

# Ewolucja Wszechświata

*Wykład 4*

*Inflacja*

*Plazma kwarkowo-gluonowa*

# Teoria Wielkiej Unifikacji

Złamanie symetrii – oddzielenie się  
oddziaływań silnych zapoczątkowało  
Erę Inflacji

# Teoria inflacji

Problemy, które trzeba wyjaśnić:

- **Problem horyzontu**
- **Problem monopoli magnetycznych**
- **Problem płaskości Wszechświata**

# Problem horyzontu

Niezależnie od jakości teleskopów, nie możemy obserwować dowolnie odległych obiektów. Największa odległość, w której światło zdążyło dotrzeć do obserwatora w czasie istnienia Wszechświata wynosi :

$$R = T \cdot c$$

gdzie:  $T$  – wiek Wszechświata,  
 $c$  – prędkość światła

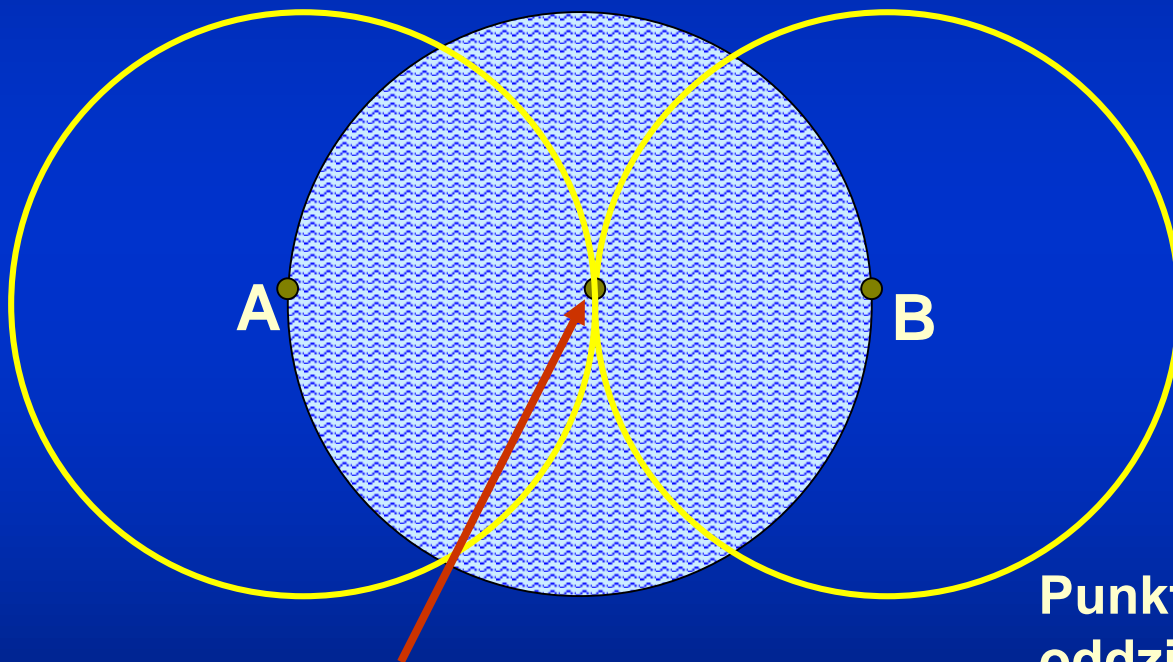
$$c = H \cdot R \Rightarrow R = \frac{1}{H} \cdot c = T \cdot c$$



Horyzont można też zdefiniować podstawiając do prawa Hubble'a maksymalną prędkość ucieczki galaktyk równą prędkości światła:

# Problem horyzontu

Obserwujemy we wszystkich kierunkach wysoką jednorodność Wszechświata, zarówno w skali wielkoskalowej (galaktyki, gromady galaktyk), jak i promieniowania mikrofalowego, którego natężenie i temperatura są identyczne we wszystkich kierunkach z dokładnością do  $1/10^5$ .



Nasza galaktyka

Punkty A i B nie mogły ze sobą oddziaływać od początku istnienia Wszechświata, więc skąd ta jednorodność...?

# Problem horyzontu

$$T = 3 \cdot 10^{28} \text{ K}$$

$$T = 3 \text{ K}$$

3 mm



Ekspansja o  
czynniki  $10^{28}$



$3 \cdot 10^{28} \text{ mm}$

Obecny horyzont  
zdarzeń

Horyzont zdarzeń

$$3 \cdot 10^{-25} \text{ cm}$$

$$\text{Wiek} = 10^{-35} \text{ s}$$

$$\text{Wiek} = 10^{17} \text{ s}$$

**W wieku  $10^{-35}$  s Wszechświat składał się z ogromnej liczby niezależnych, rozdzielonych obszarów? Sprzeczność z obserwowaną jednorodnością!**

# Problem cząstek reliktowych

Gdy Wszechświat miał  $10^{-35}$  s i temperaturę  $3 \cdot 10^{28}$  K występowała unifikacja trzech oddziaływań: silnego, słabego i elektromagnetycznego.

Teorie Wielkiej Unifikacji przewidują powstanie ogromnej liczby cząstek reliktowych m.in. monopoli magnetycznych – cząstek o masach  $10^{16}$  razy większych niż masa protonu. Z obliczeń wynika, że monopoli byłoby teraz tysiące razy więcej niż protonów czy neutronów.

**Jednak monopole nie są obserwowane!**

# Problem płaskości Wszechświata

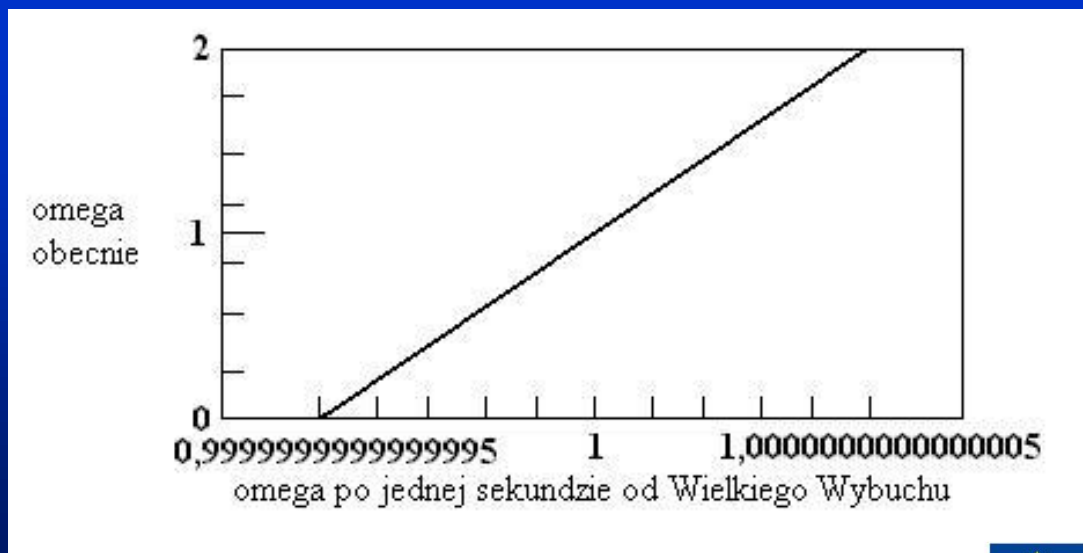
Względna gęstość materii we Wszechświecie:

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

$\Omega > 1$  Wszechświat zamknięty (rozszerzanie zakończy się i rozpocznie zmniejszanie)

$\Omega < 1$  Wszechświat otwarty (rozszerzanie będzie trwać w nieskończoność)

Początkowa wartość  $\Omega$  było bardzo niestabilna i jakiegokolwiek odchylenie od wartości 1 szybko wzrosłoby w czasie.





$\Omega = \rho / \rho_k$  - parametr gęstości

Miara płaskości Wszechświata:

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = \frac{\rho - \rho_k}{\rho} = \frac{3kc^2}{8\pi Ga^2 \rho}$$

z równania Friedmana

$$\rho - \rho_k = \frac{3kc^2}{8\pi Ga^2}$$

Gdy dominuje promieniowanie:

$$\rho \propto \frac{1}{a^4}$$

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} \propto a^2 \propto t$$

Wartość

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = \frac{\Omega - 1}{\Omega}$$

rośnie w czasie

Wszechświat z czasem robi się coraz mniej płaski.

# Problem płaskości Wszechświata

Aby dzisiejsza  $\Omega$  mieściła się w żądanym przedziale, początkowa jej wartość musiała być równa jedności z dokładnością większą niż 1 na  $10^{-15}$ .

**Początkowy Wszechświat był bardzo płaski!**

Warunki początkowe Wszechświata zostały dostrojone z wielką precyzją, aby mógł powstać dzisiejszy świat. Małe wahanie na początku ewolucji Wszechświata sprawiłoby, że zapadłby się w krótkim czasie lub materia tak szybko by się oddalała, że nie powstałyby gwiazdy i planety.

**Skąd to wykalibrowanie warunków początkowych?**

# Wszechświat inflacyjny

Po upływie czasu Plancka Wszechświat o temperaturze  $10^{14}$  GeV podlegał Wielkiej Unifikacji Oddziaływań (oddziaływania silne, słabe i elektromagnetyczne nie różniły się).

Odlączenie się silnych oddziaływań - złamanie symetrii.

Wszechświat zawierał obszary „fałszywej próżni” wypełnione ogromną energią (pola Higgsa).

„Fałszywa próżnia” to obszar o zadziwiających własnościach:

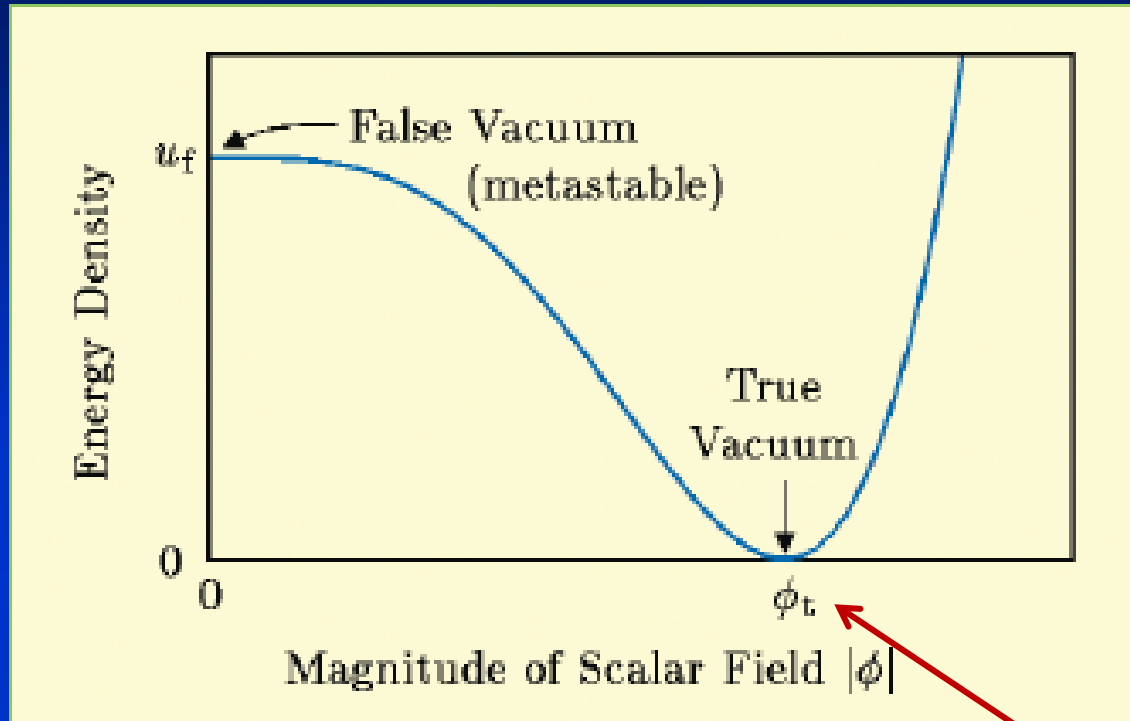
- jej gęstość nie zmienia się wraz z rozszerzaniem się
- wytwarza ona ujemne ciśnienie

Z ciśnieniem jako formą energii związana jest grawitacja.

