



Wczesny Wszechświat w Laboratorium

Nasz Wszechświat ma około 13.6 miliarda lat i temperaturę 2.7 Kelvina.

Rozszerza się podobnie do powierzchni nadmuchiwanego balonu a więc obiekty oddalają się od siebie z prędkością proporcjonalna do odległości, obecnie ~ 23 km/s na milion lat świetlnych.

Obserwacje astronomiczne, mierzące fluktuacje temperatury relikтового promieniowania podczerwonego "pokazują"

Wszechświat z okresu kiedy miał około 1 promil obecnej wielkości, temperaturę 3000 K, i wiek około 300 000 lat. Co było wcześniej ? Około 1 pikosekundę po

Wielkim Wybuchu temperatura wynosiła 10^{17} K co odpowiada energii na cząstkę około Tera-elektronowolta, 10^{12} elektronowolt. Te energie jesteśmy

obecnie w stanie odtwarzać w zderzaczach cząstek, np w Wielkim Zderzaczu Hadronów

w CERNIE, odtwarzając tym samym warunki wczesnego Wszechświata w laboratorium. Dzięki tym

eksperymentom udało nam się wytworzyć i zbadać wszystkie cząstki

Modelu Standardowego i zbadać przewidywania tego modelu z niezwykłą

dokładnością. Tym niemniej obserwacje astronomiczne pokazują że w obecnym Wszechświecie jest

"wagowo" pięć razy więcej dość tajemniczej Ciemnej Materii niż

materii Modelu Standardowego. Model Standardowy nie wyjaśnia także dlaczego

nasza materia w ogóle istnieje, a nie zanihilowała całkowicie

z antymateria we wczesnym Wszechświecie. Czy uda nam się rozwiązać te i inne

zagadki Wczesnego Wszechświata reprodukując "miniaturowe wielkie wybuchy" w

zderzaczach cząstek ? W jaki sposób "patrzeć" na te zderzenia aby odwickać tajemnice?

Disclaimer: I am a member of ATLAS Collaboration, but this is not an ATLAS talk.

Plan

- 1) Wszechświat kiedyś i dziś.
- 2) Nasze Laboratorium
- 4) Lista tajemnic.
- 3) Jak patrzeć na zderzenia aby się czego interesującego dowiedzieć, trzy przykłady.

Wczesny Wszechświat w Laboratorium, projekt



Norway
grants



NATIONAL SCIENCE CENTRE
POLAND

The research leading to the results presented in this talk has received funding from the Norwegian Financial Mechanism for years 2014-2021, grant nr 2019/34/H/ST2/00707



Understanding the Early Universe:
interplay of theory and collider experiments

Joint research project between the University of Warsaw & University of Bergen

Teoria & Eksperyment

<https://www.fuw.edu.pl/~ksakurai/grieg/index.html>

Wszechświat, Edwin Hubble i “redshift”

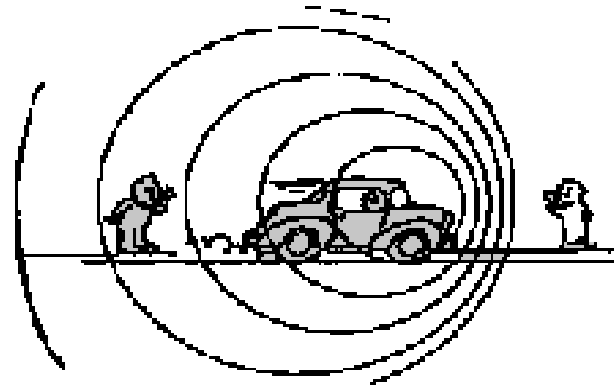


(1889-1953)

Obserwatorium
na Mount Wilson
Pasadena, CA

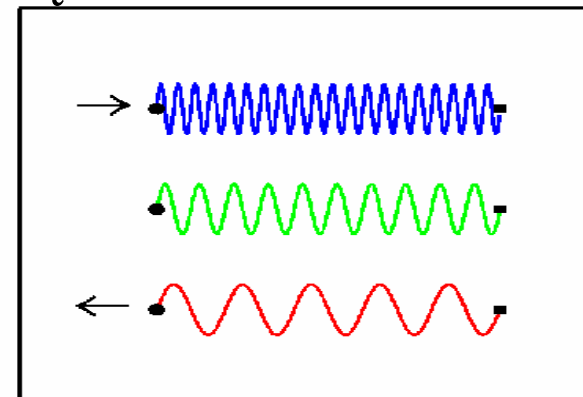
Ogłosił w 1924,
ze światło z Galaktyk
jest przesunięte
w kierunku czerwieni:
“redshifted”

Efekt Dopplera



“Te same fale świetlne” wysłane przez
obiekty oddalające od nas się
mają dla nas większa długość

-> są “redshifted”

