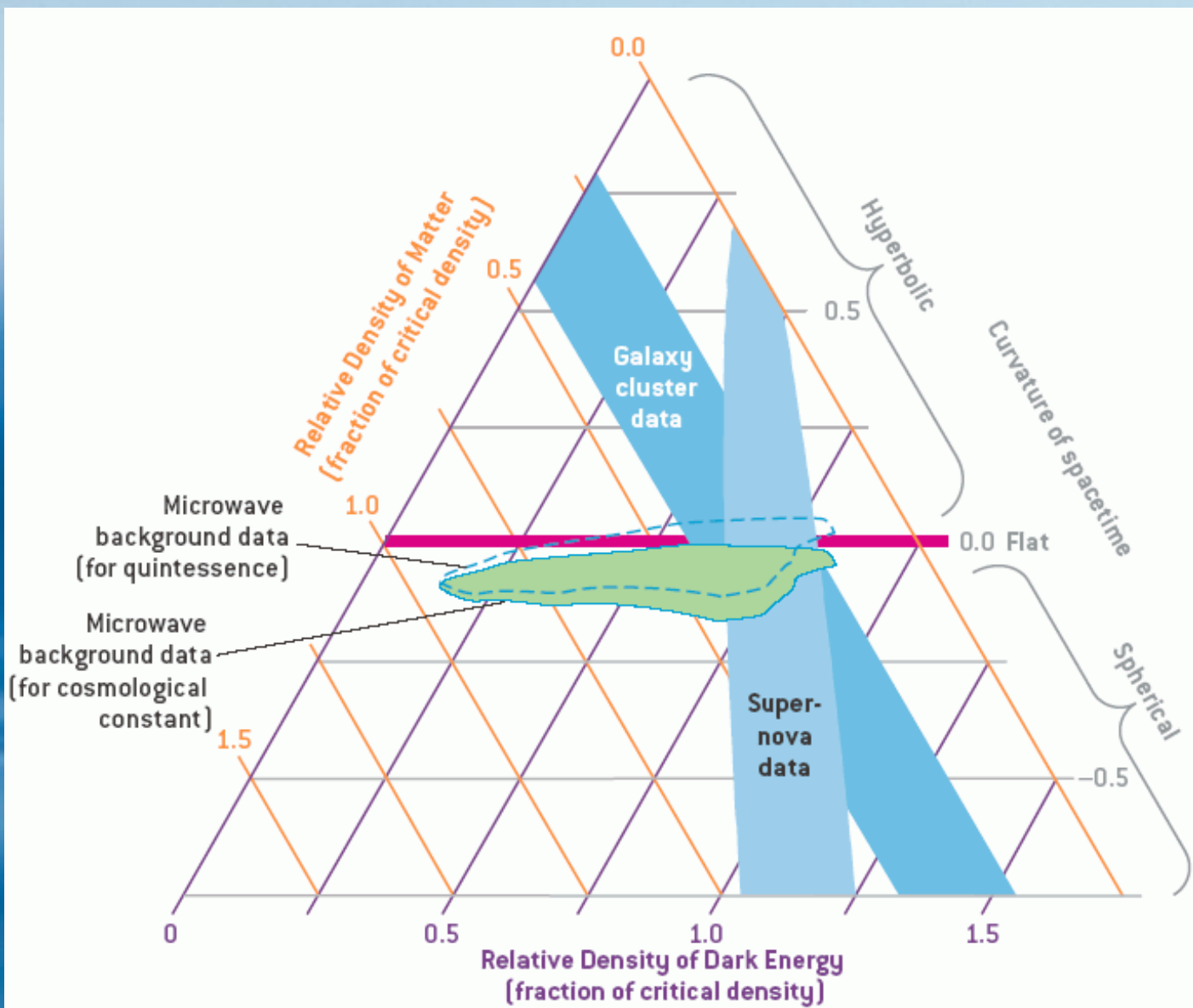
Wyniki obserwacji dalekich supernowych typu Ia dowodzą, że przez pierwsze 10 mld lat tempo rozszerzania Wszechświata malało. Od 5 mld lat stała kosmologiczna dominuje nad grawitacją: Wszechświat przyśpiesza!

$$\text{Współcześnie: } \Omega_m < \Omega_\Lambda$$



Średnia gęstość materii i “ciemnej energii” (stałej kosmologicznej) wyliczona z danych dla odległych supernowych Ia (*Krauss L.M., 1999, Sci. Am., 280 (1), 52-59*)