Ujemne ciśnienie prowadzi do odpychającej siły grawitacyjnej – odpowiada tej sytuacji niezerowa stała kosmologiczna  $\Lambda$ .

**Nastąpiła ekspansja!**

## Pole Higgsa charakteryzuje duża gęstość energii przy zerowej wartości



Próżnia to stan o najniższej gęstości energii

Przy energii Wielkiej Unifikacji  $10^{14}$  GeV pole Higgsa ma zerową wartość -  
nośniki oddziaływań nie różnią się – oddziaływania zunifikowane.  
Wszechświat w stanie fałszywej próżni – metastabilnym.

# Inflacyjna ekspansja

$$\text{INFLACJA} \Leftrightarrow \ddot{a}(t) > 0$$

Równanie na przyspieszenie:

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3} \left( \rho + \frac{3p}{c^2} \right)$$

$$p < -\frac{\rho c^2}{3}$$

Przyspieszenie ekspansji związane jest z ujemnym ciśnieniem.

# Wszechświat inflacyjny

Wzór kosmologiczny:

$$H^2 = \frac{8\pi G\rho}{3} - \frac{kc^2}{r^2} + \frac{\Lambda}{3}$$

gdzie:

$$H = \frac{\dot{r}}{r}$$

Te człony maleją gwałtownie  
podczas szybkiego rozszerzania

Zostaje:

$$\left(\frac{\dot{r}}{r}\right)^2 = \frac{\Lambda}{3}$$



$$\dot{r} = \sqrt{\frac{\Lambda}{3}} \cdot r$$

Rozwiązanie równania:

$$r(t) = \exp\left(\sqrt{\frac{\Lambda}{3}} \cdot t\right)$$

**Ekspansja wykładnicza!**

# Wszechświat inflacyjny

Wykładnicza ekspansja zakończyła się w chwili  $10^{-34}$  s po Wielkim Wybuchu.

Jak powiększył się w tym czasie Wszechświat?

$$r(t) = \exp\left(\sqrt{\frac{\Lambda}{3}} \cdot t\right) = \exp(H \cdot t)$$

Założmy, że charakterystyczny czas ekspansji  $T = H^{-1} = 10^{-36}$  s

Między  $10^{-36}$  s a  $10^{-34}$  s Wszechświat rozszerzy się o czynnik:

$$\frac{r_{kon}}{r_{pocz}} = \exp\left(H(t_{kon} - t_{pocz})\right) = e^{99} \approx 10^{43}$$

Wszechświat powiększył się w ułamku sekundy do rozmiarów wielokrotnie przekraczających wszystko co możemy obserwować!



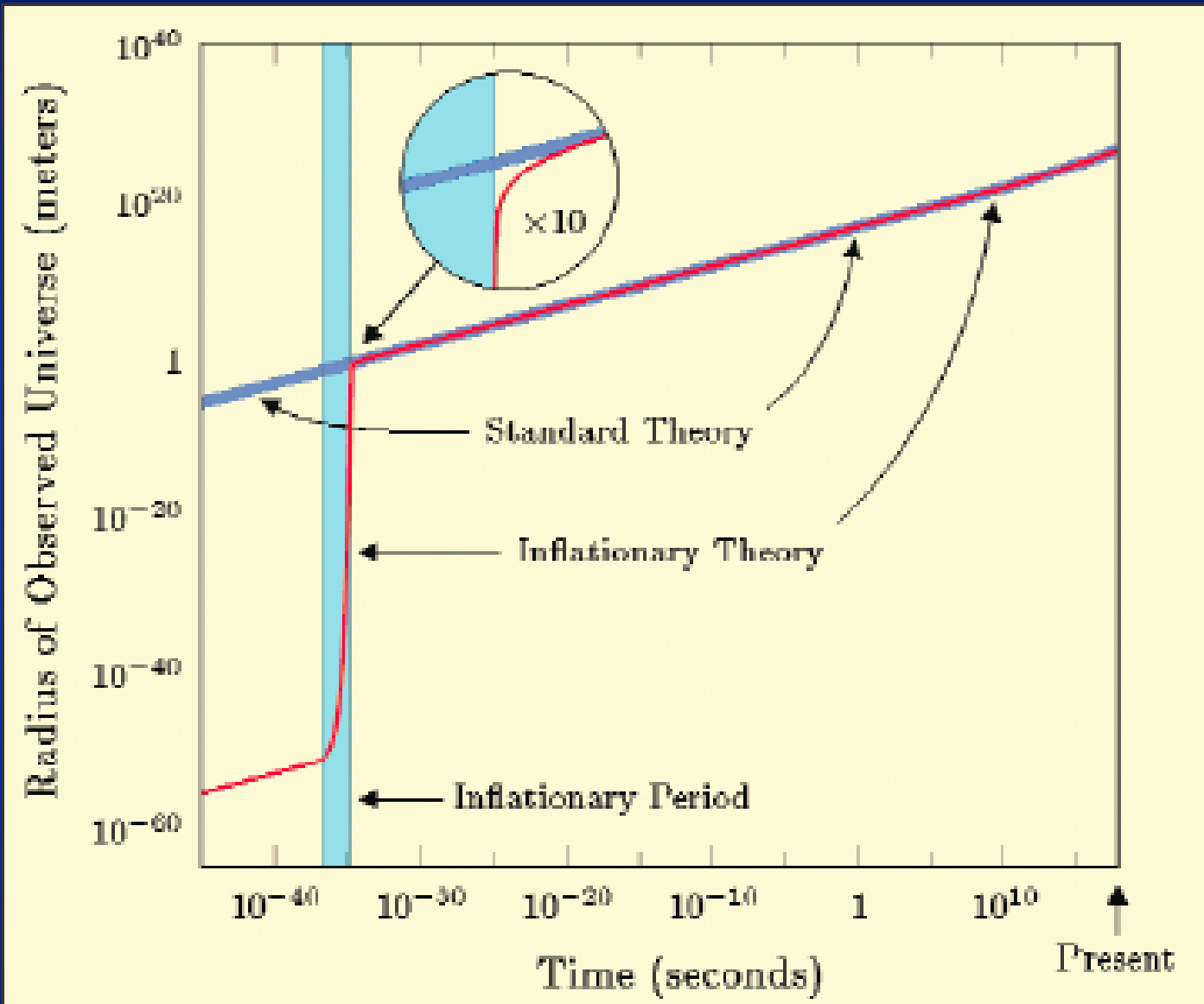


# Wszechświat inflacyjny

„Istnieją poważne racje, by sadzić, że proces odłączania się silnych oddziaływań jądrowych istotnie wpływa na zmianę kwantowego stanu, zwanego kwantową próżnią, co z kolei powoduje gwałtowne, niejako nadprogramowe, rozdęcie i tak już rozszerzającego się Wszechświata. Zjawisko to nazywa się kosmiczną inflacją. W ciągu małego ułamka sekundy rozmiary Wszechświata powiększają się  $10^{50}$  razy!”

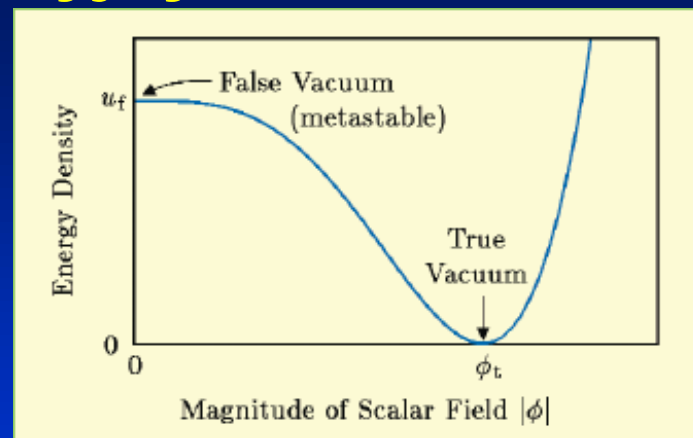
*M. Heller*

# Wszechświat inflacyjny



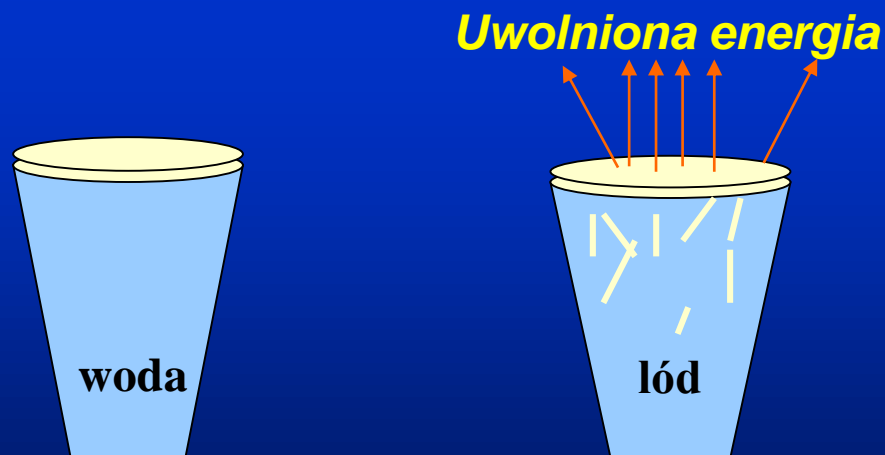
# Wszechświat inflacyjny

Przejście ze stanu metastabilnego (fałszywa próżnia) do stabilnego (próżnia prawdziwa) - złamanie symetrii (cząstki zaczynają się różnić masą, bo pole Higgsa większe od zera)