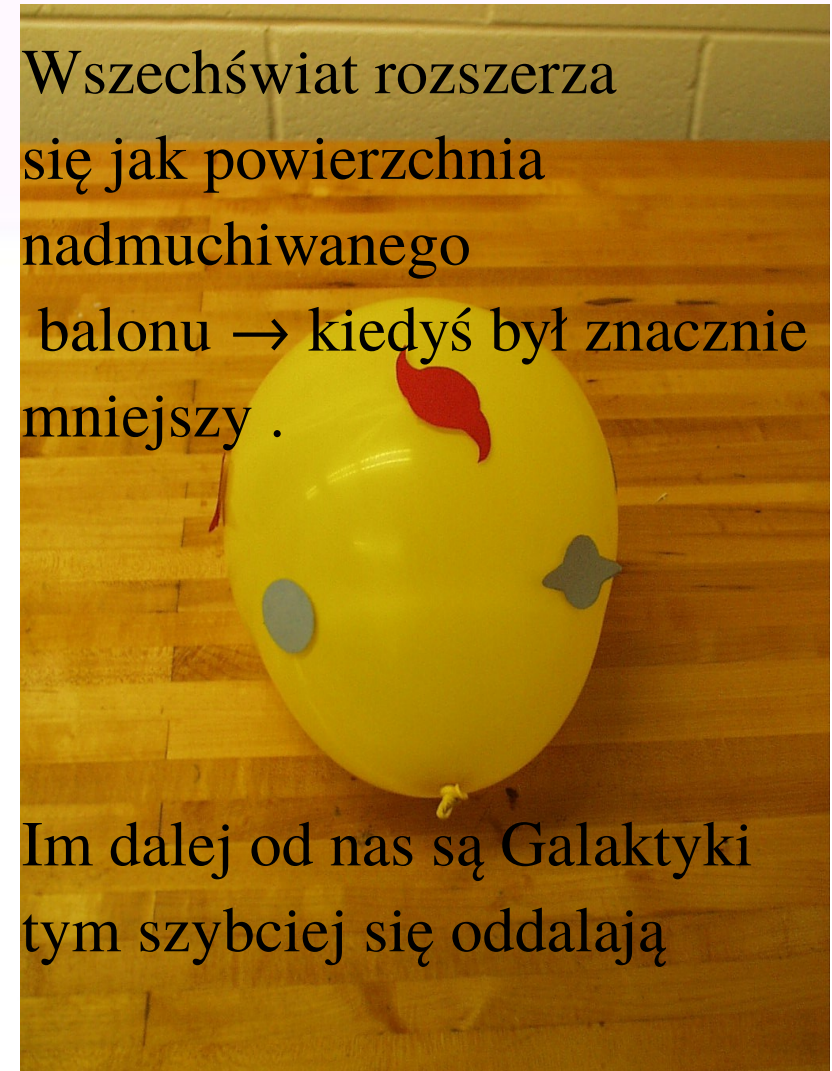
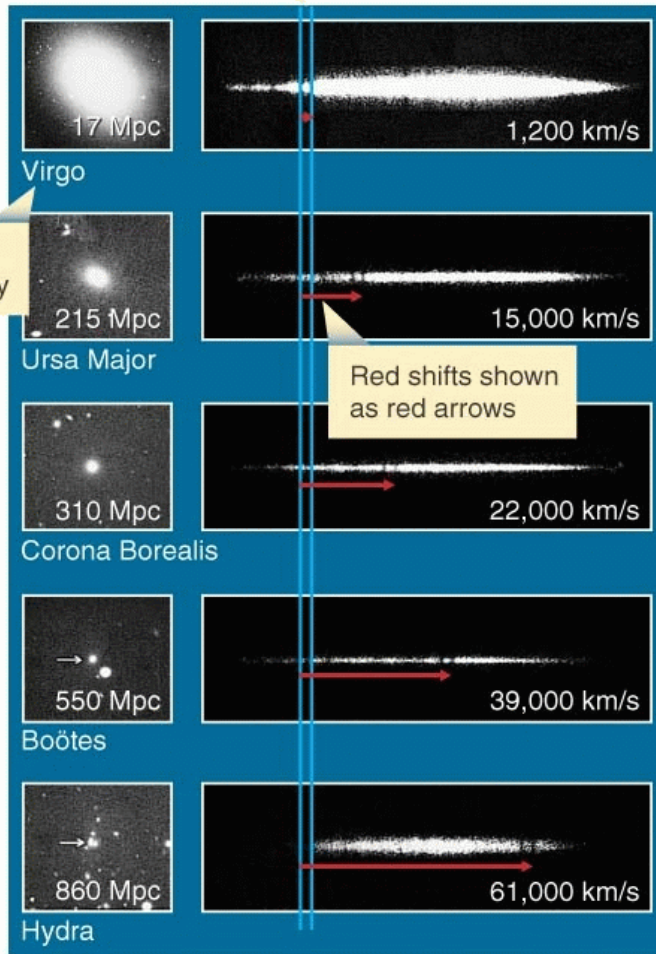


Wszechświat się rozszerza : „puchnięcie” wg Hubble

$$H \sim \frac{R(t)}{R(t)} = \left[\frac{km/s}{MPC} \right] \sim 70 \frac{km/s}{MPC}$$

Linia absorpcji przez wapn

Unshifted position of calcium lines



Wszechświat rozszerza się jak powierzchnia nadmuchiwane balonu → kiedyś był znacznie mniejszy .

Im dalej od nas są Galaktyki tym szybciej się oddalają

MPC=megaparsec ~ 3 miliony lat świetlnych

Fotografia „małego” Wszechświata: Nobel 2006, reliktowe promieniowanie podczerwone

Press Release

3 October 2006

Nagroda Nobla Nobel 2006 z fizyki dla

John C. Mather

NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, MD, USA,

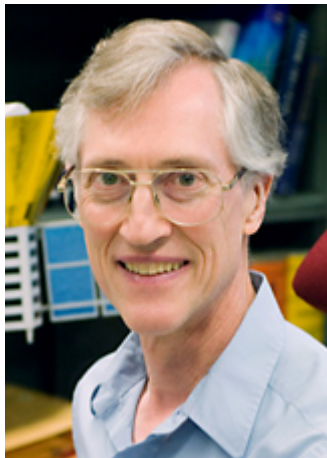
and

George F. Smoot

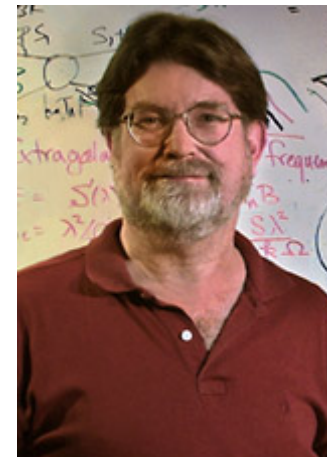
University of California, Berkeley, CA, USA

"for their discovery of the blackbody form and anisotropy of the cosmic microwave background radiation

Za odkrycie formy widma i anizotropii mikrofalowego kosmicznego promieniowania relikowego ".



"I think of it as the accumulated trace of everything"



"In human terms ... it's like looking at an embryo that's a few hours old"