# Z czego zbudowany jest Wszechświat?



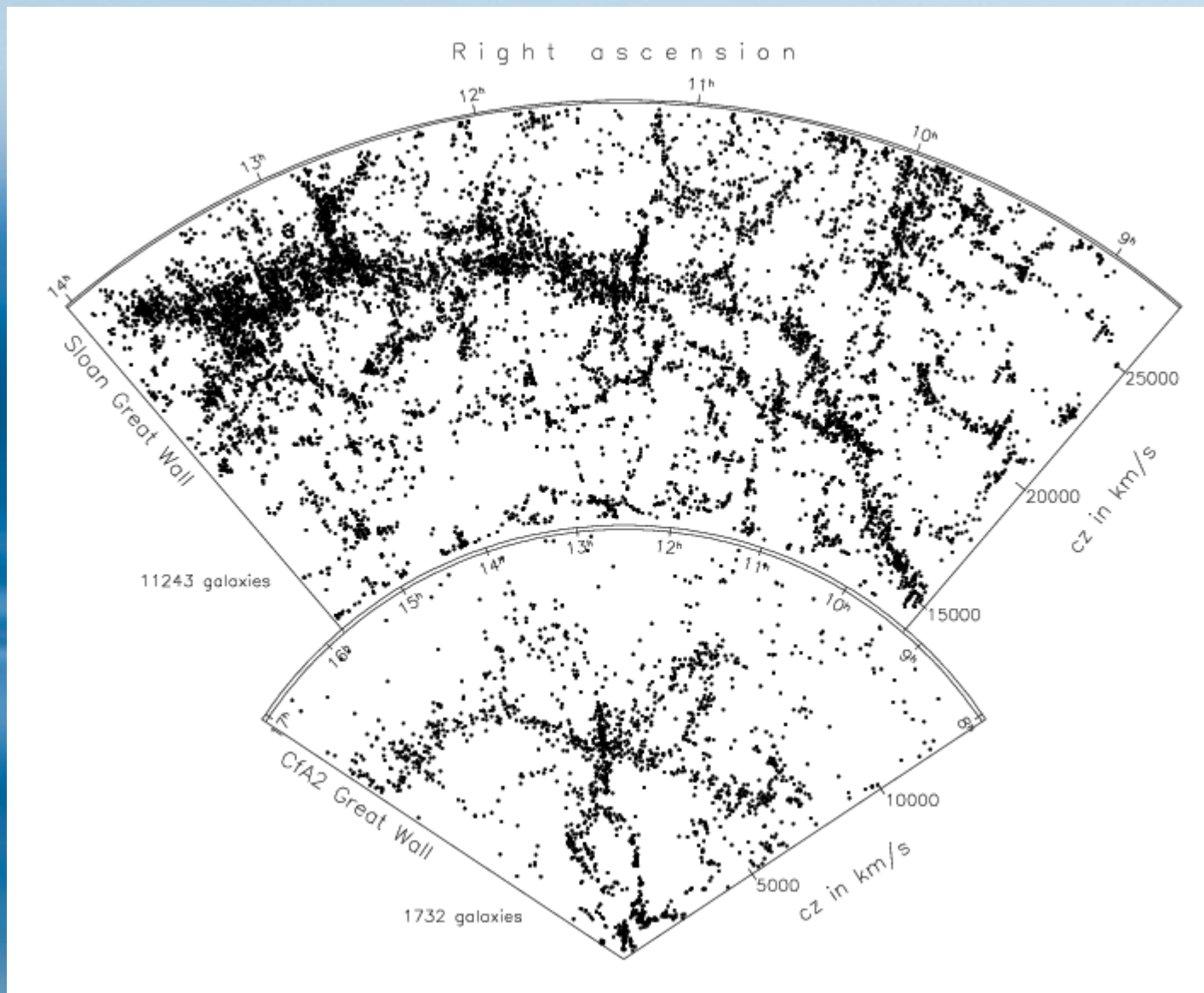
## Skład Wszechświata:

- 73% ciemna energia
- 23% ciemna materia
- 4% materia atomowa

Współczesne dane kosmologiczne prezentowane w przestrzeni  $\Omega_m$  i  $\Omega_\Lambda$   
(Ostriker JP, Steinhardt PJ, 2001, Sci. Am., 284 (1), 46-53)

# Czym jest ciemna materia?

Gorąca czy zimna?



Komputerowe modelowanie rozwoju Wszechświata pokazuje, że tylko zimna ( $v \ll c$ ) materia może utworzyć znaną z obserwacji wieloskalową strukturę.

Wielki Mur Sloan: największa znana struktura we Wszechświecie  
(Gott et al., 2005, *Astroph. J.*, 624 (2): 463-483)

# Czym jest ciemna materia?

MACHOs & WIMPs .



Gravitational Lens G2237+0305

Krzyż Einsteina: przykład  
soczewki grawitacyjnej  
(Odkrycie: *Schild R.E., 1996  
Astroph. J., 464 (1): 125-130*)

## Możliwości:

- gaz lub pył – byłby zauważalny
- **MACHOs** (*Massive Compact Halo Objects*) – nie świecące ciała wielkości pomiędzy planetą a gwiazdą
- **WIMPs** – (*Weakly Interacting Massive Particles*) – egzotyczne cząstki elementarne