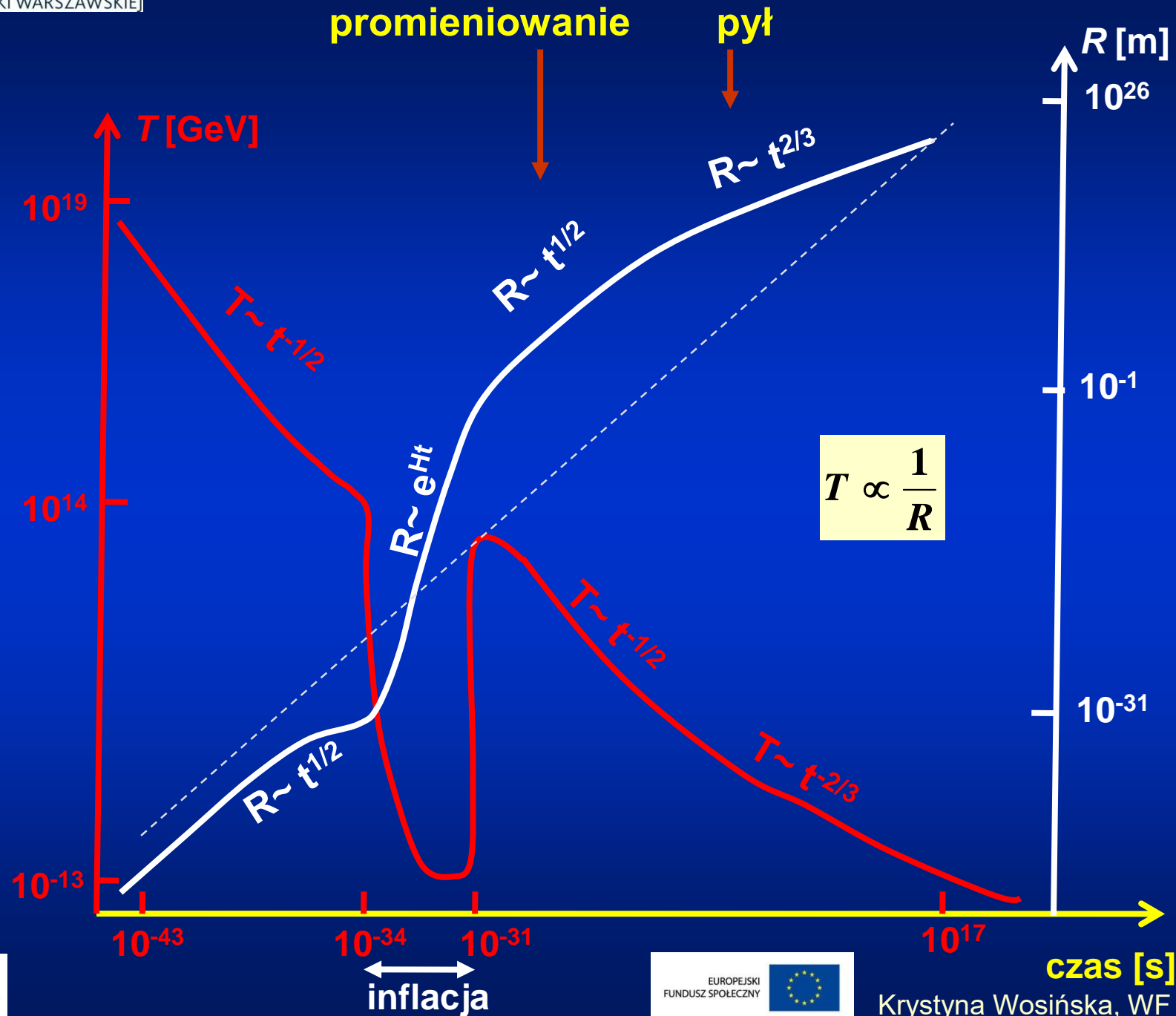


Inflacja zakończyła się przejściem fazowym – „fałszywa próżnia” zamieniła się w próżnię prawdziwą wypełnioną cząstkami. Towarzyszyło temu wyzwolenie ogromnej energii, która ponownie „podgrzała” Wszechświat

*Analogia:*



Podczas przejścia fazowego uwalnia się energia



# Wszechświat inflacyjny

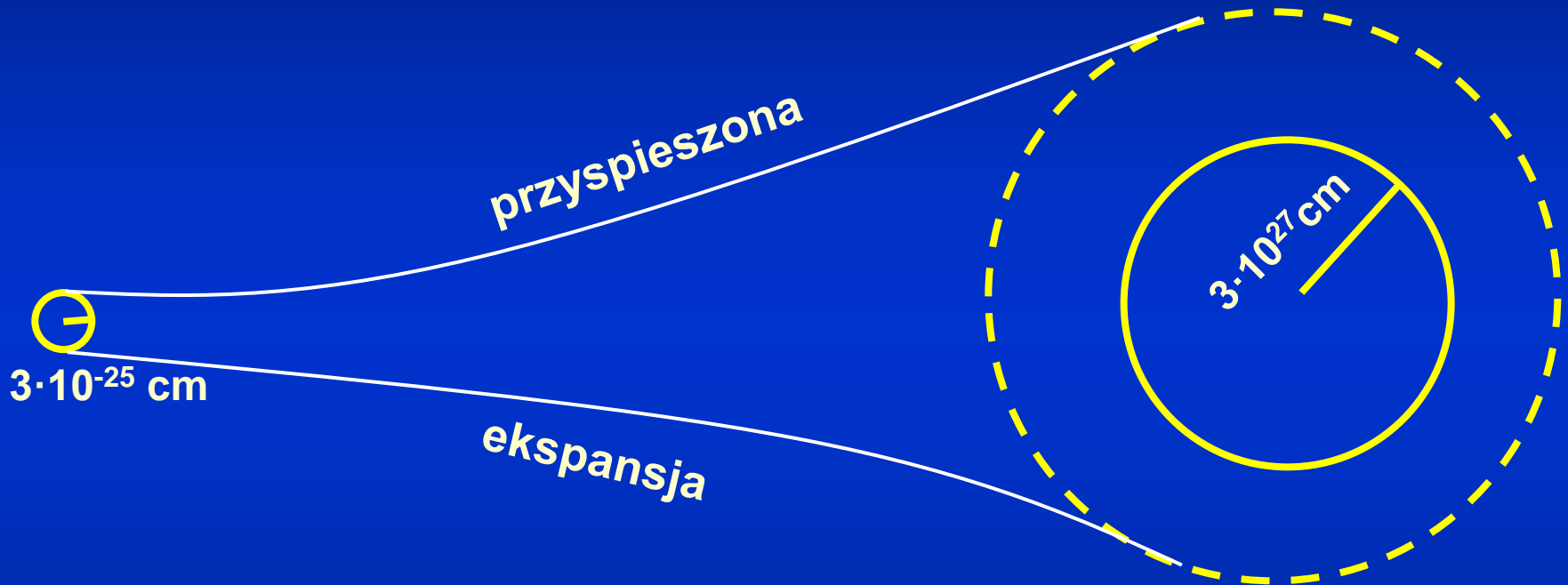
Po zakończeniu okresu inflacji Wszechświat rozszerzał się dalej ze stałą kosmologiczną równą zero (do czasu...).

Teorię inflacji zaproponował w 1981 roku Alan Guth teoretyk fizyki cząstek elementarnych zajmujący się Teorią Wielkiej Unifikacji.



# Wszechświat inflacyjny

Rozwiązanie problemu jednorodności Wszechświata:



**Obserwowalny Wszechświat powstał z bardzo małego jednorodnego obszaru.**

# Wszechświat inflacyjny

**Rozwiązanie problemu monopoli:**

**Ekspansja ery inflacyjnej powoduje rozrzedzenie cząstek reliktowych – w rezultacie nie można ich obecnie obserwować.**

# Wszechświat inflacyjny

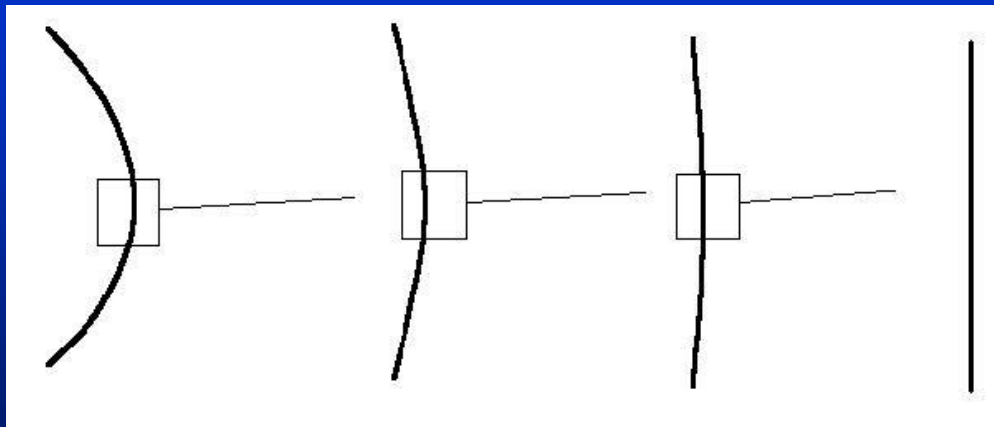
Rozwiązanie problemu płaskości Wszechświata:

Z równania Friedmana dla Wszechświata inflacyjnego można otrzymać związek:

$$|\Omega(t) - 1| \propto \exp\left(-\sqrt{\frac{4\Lambda}{3}} \cdot t\right)$$

Oznacza on, że  $\Omega$  szybko dąży do jedności

**Obecny Wszechświat jest płaski!**





# Światy równoległe?

Teoria inflacji otwiera olbrzymie pole do spekulacji.

Jedna z hipotez (której nigdy nie sprawdzimy!) mówi, że nasz Wszechświat jest jednym z wielu (może nieskończenie wielu) wszechświatów zawartych w „metawszechświecie” (Linde).

Każdy z tych Wszechświatów powstał z subatomowego obszaru przestrzeni i stał się większy niż nasz widzialny Wszechświat w czasie krótszym od  $10^{-30}$  s. Mogły one powstawać w różnych miejscach i czasach.

Hipotezy tej nie możemy zweryfikować doświadczalnie, bo nasze obserwacje nie mogą wyjść poza horyzont zdarzeń w naszym Wszechświecie!

# Inflacja - podsumowanie

Różne odmiany modeli inflacyjnych mają następujące cechy wspólne:

- Pusta przestrzeń, nie będąca prawdziwą próżnią kipi energią.
- Energia ta powoduje, że pęcherzyk przestrzeni rozszerza się z fantastyczną prędkością w czasie pierwszych chwil istnienia Wszechświata
- Pod koniec tej fazy rozszerzania, około  $10^{-34}$  s od Wielkiego Wybuchu, dochodzi do przejścia fazowego, które tworzy prawdziwą próżnię i ogromną liczbę cząstek oraz bardzo silnie ogrzewa Wszechświat.
- Po zakończeniu inflacji Wszechświat (który kiedyś był subatomowym pęcherzykiem przestrzeni) rozszerza się tak, jak przewiduje teoria Wielkiego Wybuchu, która powstała przed modelem inflacyjnym

# Historia Wszechświata

$10^{-34}$  s

Temperatura  $10^{27}$  K

**Materia w postaci plazmy kwarkowo-gluonowej.**

Wszechświat wypełniają swobodne *kwarki, gluony, leptony, bozony W i Z, fotony*, które oddziałują ze sobą.