Satelita COBE

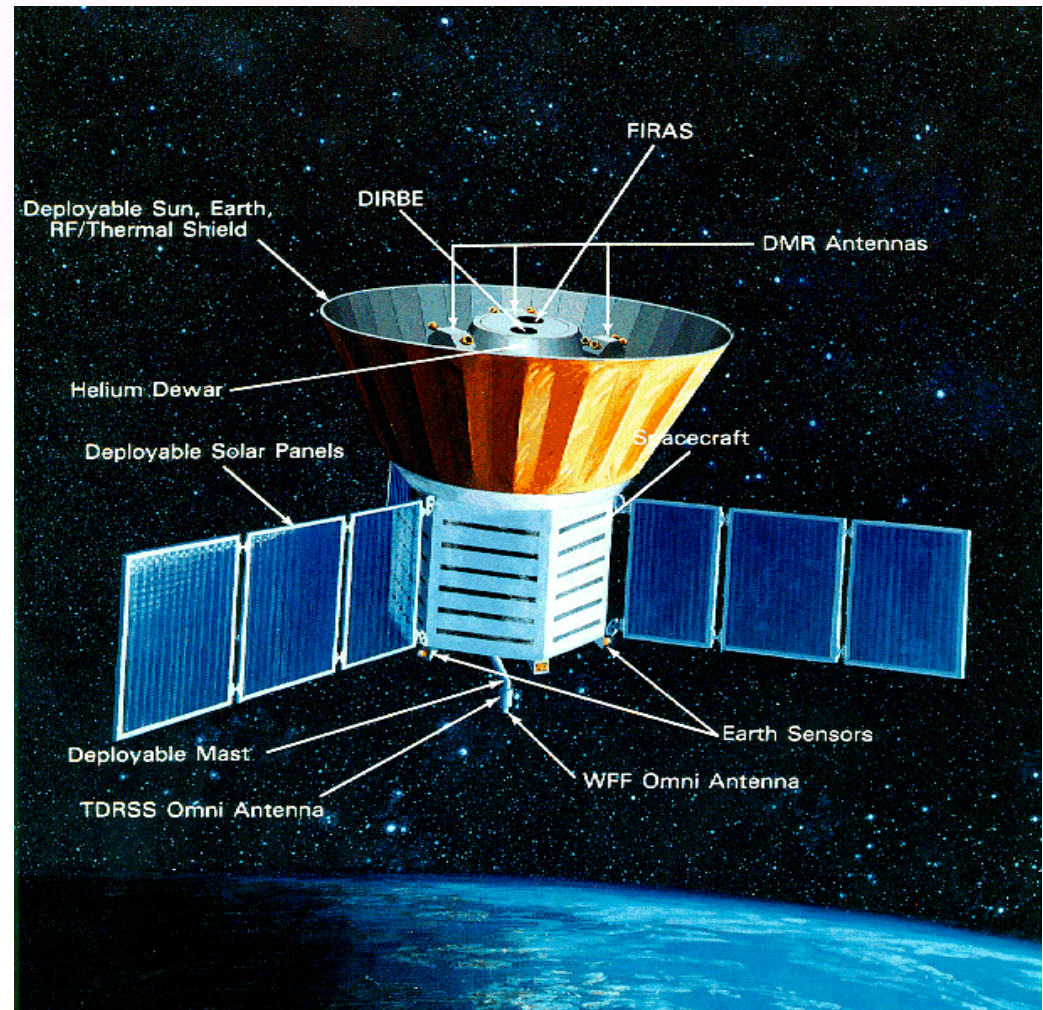
The COsmic Background Explorer, wysłany przez NASA w 1989, pierwszy precyzyjny pomiar rozkładu długości fal kosmicznego mikrofalowego promieniowania relikтового

Trzy różne detektory promieniowania pokrywające długości fali 1 mikrona to 1 cm.

DIRBE : Diffuse Infrared Background Experiment. (background)

FIRAS : Far Infrared Absolute Spectrometer (black body, John Mather)

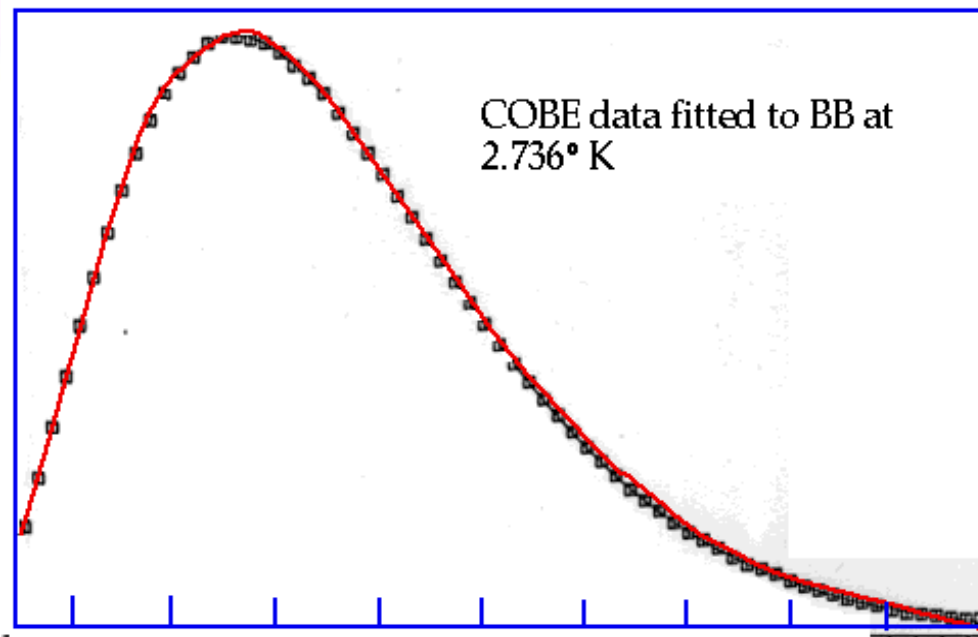
DMR: differential microwave radiometer (anisotropy, George Smoot)



COBE, najdokładniejsze na świecie widmo promieniowania ciała doskonale czarnego w 9 minut !

Dopasowanie formy daje temperaturę Wszechświata dzisiaj = 2.736 K.

światłność



długość fali

Wszechświat kiedyś i dziś i ciało doskonale czarne

Wszystkie przyspieszające (spowalniające) cząstki naładowane emitują promieniowanie.

Gorące **substancje świecą dzięki „podgrzanym” elektronom.**

Promieniowanie ciała doskonale czarnego (Black Body radiation):

Równowaga : promieniowanie wyemitowane= absorbowane .. tylko trochę „wycieka”.

Dobre przybliżenie dla wnętrza kuchenki, gwiazd **....i Wszechświata.**

Po 300,000 latach temperatura spada ~ 3000 K i atomy się mogły sformować.

Promieniowanie propaguje się niezależnie od materii. Kształt widma promieniowania jest zachowany, tylko temperatura spada.

Entropia gazu fotonów: **Wszechświat 1000 razy cieplejszy był 1000 razy mniejszy.**

1000 razy mniejszy Wszechświat powinien zajmować 0.6 deg naszego nieba (?)

Small thermal physics exercise: Assume that the photon gas expands at a constant entropy (constant number of available states). What was the radius of the Universe at 3000 K ?

$$entropy \sim VT^3 = (RT)^3 \rightarrow R_{3000K} \times 3000K = R_{now} \times 3K.$$