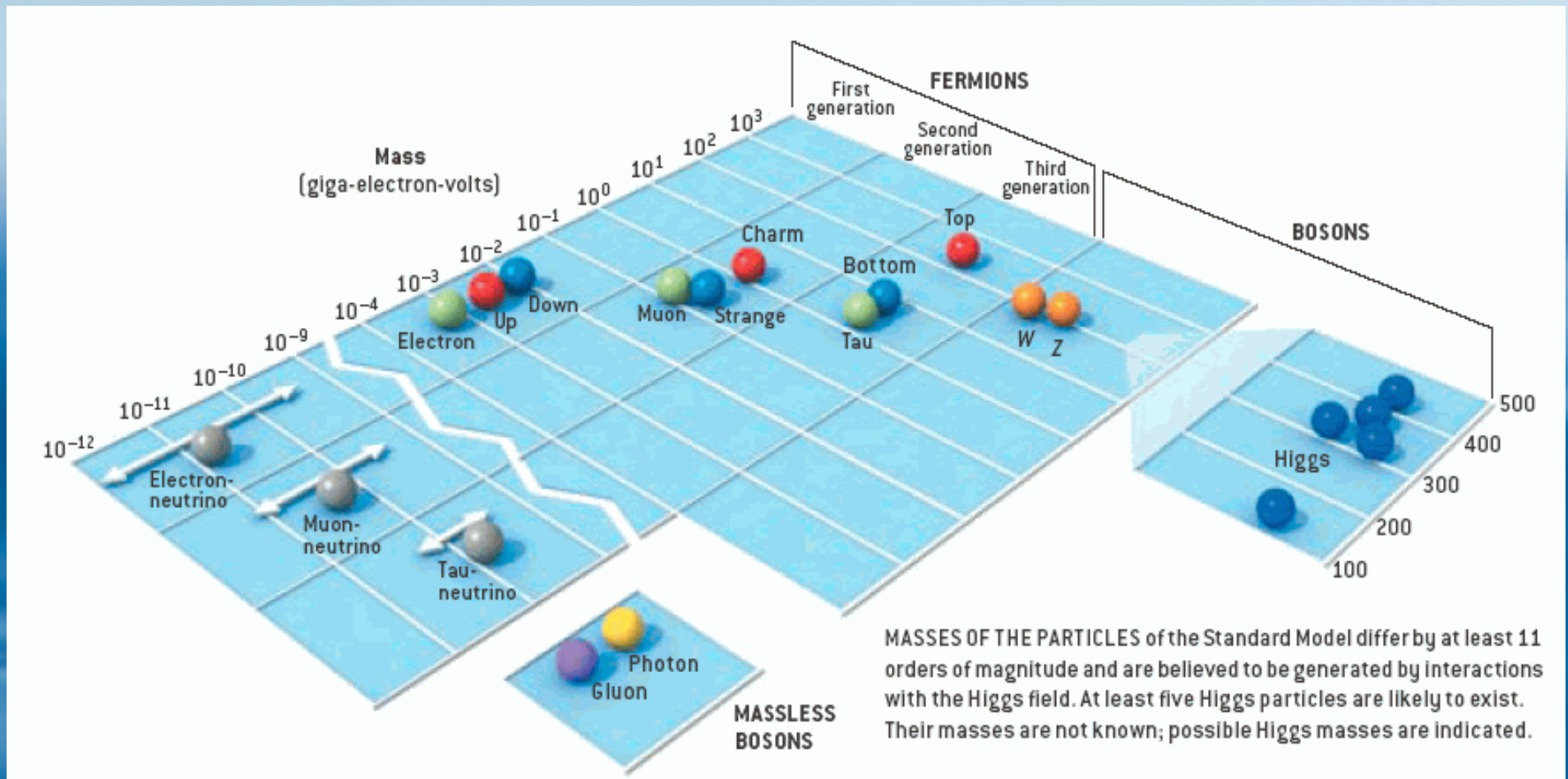
W 1985 r. Bohdan Paczyński zaproponował szukanie MACHOs za pomocą zliczania epizodów soczewkowania światła gwiazd.

Dotychczasowe badania wykazały, że MACHOs stanowią <10% ciemnej materii w Galaktyce.



# Cząstki elementarne

## Model standardowy

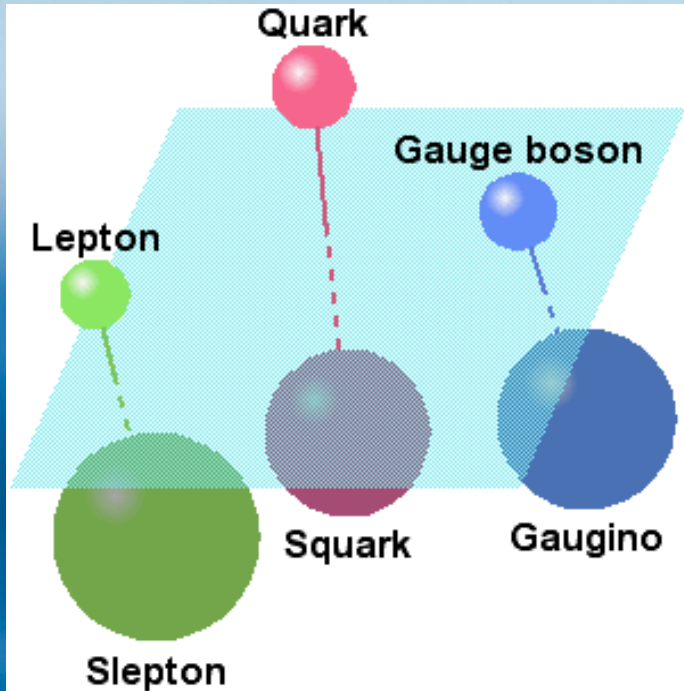


Źródło: G. Kane, 2005, Sci. Am., 293 (1), 40-48

Model standardowy przewiduje istnienie wszystkich znanych cząstek elementarnych (i kilku nieznanych). Nie uwzględnia grawitacji. Ma 19+10 swobodnych parametrów.

# Supersymetria

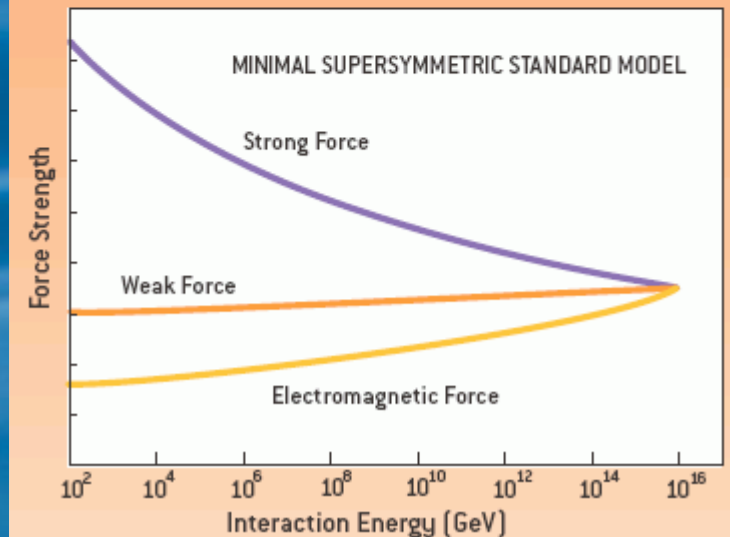
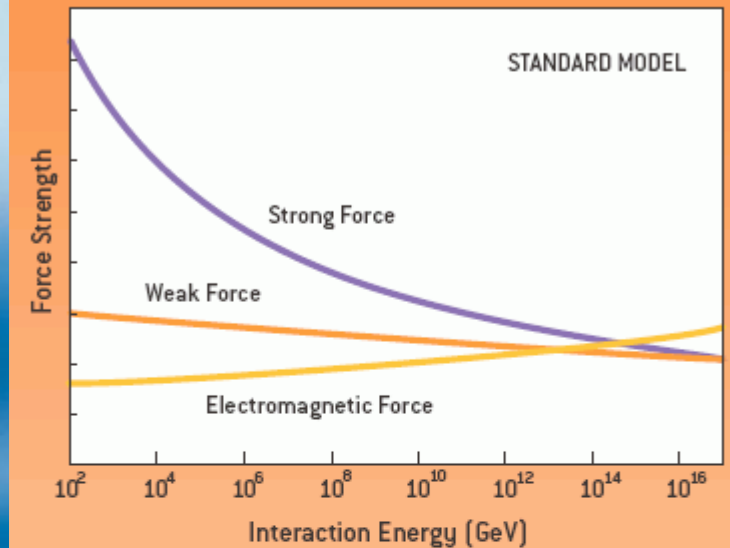
Dwa razy więcej cząstek