**Oddziaływanie silne oddzielone od oddziaływania elektroslabego.**

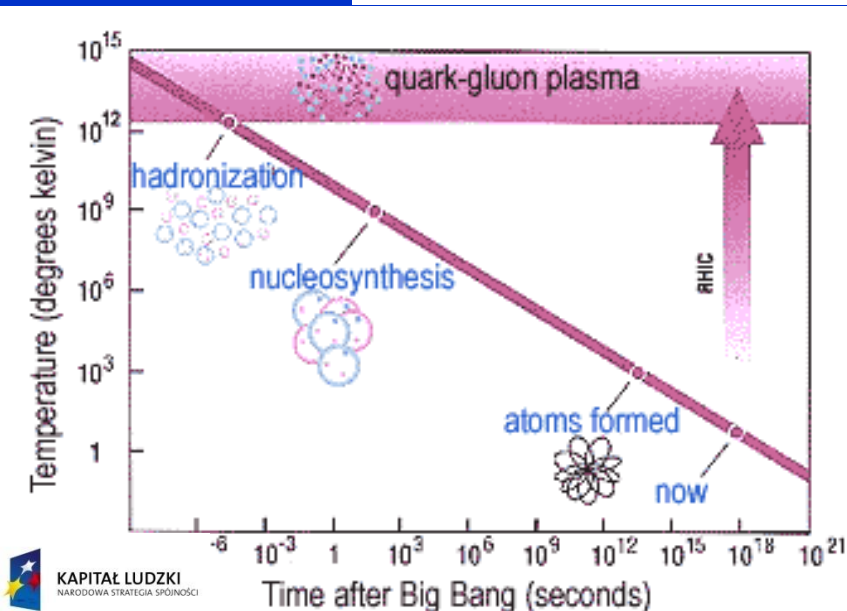
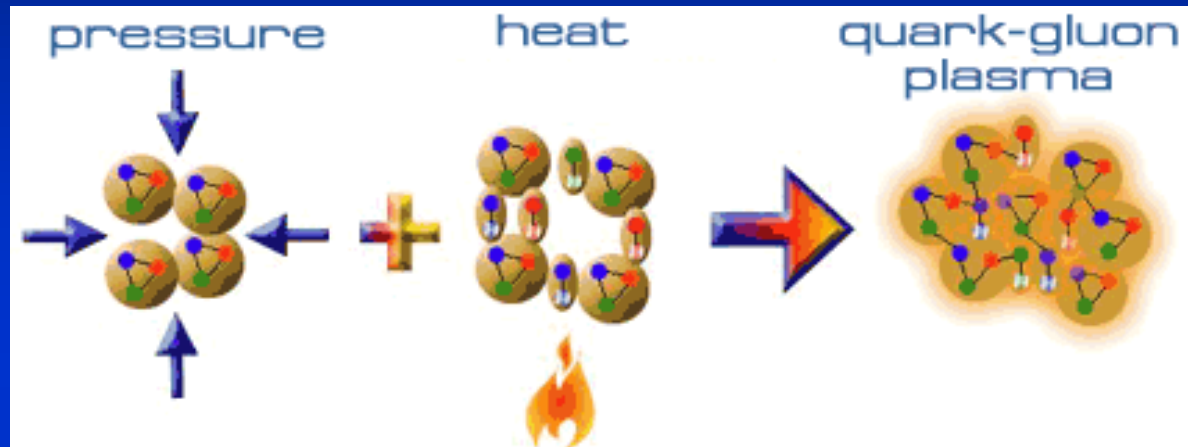
***Od tej chwili oddziaływania te znacznie różnią się wielkością.***

# Jak wytworzyć plazmę kwarkowo-gluonową?

•Zwiększyć:

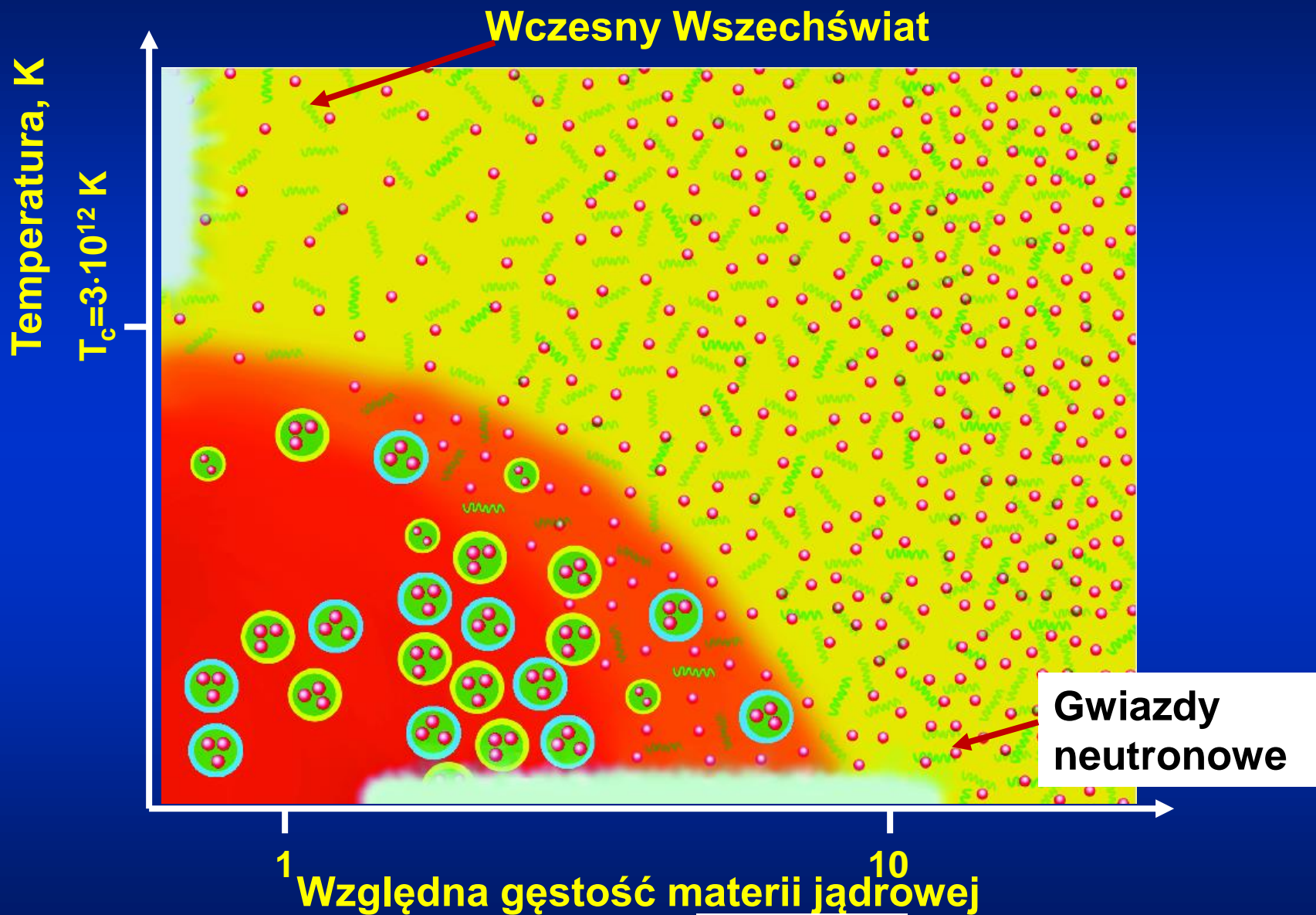
ciśnienie

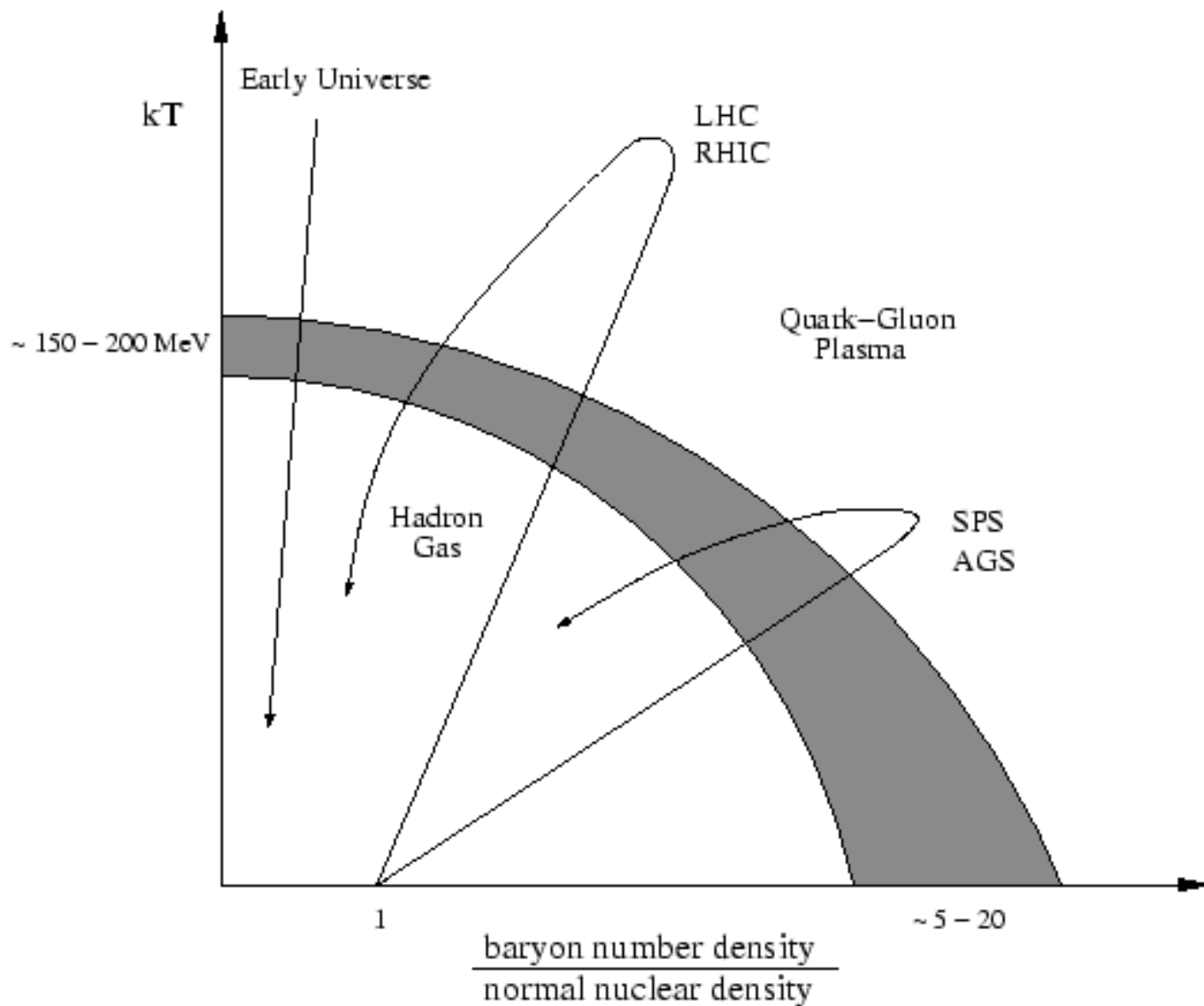
temperaturę



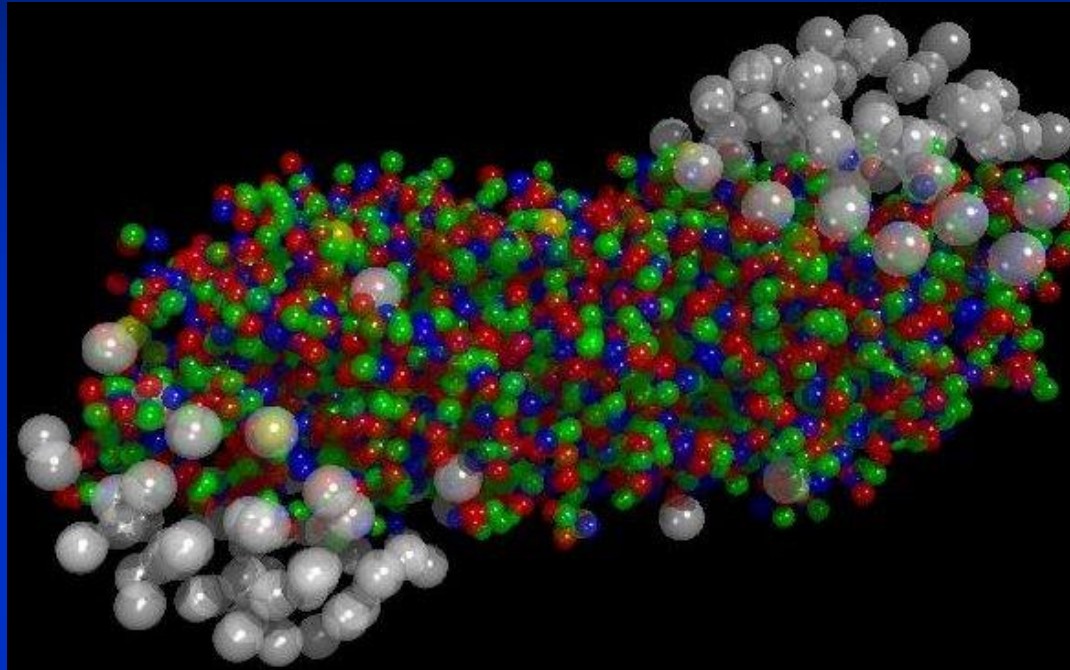
Takie warunki panowały we  
Wszelchświecie tuż po  
Wielkim Wybuchu