$$R_{3000K} = \frac{R_{now}}{1000}$$

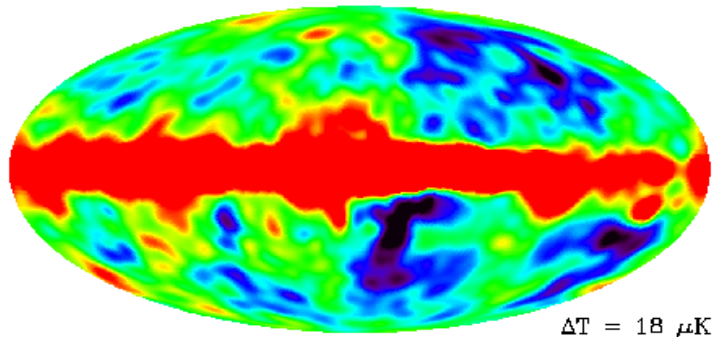
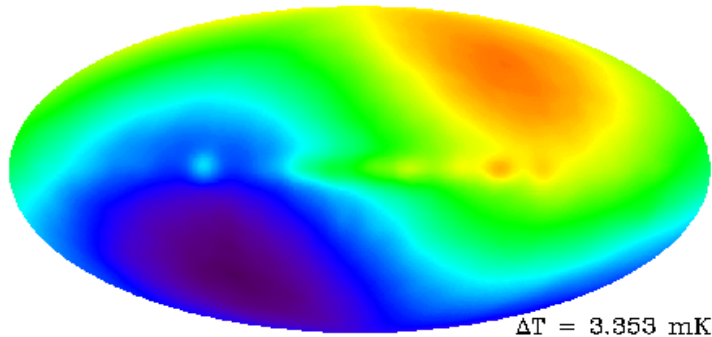
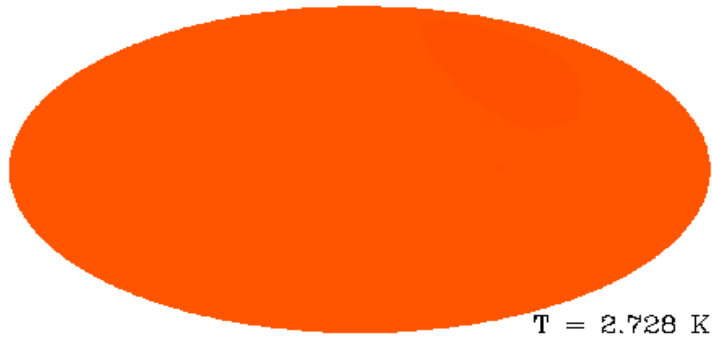
3000K Universe would take ~ 0.6 deg of our sky... ↑

If the temperature now is 3K the Universe was 1000 times smaller at “decoupling”. Is it ?

Wszechświat dziś: małe odchylenia od średniej temperatury promieniowania z których można się dużo dowiedzieć.

(Współrzędne Galaktyczne)

Black Body: średnia temperatura



Odchylenia rzędu tysięcznych części stopnia (K) : ruch Ziemi względem systemu promieniowania (Efekt Dopplera)

Odchylenia rzędu milionowych części (K) : niosą bardzo interesujące informacje.

Ale rozdzielczość COBE's była tylko 7 stopni kątowych (deg)

Co zapisało się w odchyleniach temperatury promieniowania?

Prawie wszystko co w jakiś sposób oddziaływało z promieniowaniem.

- fluktuacje kwantowe gęstości energii które później się „zmaterializowały”.
- “skupiska materii” , które później „zaowocowały” Galaktykami
- skala czasowa kiedy materia zaczęła się skupiać i przyciągać za sobą promieniowanie : tak zwany pik akustyczny.
- formowanie się wczesnych gwiazd etc etc

Jak to można wszystko odróżnić ?

Dwa rodzaje parametrów:

Amplituda odchyłeń (mikro-kelvin)

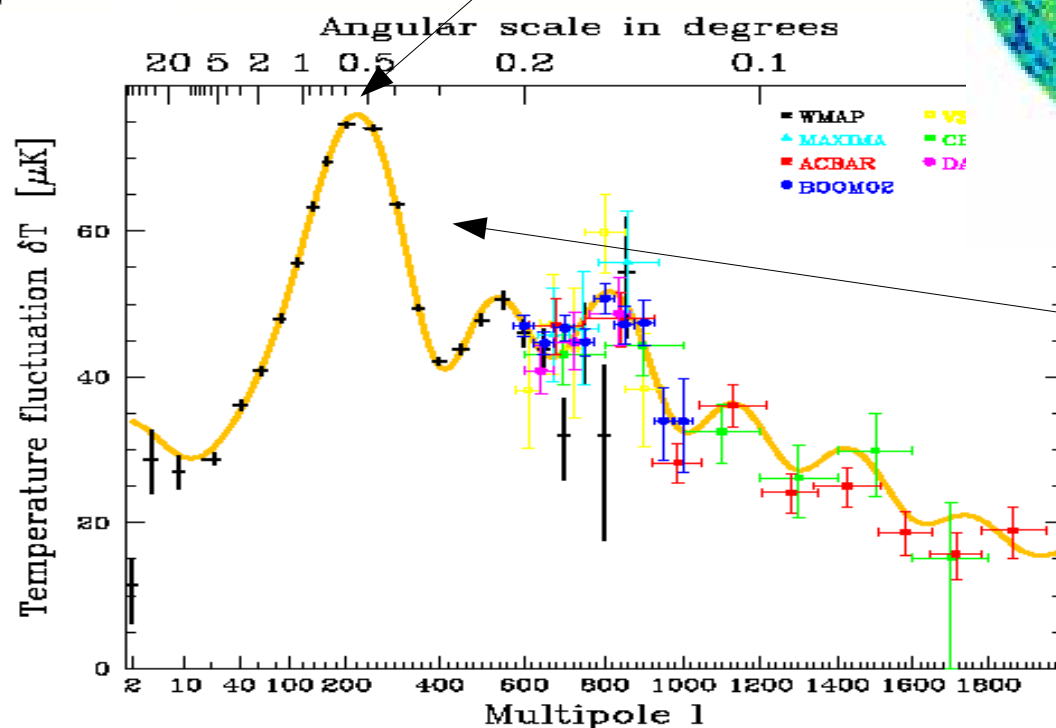
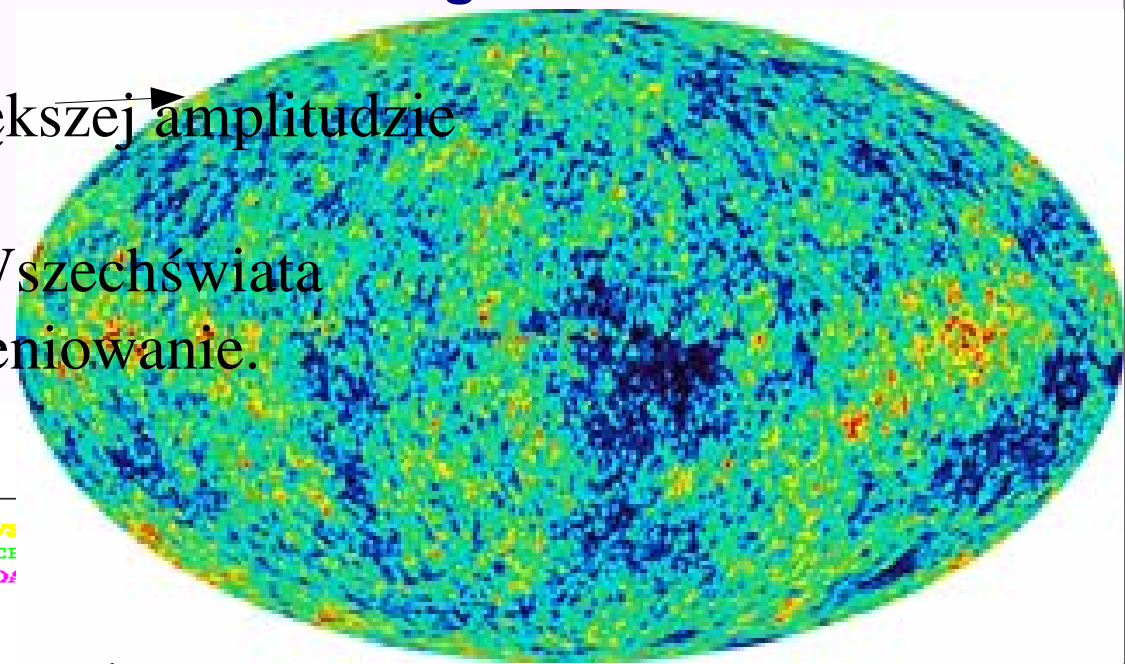
versus rozmiar kątowy odchyłeń (degrees).