Wszystkie “klasyczne” cząstki mają swoich cięższych partnerów supersymetrycznych.

Kandydaci na WIMP: **fotino** (Goldberg 1983), **neutralino** (Ellis et al. 2003) (najłżejsza cząstka supersymetryczna).

## Evidence for Supersymmetry

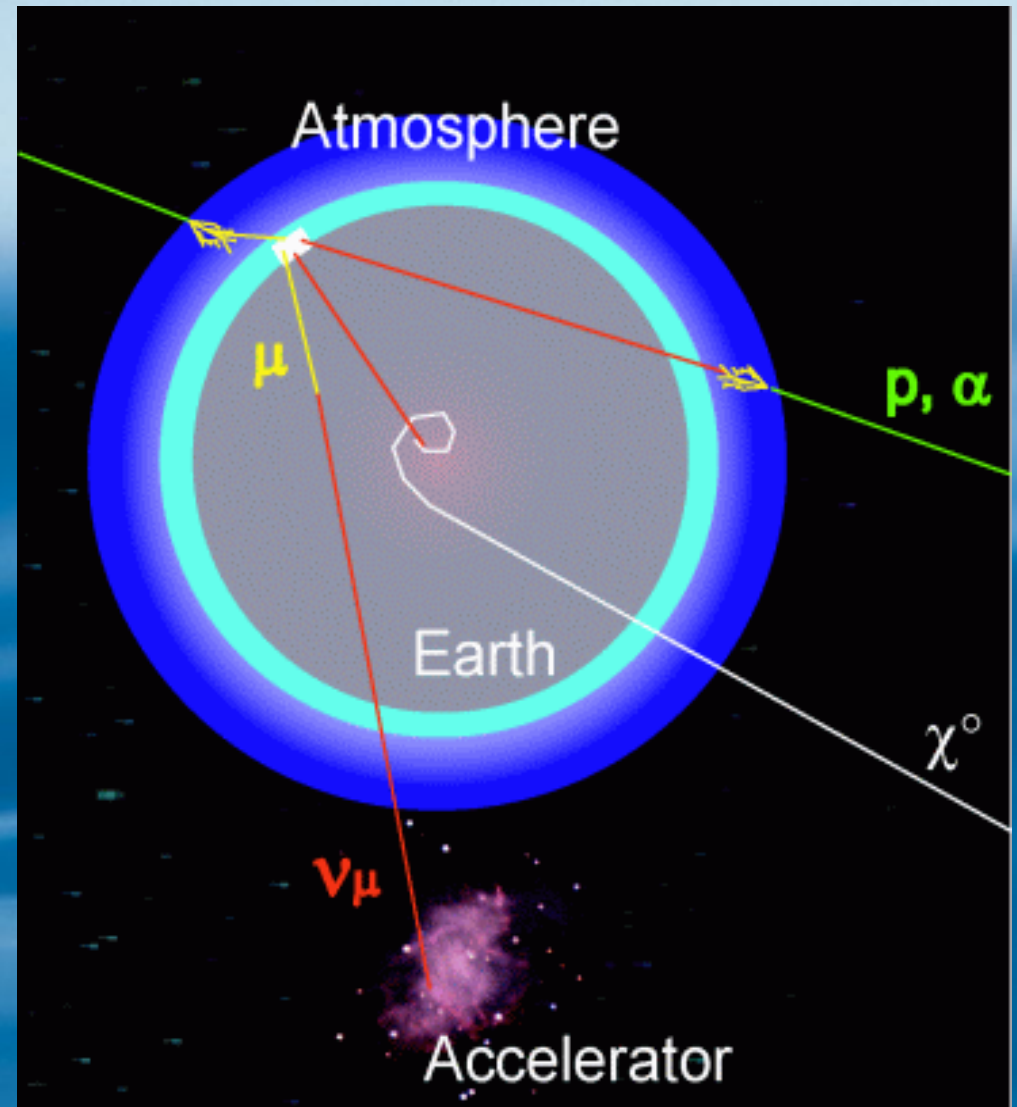


Źródło: G. Kane, 2003, Sci. Am., 288 (6), 68-75

# Jak wykryć ciemną materię?

## Metody wykrywania i projekty:

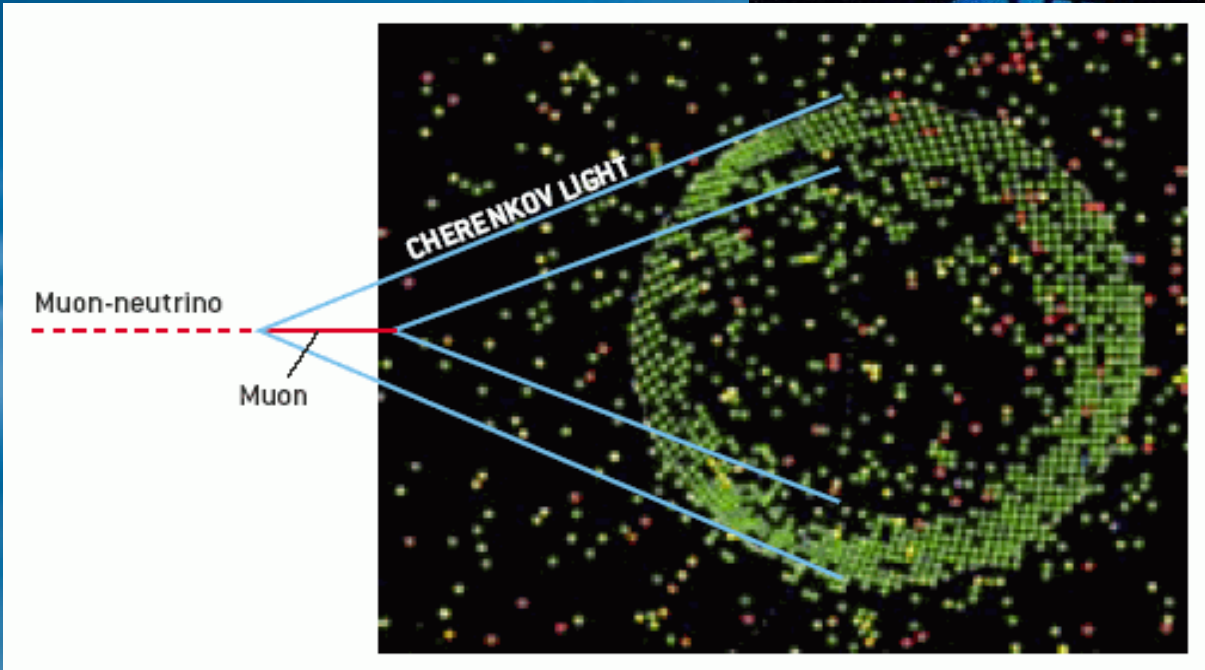