# Plazma kwarkowo-gluonowa





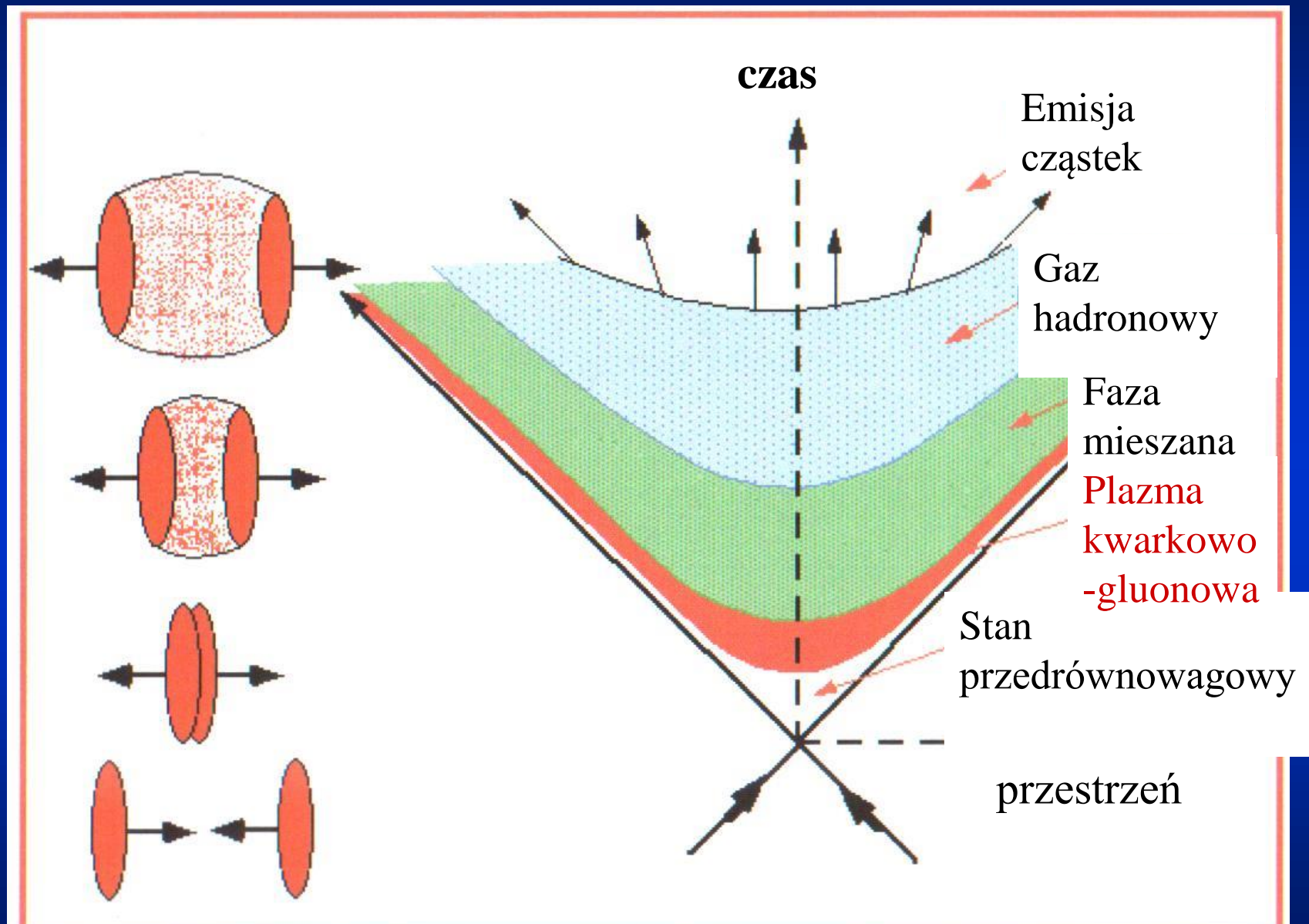
**W zderzeniu wysokoenergetycznych jąder ołowiu może powstać plazma kwarkowo-gluonowa**



CERN Press Release

**Szare kulki – nukleony, kolorowe kulki – kwarki w 3 kolorach.**

# Zderzenia jąder o wielkich energiach – wytwarza się stan materii o wysokiej temperaturze i ciśnieniu.





# Brookhaven National Laboratory, Long Island (USA)

Eksperyment rozpoczęty  
w 2000 roku



**RHIC - Relativistic Heavy Ion Collider**  
**(Relatywistyczny Zderzacz Ciężkich Jonów)**



**Akcelerator w tunelu 4 m pod ziemią przyspiesza przeciwbieżne wiązki jąder atomowych do prędkości 99,95 prędkości światła.**

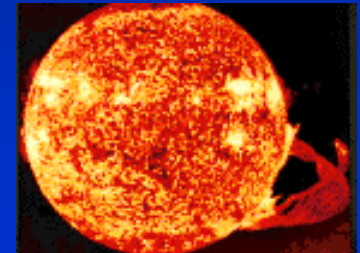


**Wiązka odchylana jest w polu magnetycznym wytwarzanym przez nadprzewodzące magnesy umieszczone w ciekłym helu o temperaturze 4,5 K.**



# RHIC

- Energia zderzenia  $E_{\text{cms}} = 200 \text{ GeV}$
- Tysiące zderzeń na sekundę
- Podczas zderzenia wytwarza się temperatura 10 000 razy wyższa niż na Słońcu

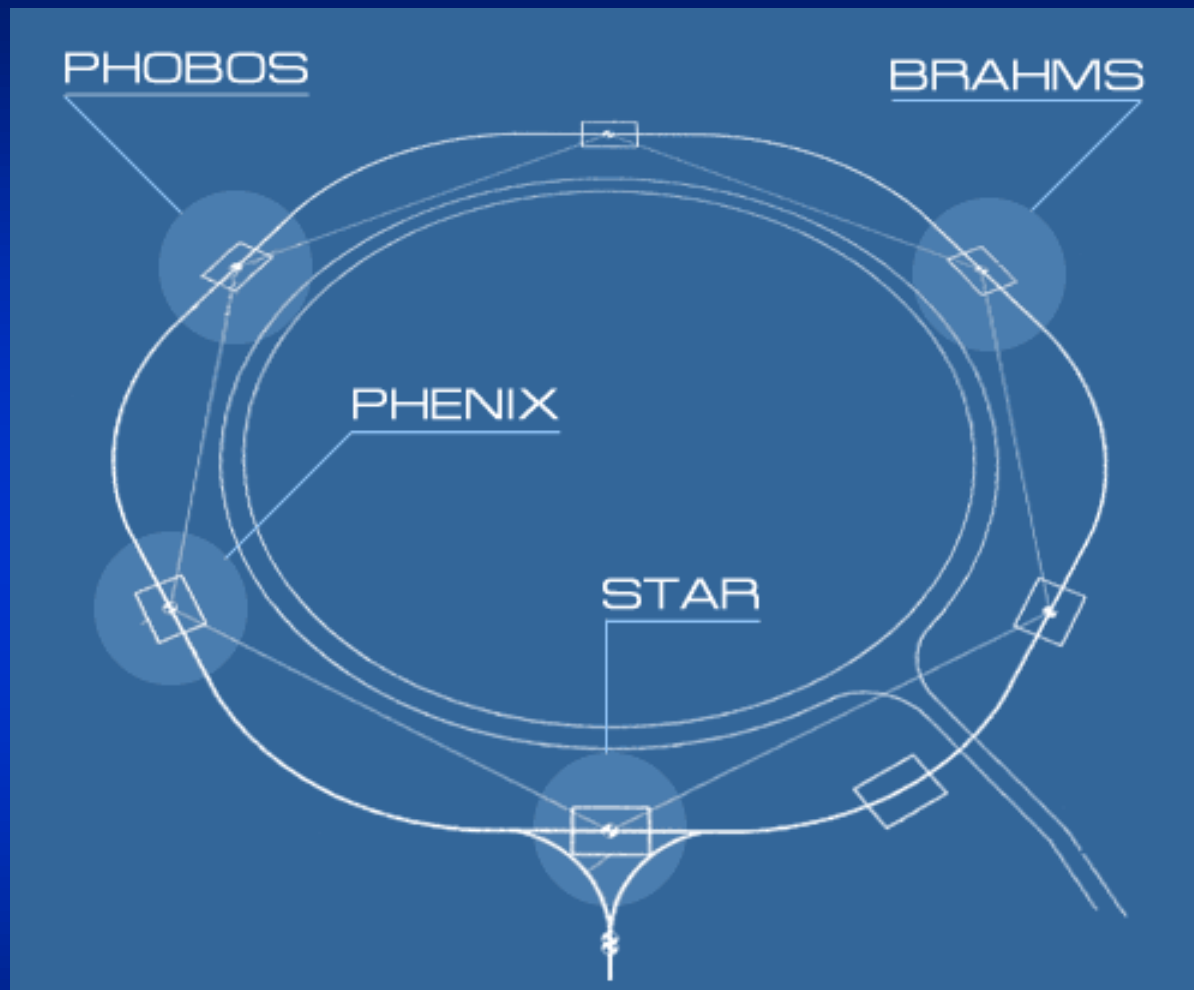


W eksperymentach  
bierze udział ponad 1000  
fizyków z całego świata

*Grupa naukowców i  
studentów z Wydziału  
Fizyki P.W. uczestniczy w  
eksperymentcie STAR*