**Nowe satelity z większą dokładnością kątową zostały wysłane:
Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP), NASA w
2000. Satelita Planck (ESA, 2009-2013), najprecyzyjniejsze pomiary.**

Wszechświat dawniej i dziś, odchylenia temperatury promieniowania relikтового

Mapa pokazuje odchylenia o największej amplitudzie tak zwany pik akustyczny.

Powstał kiedy materia 300 000 l Wszechświata zaczęła się skupiać, ciągnąc promieniowanie.

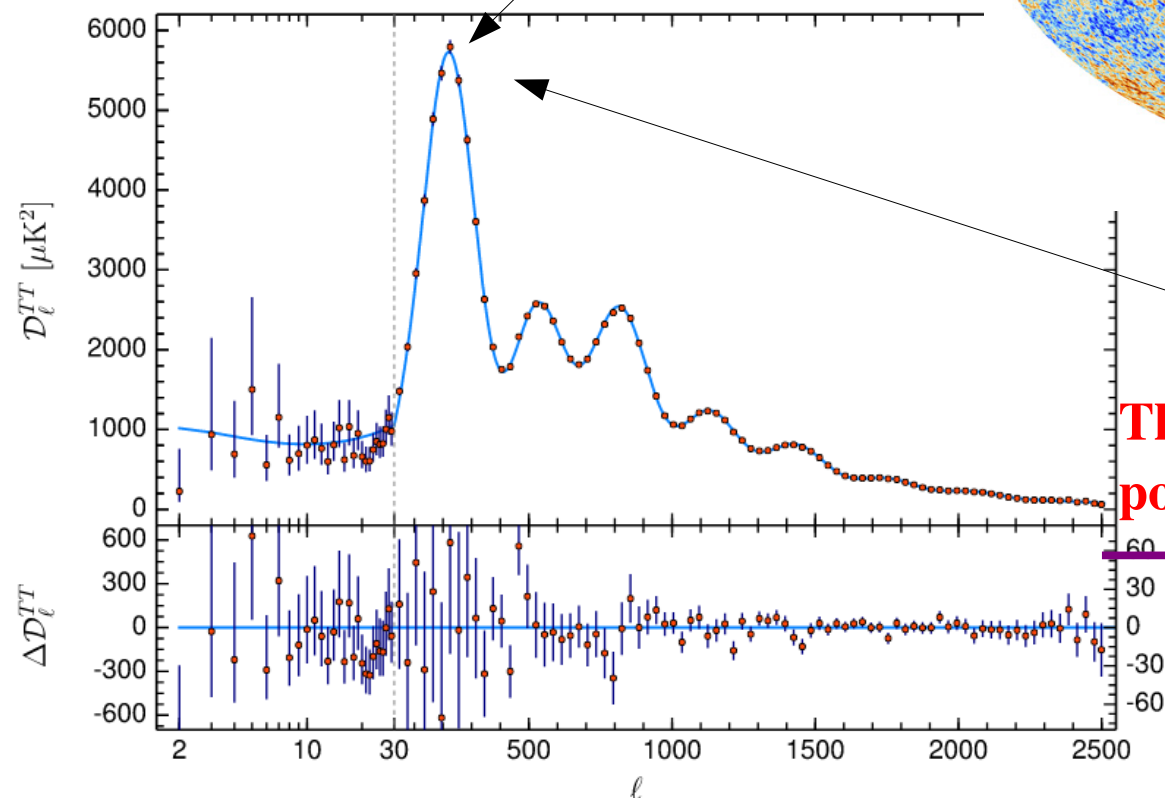
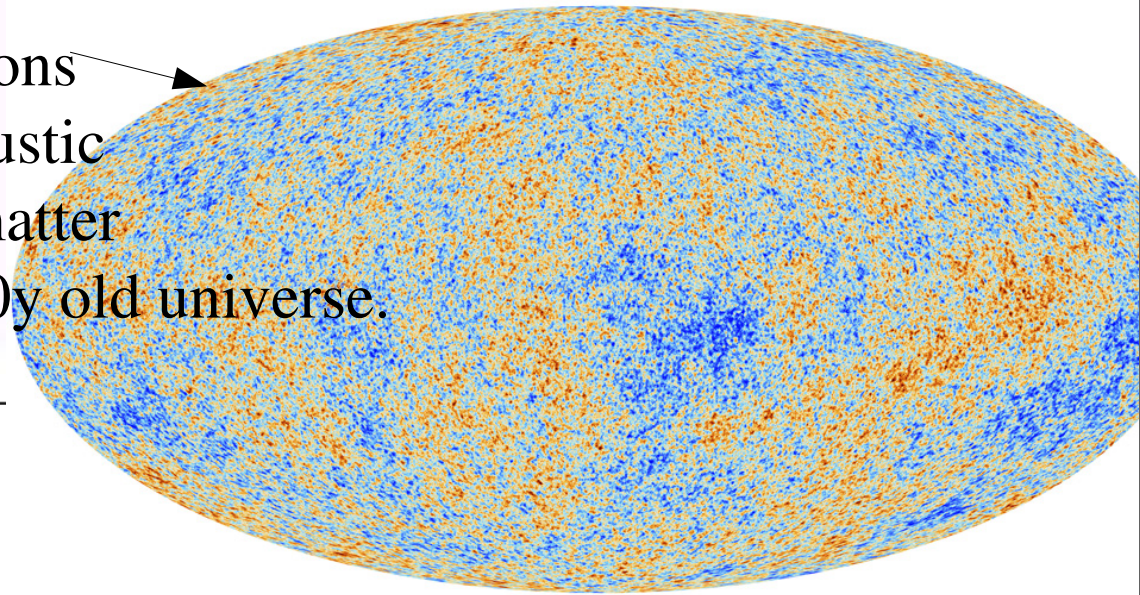


Amplituda mówi ile naładowanej materii- protonów było aby oddziaływać z promieniowaniem

**Rozmiar kątowy (~1 deg) jest taki, jaki 1000 razy mniejszy Wszechświat powinien zajmować na naszym niebie → jeśli światło rozchodzi się po liniach prostych !
Wszechświat ma płaską geometrie !**

Ripples in microwave background radiation (Planck)

What you see here are the fluctuations of highest amplitude, so called acoustic peak, formed when the clumping matter interacted with radiation in 300,000y old universe.