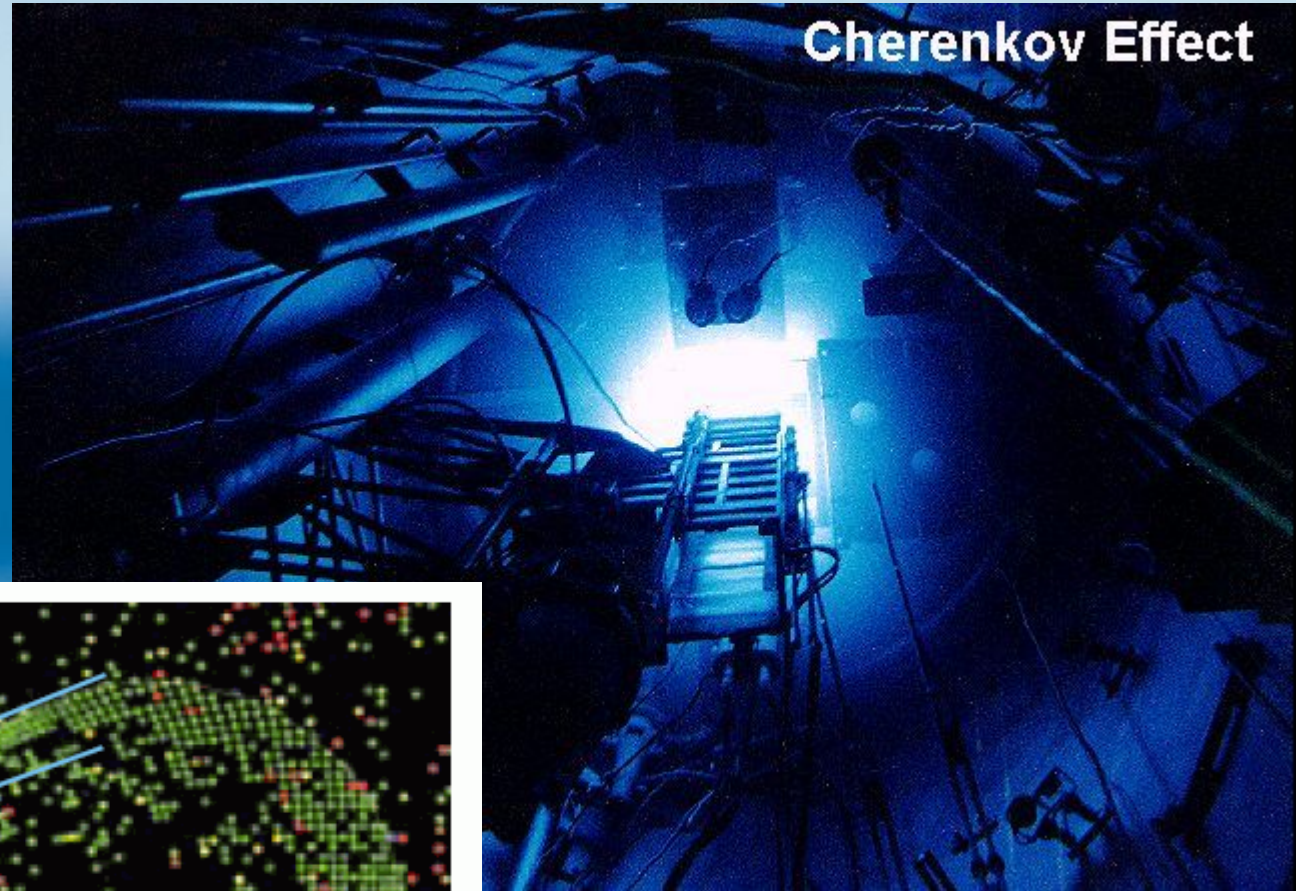
- Rozproszenie elastyczne na sieci krystalicznej: jonizacja i fonony (CDMS - USA; DAMA - Włochy, HDMS – Niemcy, EDELWEISS – Francja, Picassi - Kanada)
- Rozproszenia elastyczne w ciekłym ksenonie: scyncylacja i jonizacja (ZEPLIN - Anglia; XENON - USA)
- Poszukiwanie neutrin pochodzące z rozpadu WIMP-ów we wnętrzu Ziemi lub Słońca