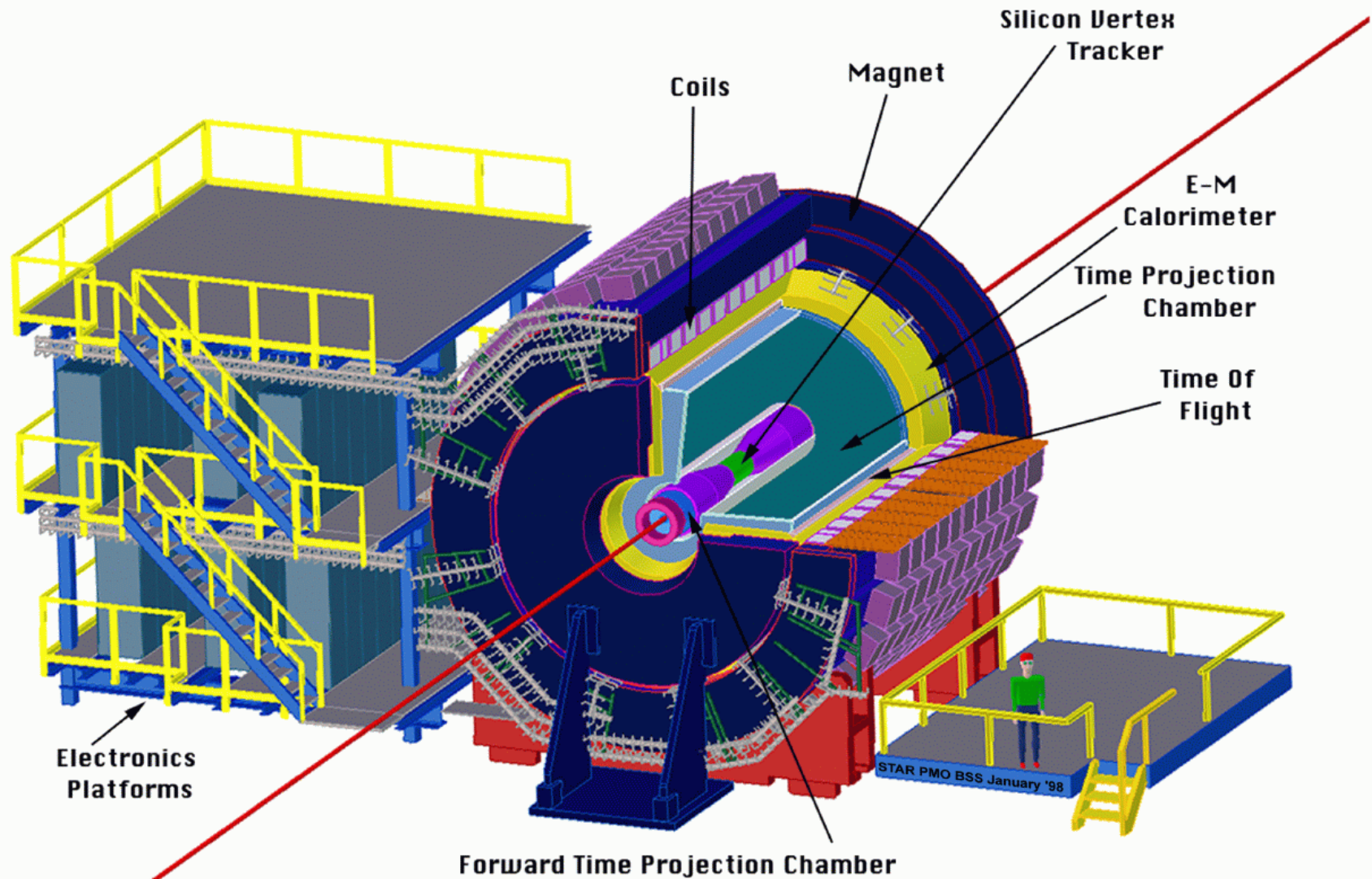


# Rejestracja cząstek

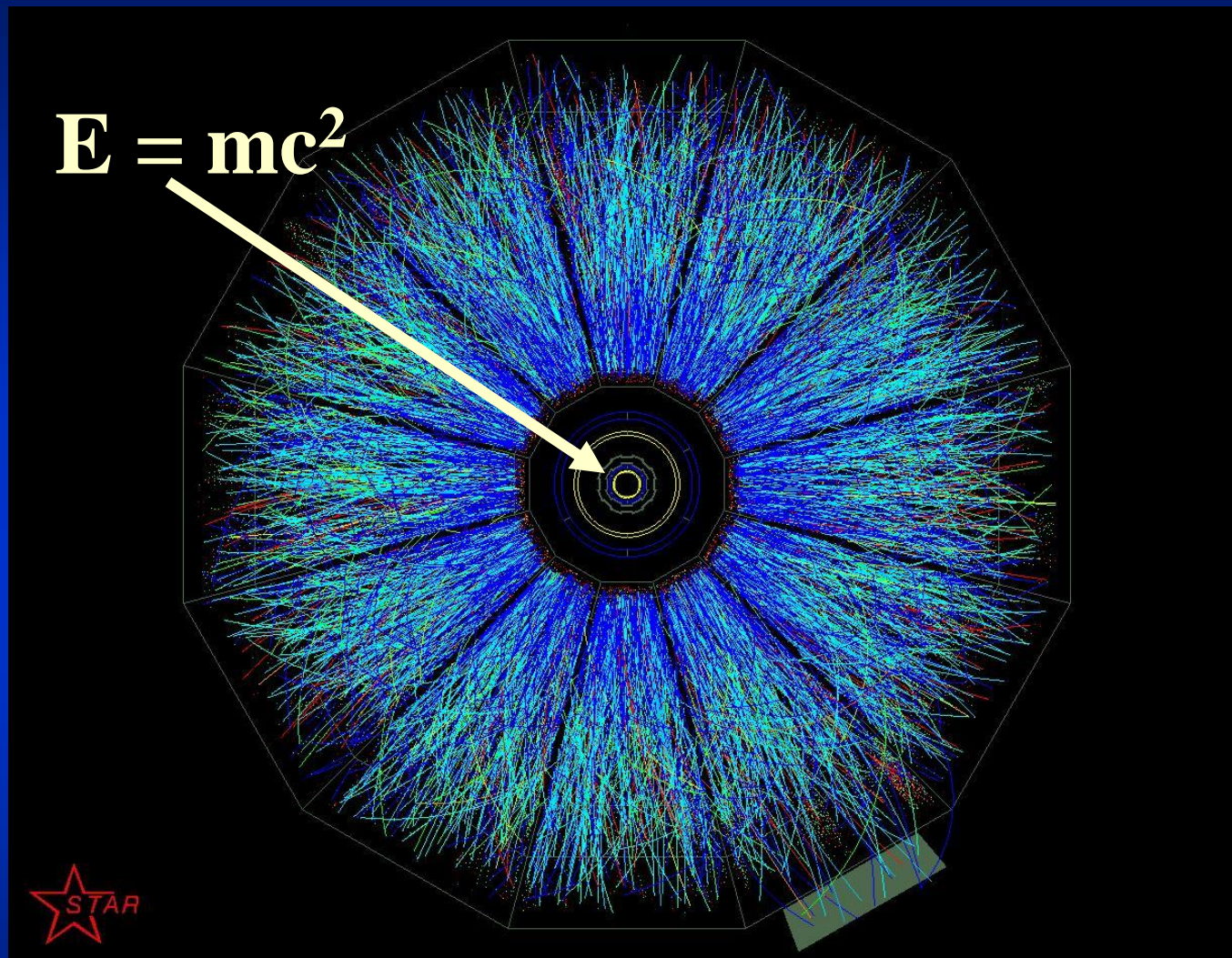


**Cztery eksperymenty na zderzaczu RHIC**

# Rejestracja cząstek STAR Detector



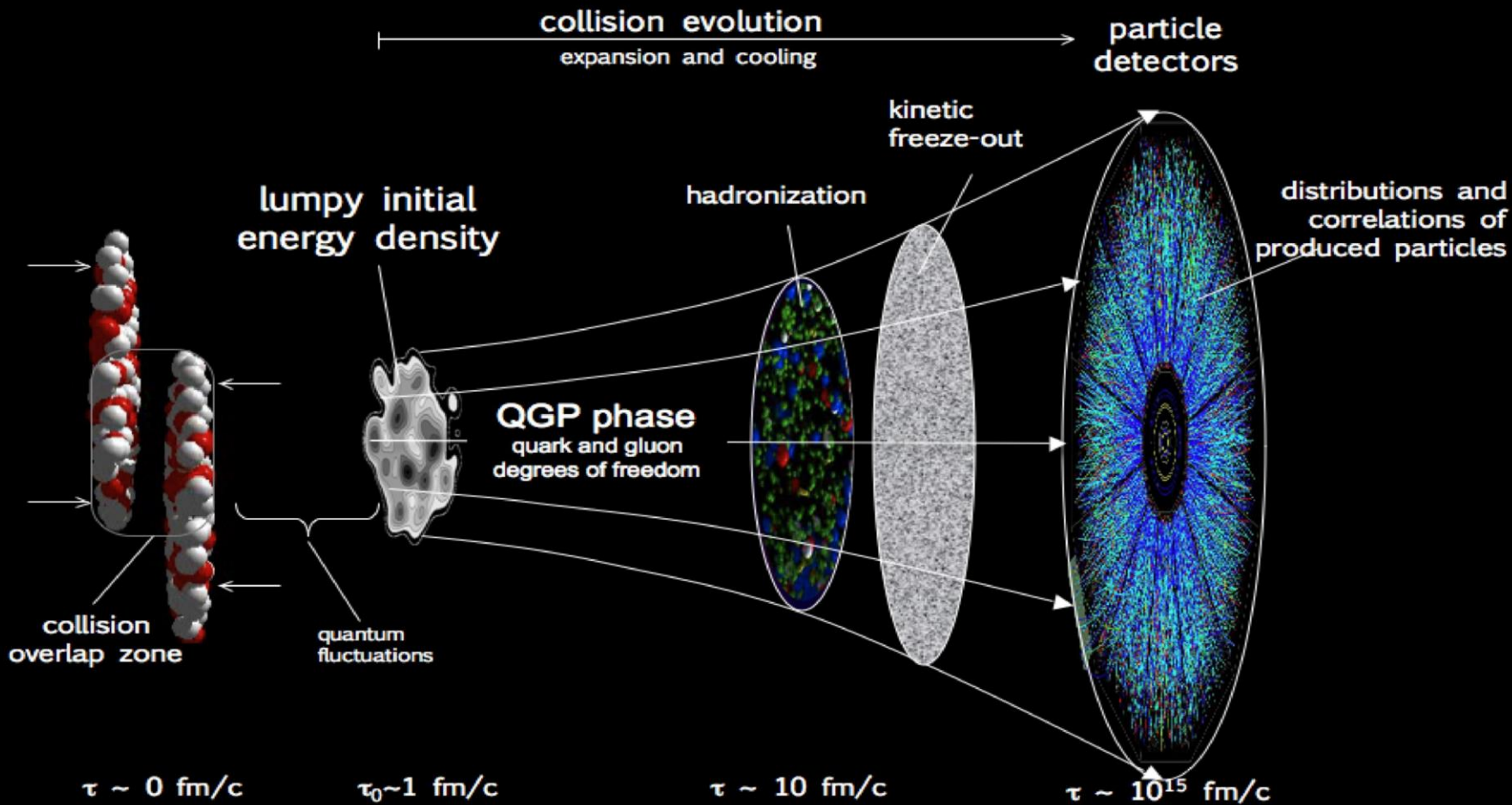
# Ekperyment STAR



Zamiana energii w masę

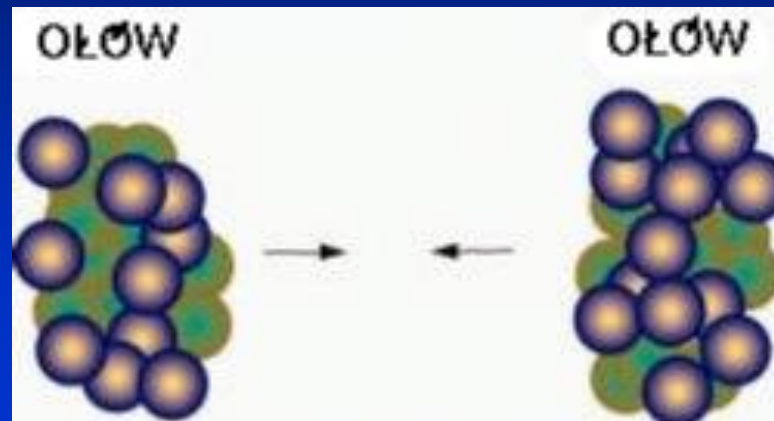
# Skale czasowe zderzenia

## Nuclear collisions and the QGP expansion

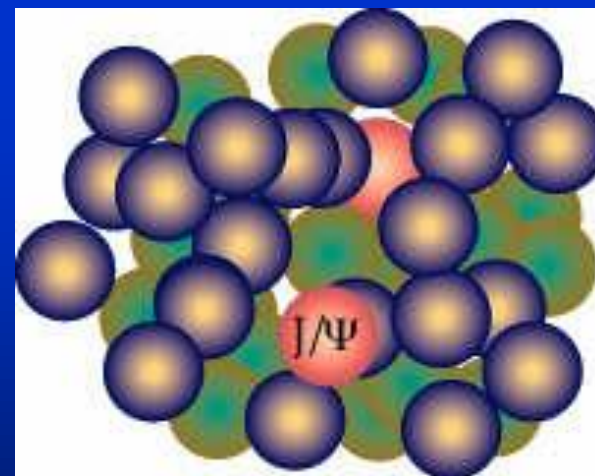


# W poszukiwaniu plazmy kwarkowo-gluonowej...

W zderzeniu dwóch jąder ołowiu...