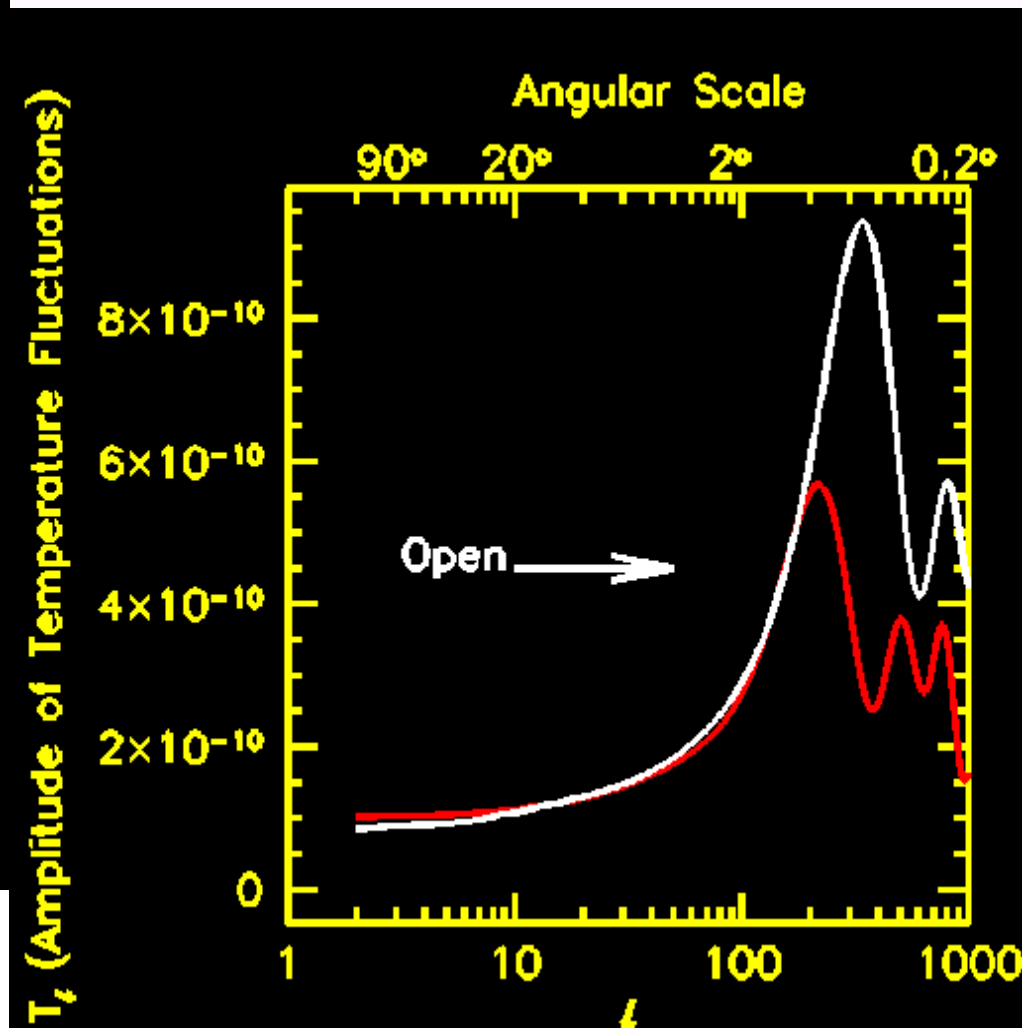
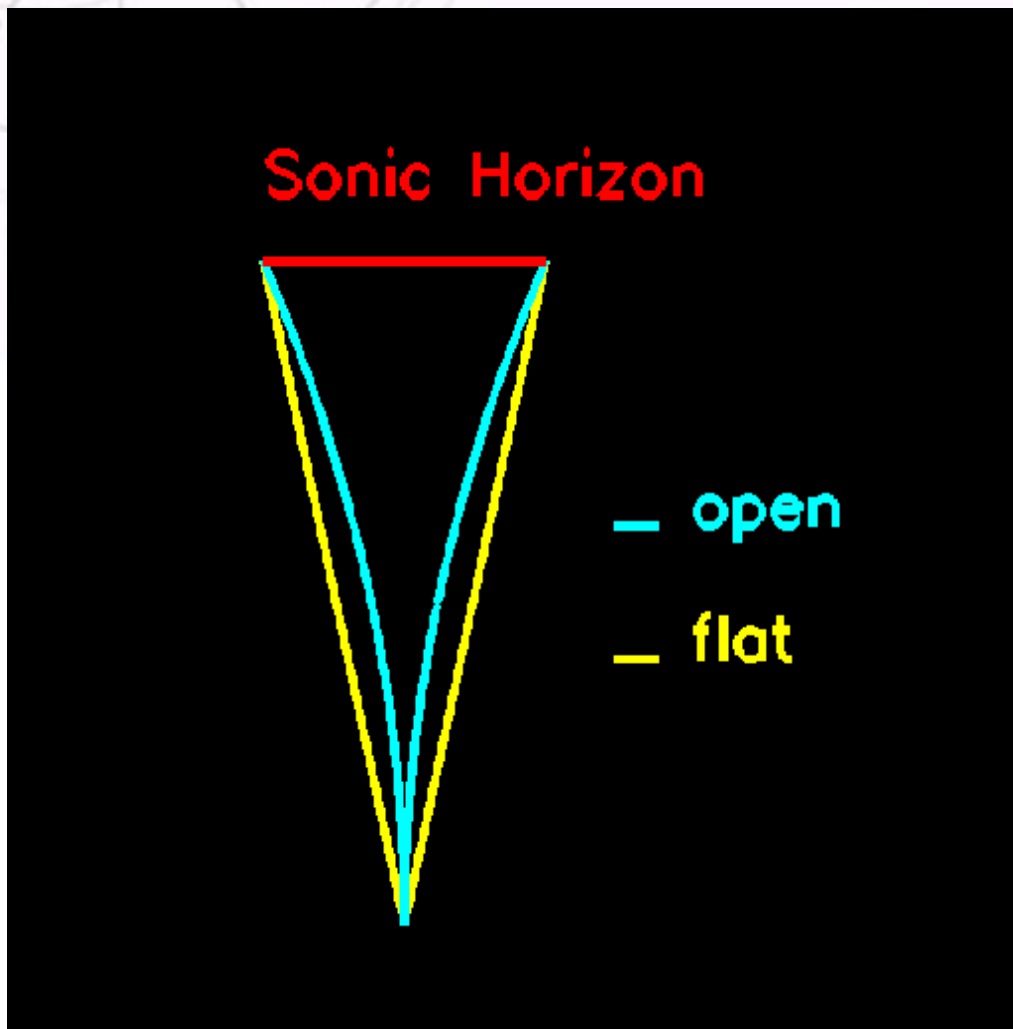


The amplitude of acoustic peak says how much charged matter (baryons) there was to “pull” radiation

The perceived angular size (~1 deg) points to the flat geometry of the Universe.