Zasada działania detektora ciemnej materii metodą pośrednią: wykrywanie ciemnej materii anihilowanej w środku Ziemi ( $WIMP \rightarrow$  neutrino  $\rightarrow$  mion)

# Promieniowanie Czerenkowa

Cząstki elementarne poruszające się w wodzie z prędkością nadświatłą wytwarzają snop światła ( $<42^\circ$ ).



WIMP-y mogą podlegać anihilacji wewnątrz Ziemi, Słońca lub w centrum Galaktyki. Powstają przy tym neutrina, rozpadające się na cząstki, mogące wywoływać świecenie wody w detektorze.

Przykład śladu mionu wykrytego dzięki promieniowaniu Czerenkowa (Kearns E., 1999, *Sci. Am.*, 281 (2), 64-71)

# Detektory neutrin

“Teleskopy Czerenkowa”

## Projekty:

### - kopalnie

- np. Super-Kamiokande, Japonia

### - lód

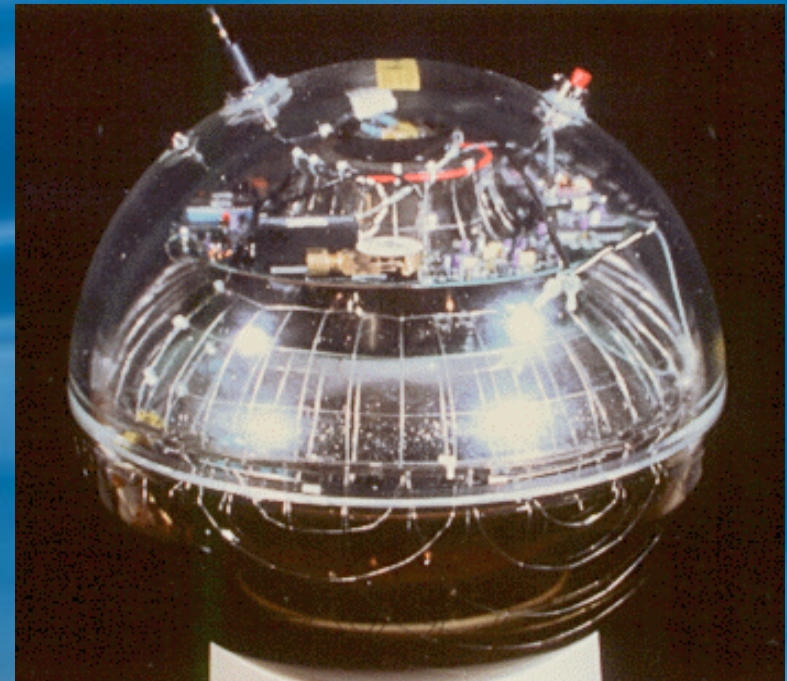
- Amanda i IceCube, Biegun Południowy

### - ocean

- Dumand - Hawaje; 1976-1995
- NT-200 - Bajkał; 1984 →
- Antares – koło Tuluzy; 2003 →
- Nestor – Morze Egejskie; 2003 →
- Nemo – koło Sycylii (planowany)

## Pomysłodawcy:

- Kenneth Greisen (1960)
- Frederick Reines (1960)
- M.A. Makarow (1960)



Hermetycznie zamknięty fotopowielacz  
– projekt DUMAND

# Kopalnie: Super-Kamiokande

The image shows the interior of the Super-Kamiokande detector, a large cylindrical cavern filled with water. The walls are lined with thousands of photomultiplier tubes (PMTs) arranged in concentric rings, creating a dense grid of light sensors. The water is dark blue, and the overall atmosphere is dimly lit, with some light reflecting off the water surface. A small boat with people is visible on the right side of the cavern.

## Detektor w sztolni

Miejsce: Japonia, 2000m pod ziemią

Uruchomienie: 1996 r.

Masa wody: 20000 ton

Główne sukcesy:

masa neutrina,

supernowa 1987a

# Lód: Amanda oraz IceCube



Detektory w lodzie Antarktydy

Miejsce: Biegun Południowy

Amanda: 1996 r.

IceCube: w budowie od 2000 r.

Docelowa objętość: 1 km<sup>3</sup>

# Dlaczego w oceanie?

- niska radioaktywność wody morskiej
- przejrzystość
- duża rozdzielczość kątowna ( $0.3^\circ$  w wodzie,  $3.0^\circ$  w lodzie)
- możliwość rozciągnięcia odbiornika na dowolnie dużą objętość
- brak efektu ścian