...mogą powstać nowe cząstki  
zwane J/Ψ



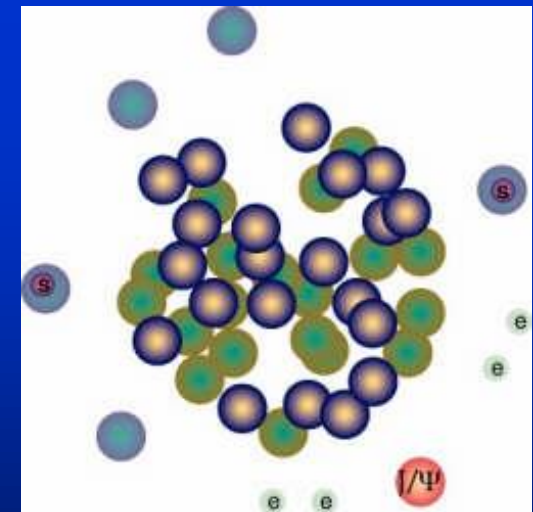
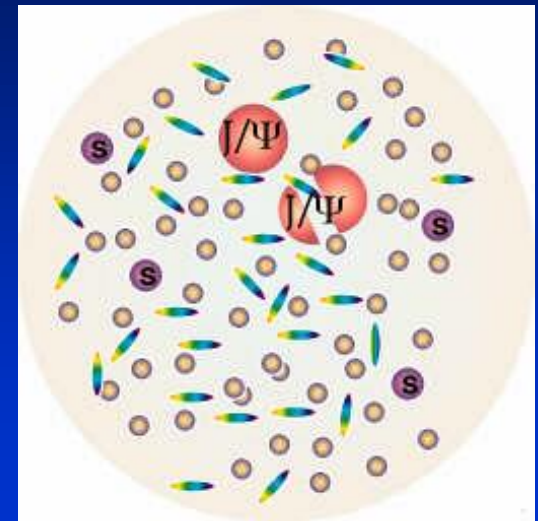
<http://info.fuw.edu.pl/~ajduk/Public/SCIENCE/qgp.html>



# W poszukiwaniu plazmy kwarkowo-gluonowej...

Jeśli w zderzeniu powstanie plazma kwarkowo-gluonowa, to niektóre cząstki  $J/\Psi$  ulegną zniszczeniu, za to powstaną inne cząstki – kwarki dziwne. Pojawi się też więcej cząstek rozpadających się na pary elektronowe.

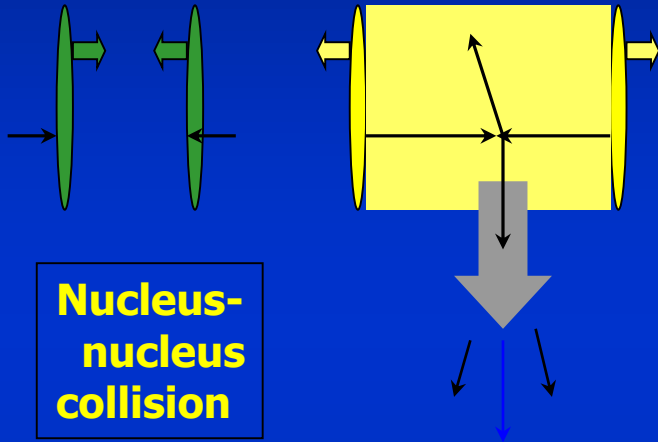
Badając, ile i jakich cząstek powstało w zderzeniu, możemy stwierdzić, czy uformowała się plazma kwarkowo-gluonowa i jak ewoluowała.



<http://info.fuw.edu.pl/~ajduk/Public/SCIENCE/qgp.html>

ośrodek?

Medium?



Nucleus-  
nucleus  
collision

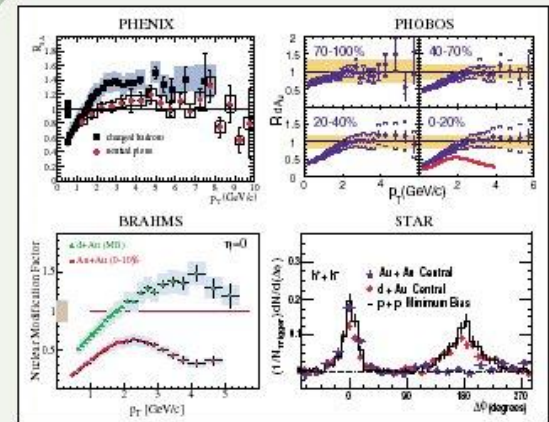
Zderzenie jądro-jądro

Quark Matter 2004, Oakland CA

# PHYSICAL REVIEW LETTERS

Articles published week ending  
15 AUGUST 2003

Volume 91, Number 7



Member Subscription Copy  
Library or Other Institutional Use Prohibited Until 2008

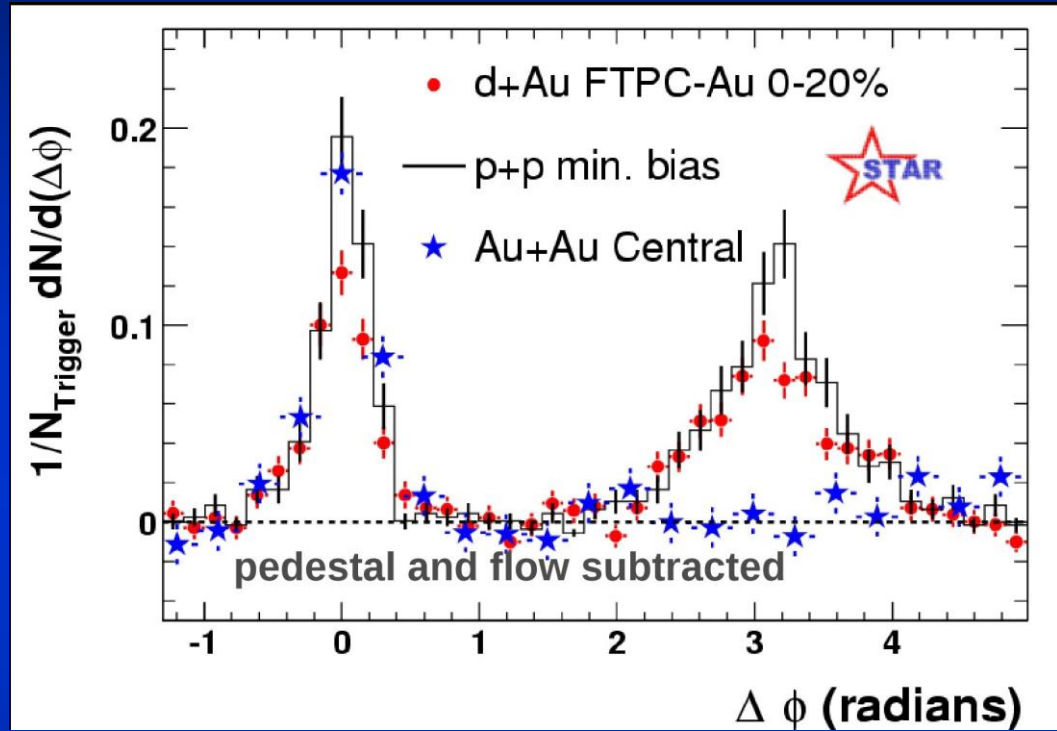
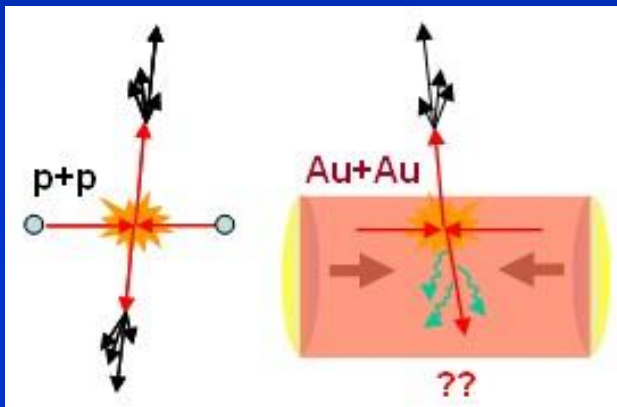


Published by The American Physical Society

Thomas K Hemmick, Stony  
Brook University



# Tłumienie jetów w zderzeniach Au-Au



**KONIEC** poszukiwań plazmy kwarkowo-gluonowej

**The END of searching for the QGP**

**POCZĄTEK** badania jej własności

The **BEGINNING** of measuring its properties

- 12D Correlations
- Heavy Quarks
- Direct Photons
- Leptons
- and its relation to CGC

Color glass condensate

Miklos Gyulassy,  
Columbia University

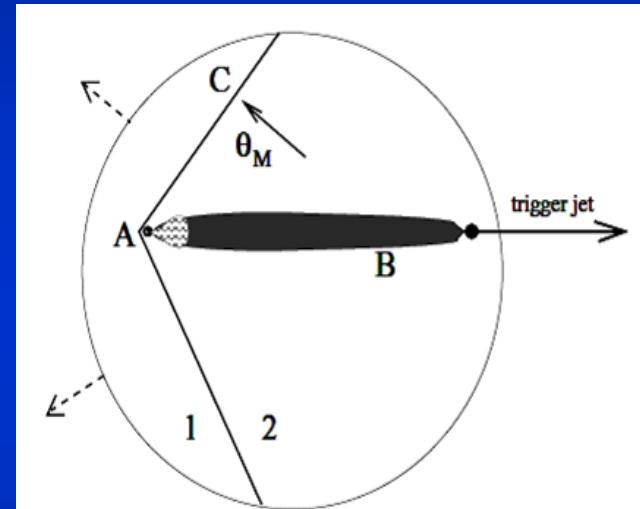
Quark Matter 2004, Oakland CA

# Sonic boom from quenched jets

Casalderrey,ES,Teaney, hep-ph/0410067; H.Stocker...

- the energy deposited by jets into liquid-like strongly coupled QGP must go into conical shock waves

Wake effect or “sonic boom”



Plazma kwarkowo-gluonowa ma  
własności podobne do cieczy.