Size of the ripples from 300,000 years after Big Bang depends on the geometry of the Universe!

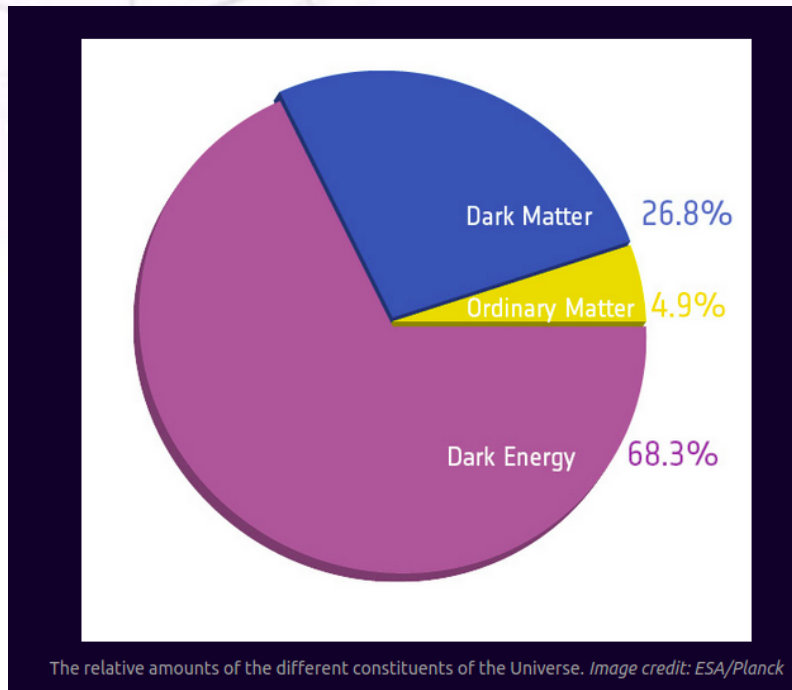
Wczesny Wszechświat w Laboratorium



Z czego się składa nasz Wszechświat ?

(prawie wszystkie informacje poniżej są wyciągnięte z danych satelity Planck)

Nie składa się (prawie) z atomów.



Co to jest Ciemna Energia ?: Nie wiemy.

Przyspiesza puchnięcie Wszechświata

Obserwacje odległych supernowych też na to wskazują

Co to jest Ciemna Materia?: Nie wiemy.

Muszą to być cząstki bez ładunku elektrycznego.

(*prawdopodobnie co najmniej 50 razy cięższe niż protony*).

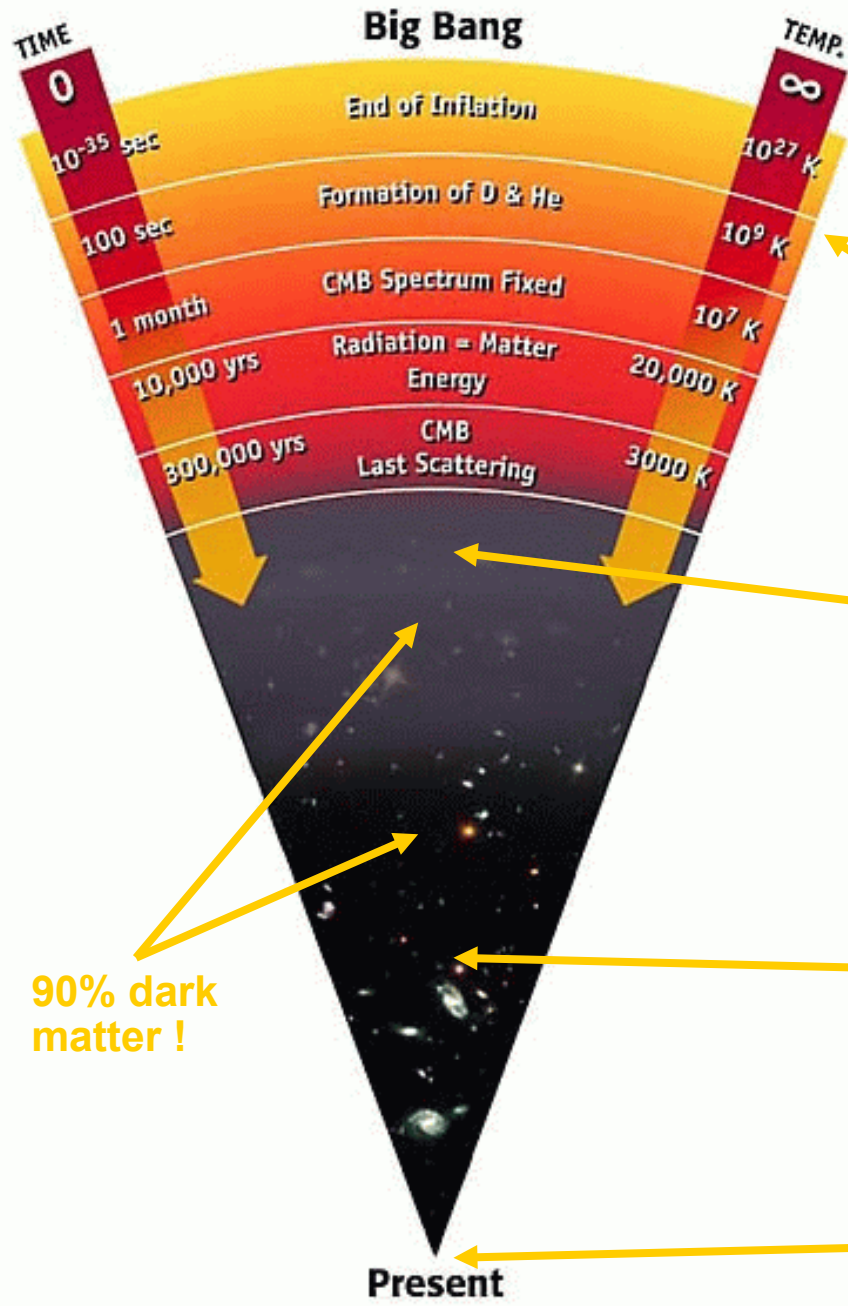
Obserwuje się CM wieloma metodami, przez oddziaływania grawitacyjne.

Lokalna gęstość ~ 0.3 proton mass/cm³

$$\Omega_{\text{tot}} = \Omega_{\text{baryons}} + \Omega_{\text{CDM}} + \Omega_{\Lambda} = 1$$

The Universe is 13.7 +- 1% billion years old and expands at a rate 71+-5% km/s/MPC

and it will most probably expand forever.