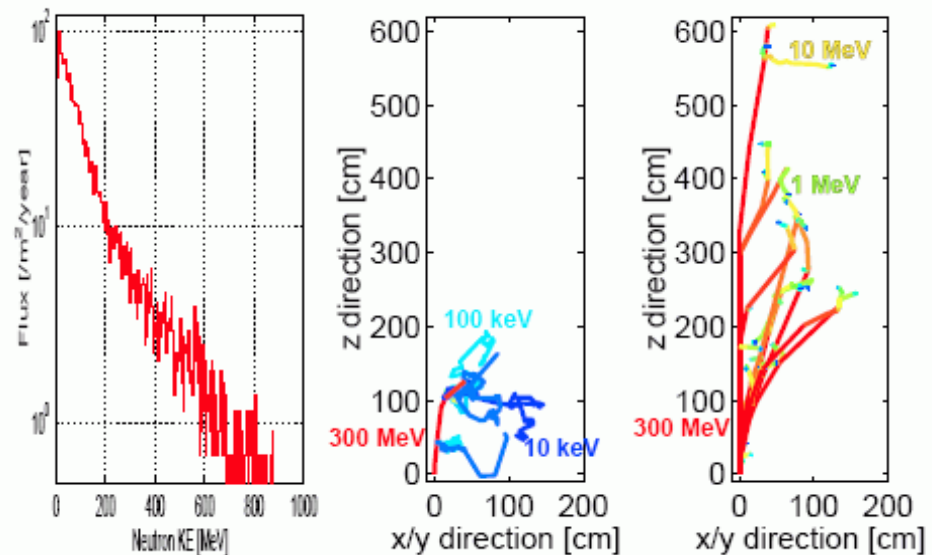


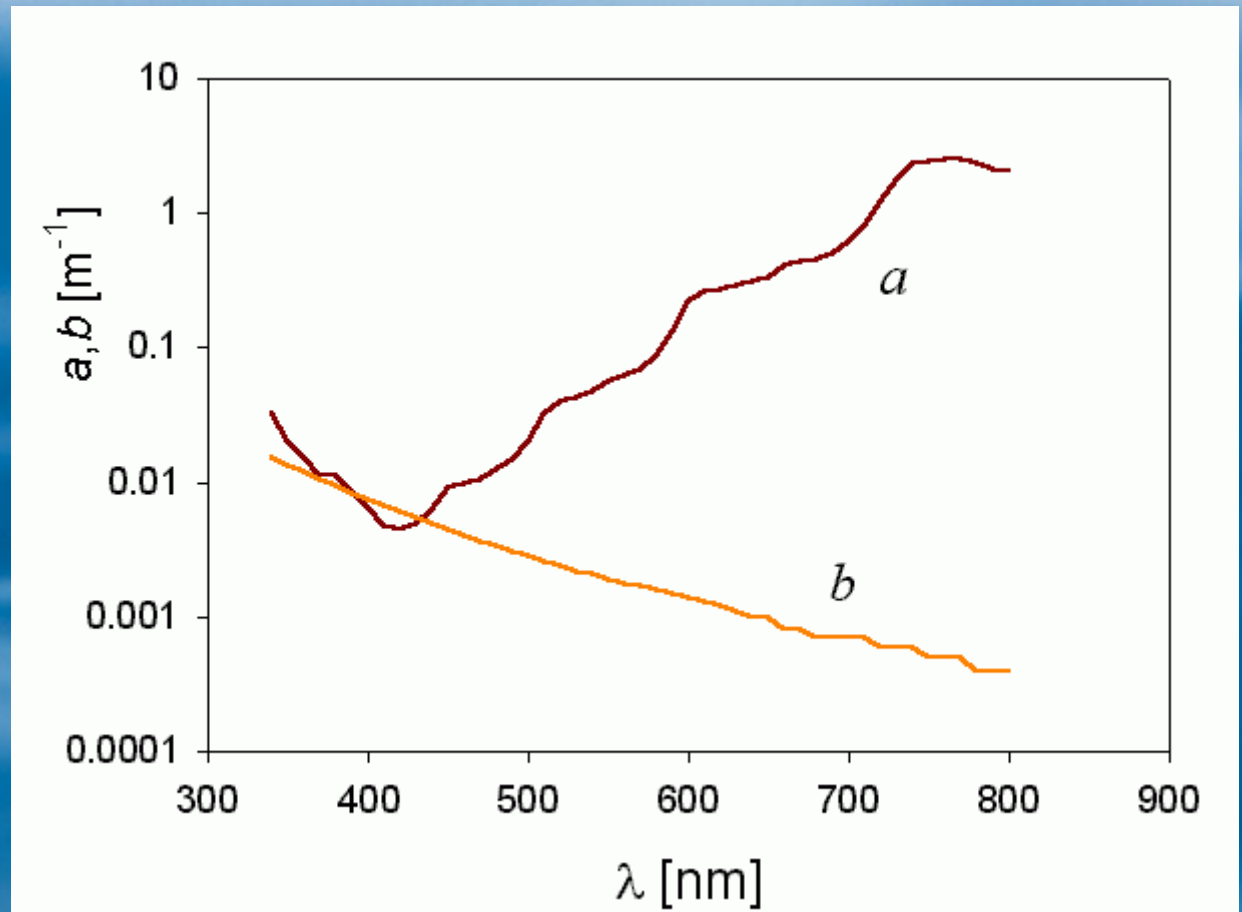
Figure 3. (a) Monte Carlo prediction of high energy neutron flux from the rock walls arising from muons at a depth of 2000 mwe. Also shown in plots on the right are tracks from a Monte Carlo simulation of 300 MeV Neutron(s) entering shielding material vertically upwards on the plots. (b) Fe Shield (similar to Pb): only 1 event is shown for clarity. (c) Water (similar to polyethylene): 10 separate events are shown.

Źródło: Gaitskell, Proc. IDM 2000 Conf., York, England, Sept. 18-22, 2000



# Gdzie w oceanie?

- bliskość brzegu
- duża głębokość (>2000m)
- duża przejrzystość ( $a < 0.05 \text{ m}^{-1}$ ,  $b < 0.02 \text{ m}^{-1}$ )
- brak bioluminescencji
- niewielkie prądy
- mało osadów



Współczynniki absorpcja (Pope & Fry 1997; Sogandares & Fry 1997) oraz rozpraszania (Smith & Baker, 1981) czystej wody morskiej.