Quark Matter 2005, Budapeszt

Edward Shuryak

State University of New York

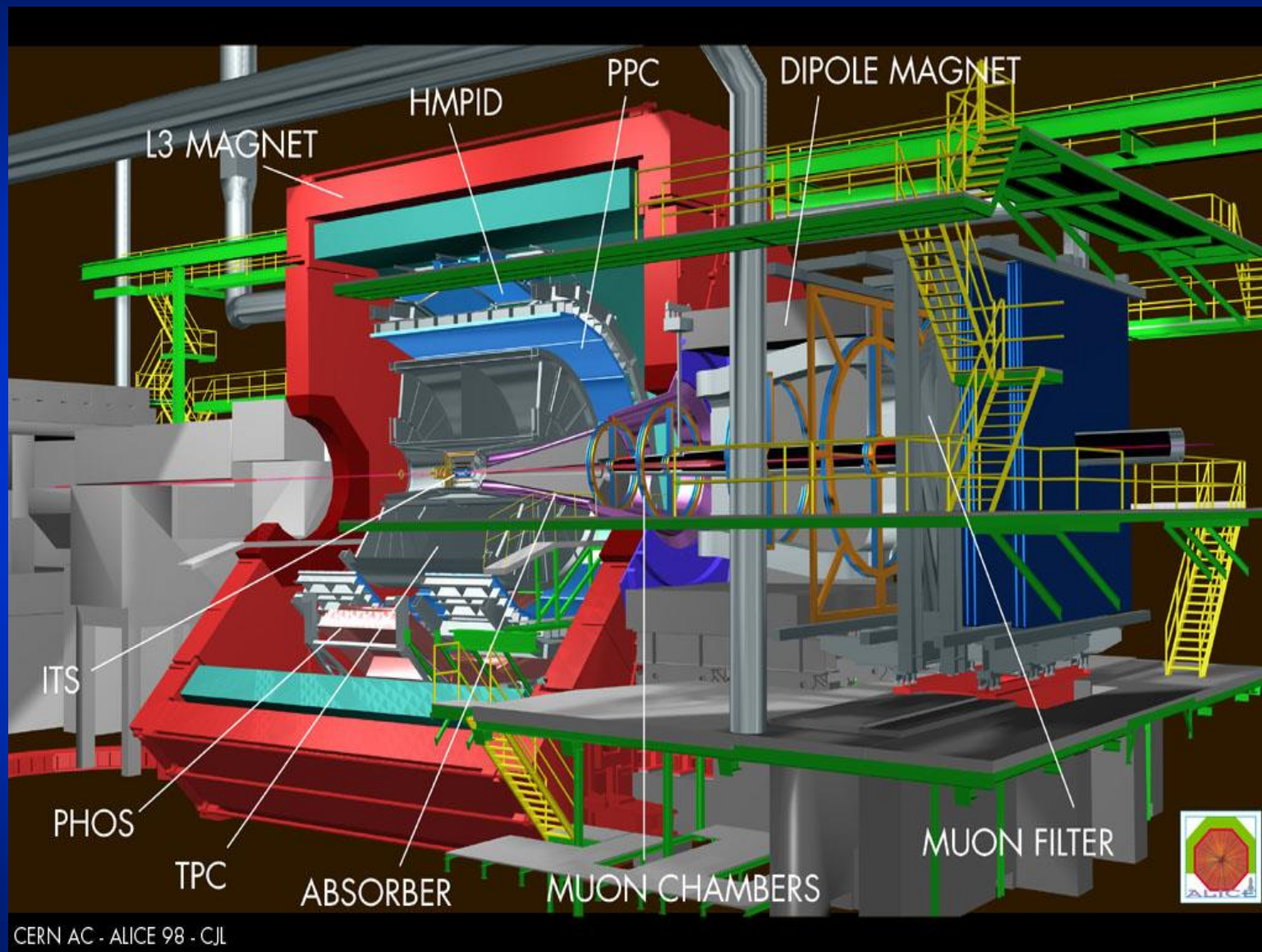
# LHC (Large Hadron Collider) – 2009r.

## Wielki Zderzacz Jonów

CERN Genewa (Szwajcaria/ Francja)

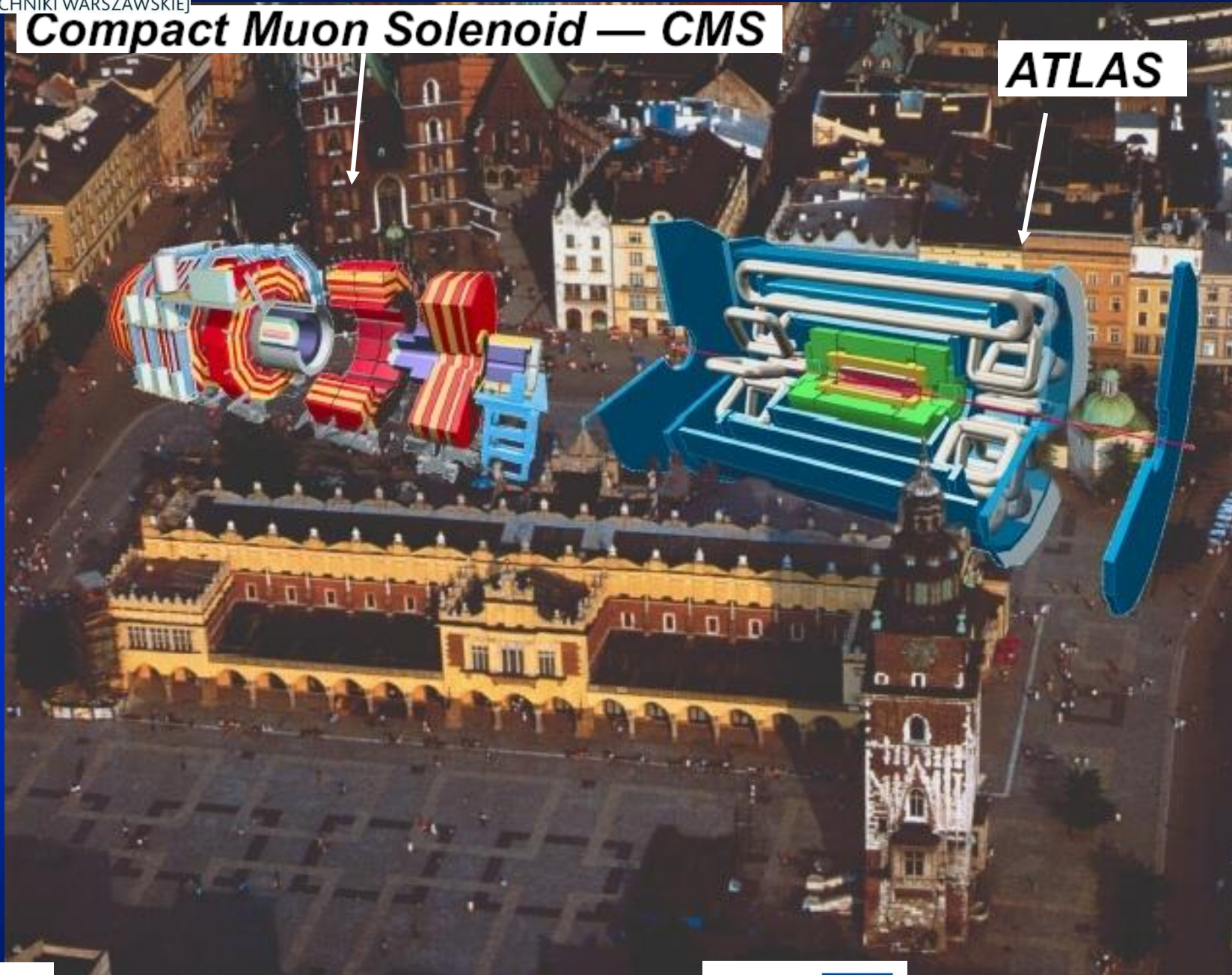


# Eksperyment ALICE



# Compact Muon Solenoid — CMS

ATLAS





# Nowe możliwości badania materii

## RHIC      LHC

•Energia (GeV)	200	5500	28 razy
•Liczba rejestrowanych cząstek	850	1500-8000	?
•Temperatura ( $T/T_c$ )	1,9	3,0-4,2	goręcej
•Gęstość energii ( $\text{GeV}/\text{fm}^3$ )	5	15-60	gęściej
•Czas „życia” plazmy kwarkowo-gluonowej (fm/c)	2 - 4	$\geq 10$	dłużej

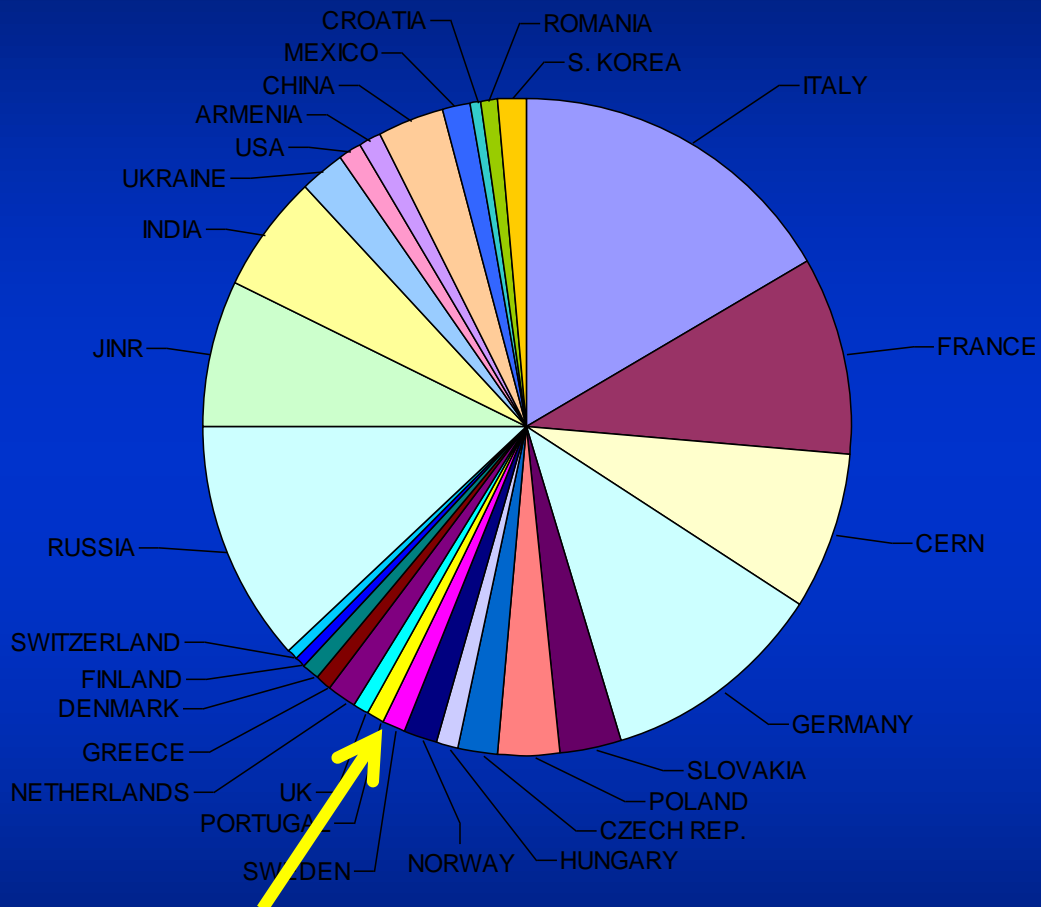
Quark Matter 2004, Oakland CA

Yves Schutz

# Eksperyment ALICE

**937 naukowców**  
**77 instytutów**  
**28 krajów**

*Grupa naukowców i  
studentów z  
Wydziału Fizyki P.W.*



**Animacja przedstawia zderzenie jąder  
ołowiu przy energii 5,5 TeV**