# Hawaje: DUMAND

Miejsce: koło Kona (Hawaii), 4800 m p.p.m.

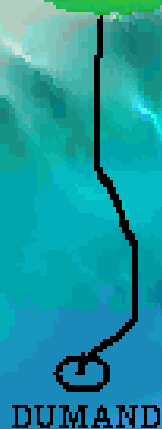
Okres: 1976 – 1995

Sukcesy: udowodnienie słuszności koncepcji

Dumand2: (rozważany) 1 km<sup>3</sup>: detektory optyczne i hydrofony



Keahole Point



DUMAND



# Bajkał: Girlyanda i NT-200

Fazy projektu:

GIRLYANDA 1984-1990

NT-200 (w konstrukcji od 1993)



Docelowa objętość detektora:  
 $0,2 \text{ km}^3$

Sukcesy: pierwszy operacyjny  
detektor

# Morze Śródziemne: Antares

Budowa od 2003 r.

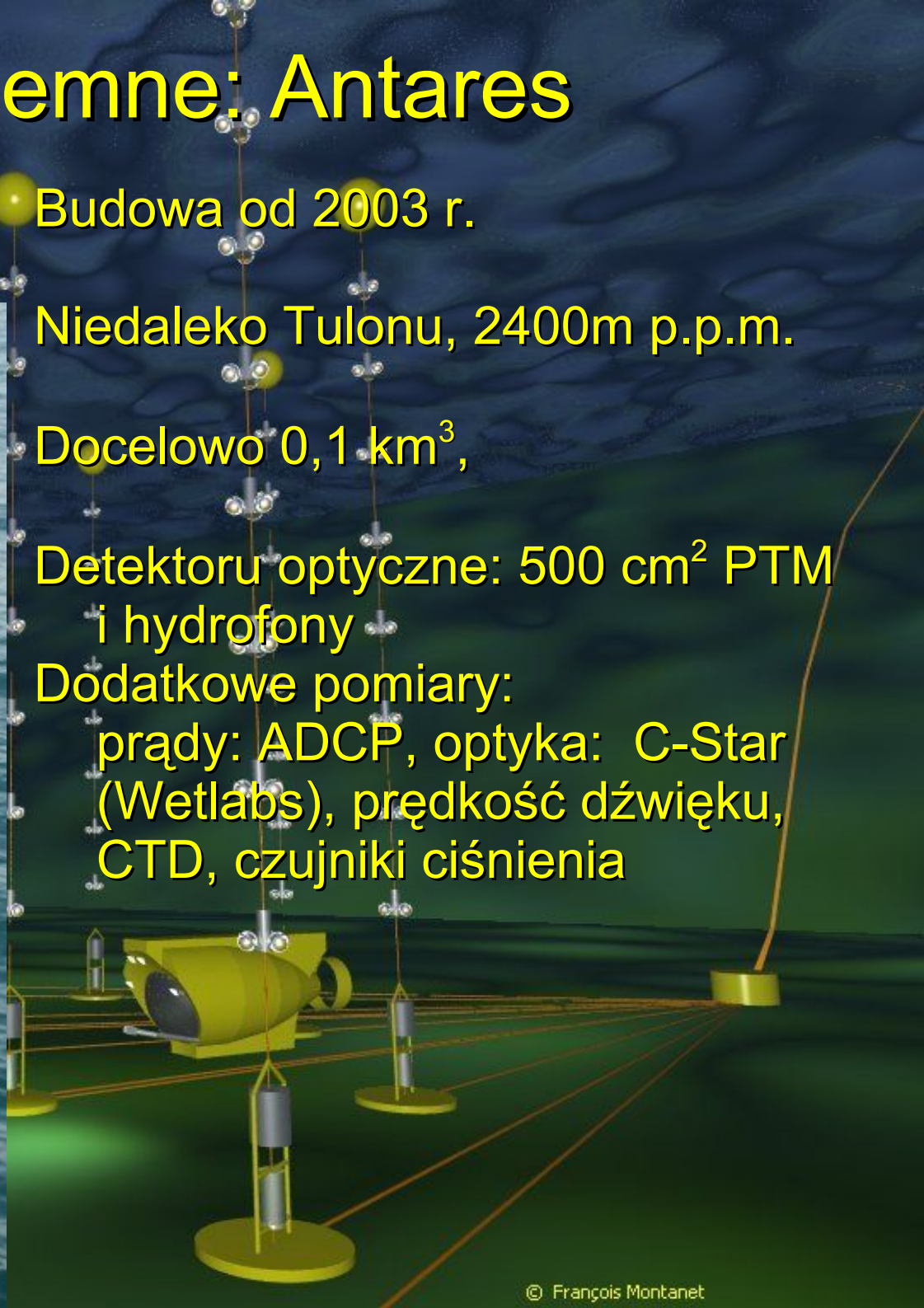
Niedaleko Tulonu, 2400m p.p.m.

Docelowo 0,1 km<sup>3</sup>,

Detektoru optyczne: 500 cm<sup>2</sup> PTM  
i hydrofony

Dodatkowe pomiary:

prądy: ADCP, optyka: C-Star  
(Wetlabs), prędkość dźwięku,  
CTD, czujniki ciśnienia



# Podsumowanie

Wszechświat składa się w przeważającej części z materii nie atomowej (“ciemnej”).

Najbardziej prawdopodobny skład ciemnej materii: hipotetyczne najlżejsze cząstki supersymetryczne (neutralina).

Możliwości wykrycia: rozpraszanie ciemnej materii na sieciach krystalicznych lub obserwacja cząstek pochodzących z jej rozpadu w detektorach promieniowania Czerenkowa.

Najlepsze miejsca na “teleskopy Czerenkowa”: lądolód i oceany.

Dziękuję za uwagę