Wszechświat od początku do dziś, wizja astronomii/kosmologii

First atomic nuclei

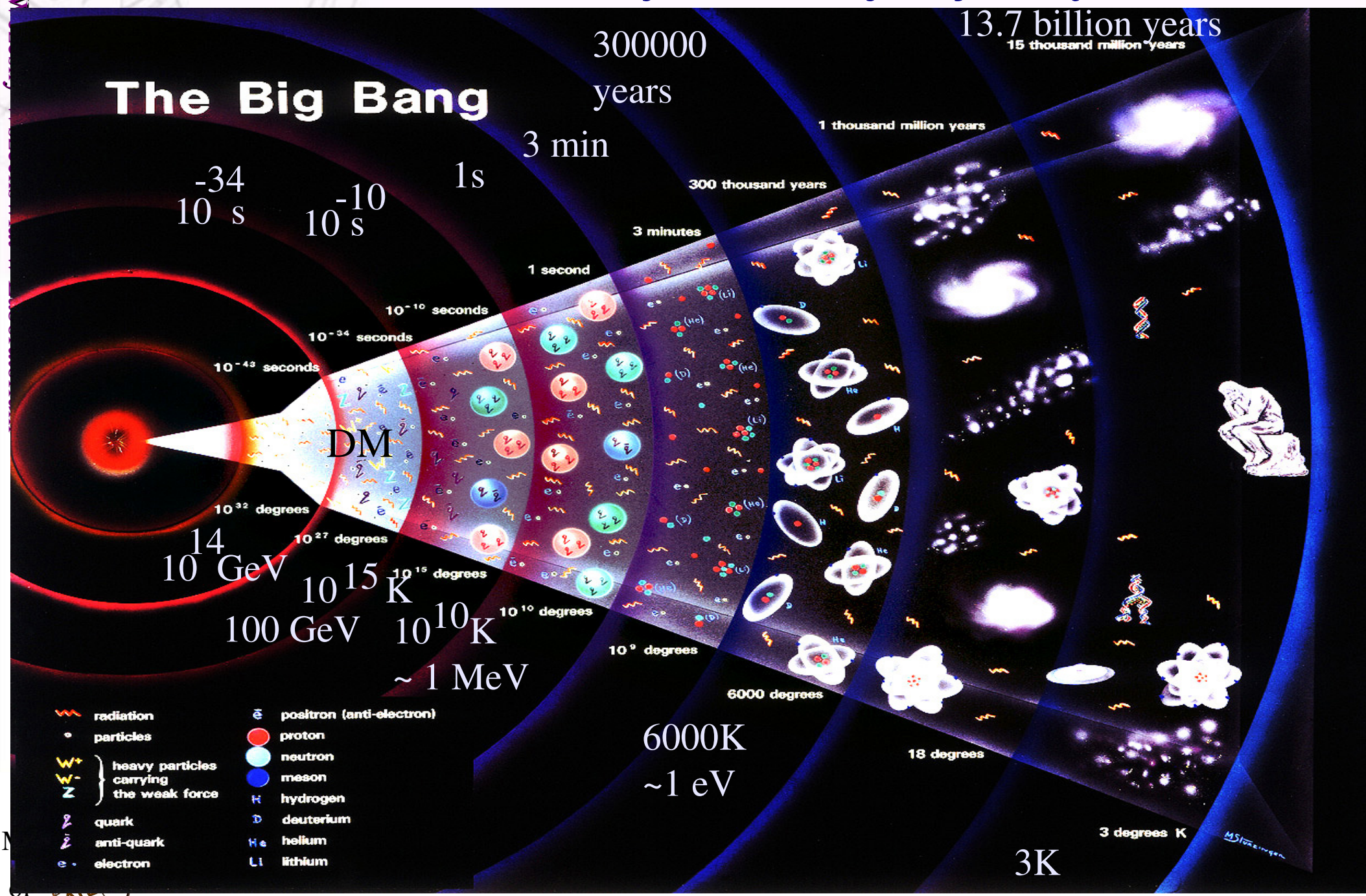
First stars & galaxies form

Solar system forms

- we are here now

90% dark matter !

Wszechświat dawniej i dziś → wizja fizyki cząstek



Wczesny wszechświat w laboratorium?

Odtwórzmy energię/ na cząstkę dostępną we Wczesnym Wszechświecie:

Przyspieszamy cząstki:

Bierzemy łatwo dostępne, stabilne cząstki naładowane.

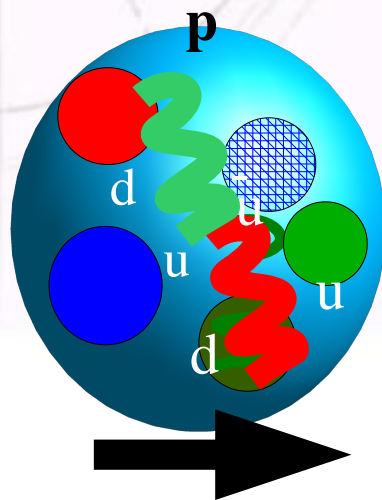
Najlepiej aby nie miały wewnętrznej struktury, ale nie można tu za bardzo grymasić

Zderzamy je ze sobą → „Wielki Wybuch w skali mikro”

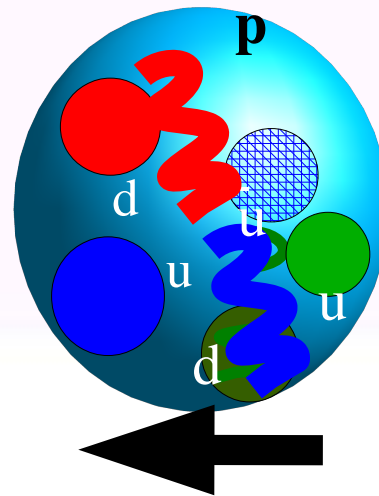
Oczekujemy że cząstki (Ciemna Materia, etc) które istniały w odpowiedniej “epoce energetycznej” zostaną wyprodukowane i odkryjemy je patrząc na serie “Wielkich wybuchów w skali mikro”

(dawniej LEP, teraz LHC → CERN)

Mikro Big Bang w Wielkim Zderzaczu Hadronów (LHC)



6800 GeV



6800 GeV

1) bierzemy protony, łatwo dostępne, tanie i łatwe do przyspieszenia, zderzamy przy najwyższej energii na jaka nas stać. Znany stan początkowy (na ile mechanika kwantowa pozwala) !

2) Stan końcowy musi się rozpaść na znane cząstki i Ciemna Materie. (Tak pokazuje doświadczenie z Wielkiego Wybuchu).

3) rejestrujemy znane cząstki w naszych detektorach. CM „obserwujemy” przy pomocy tzw „energii brakującej” → usiłujemy odwikłać z tego co się stało w zderzeniu.

4) Odsiewamy “mało interesujące” zderzenia-> można je zmierzyć i porównać z tym co zmierzylśmy przy niższych energiach..

Laboratorium,
era Wielkiego Zderzacza Hadronów

2 LHC general experiments

LHC : pp, $E_{\text{cms}} \sim 13600 \text{ GeV}$

2 more special

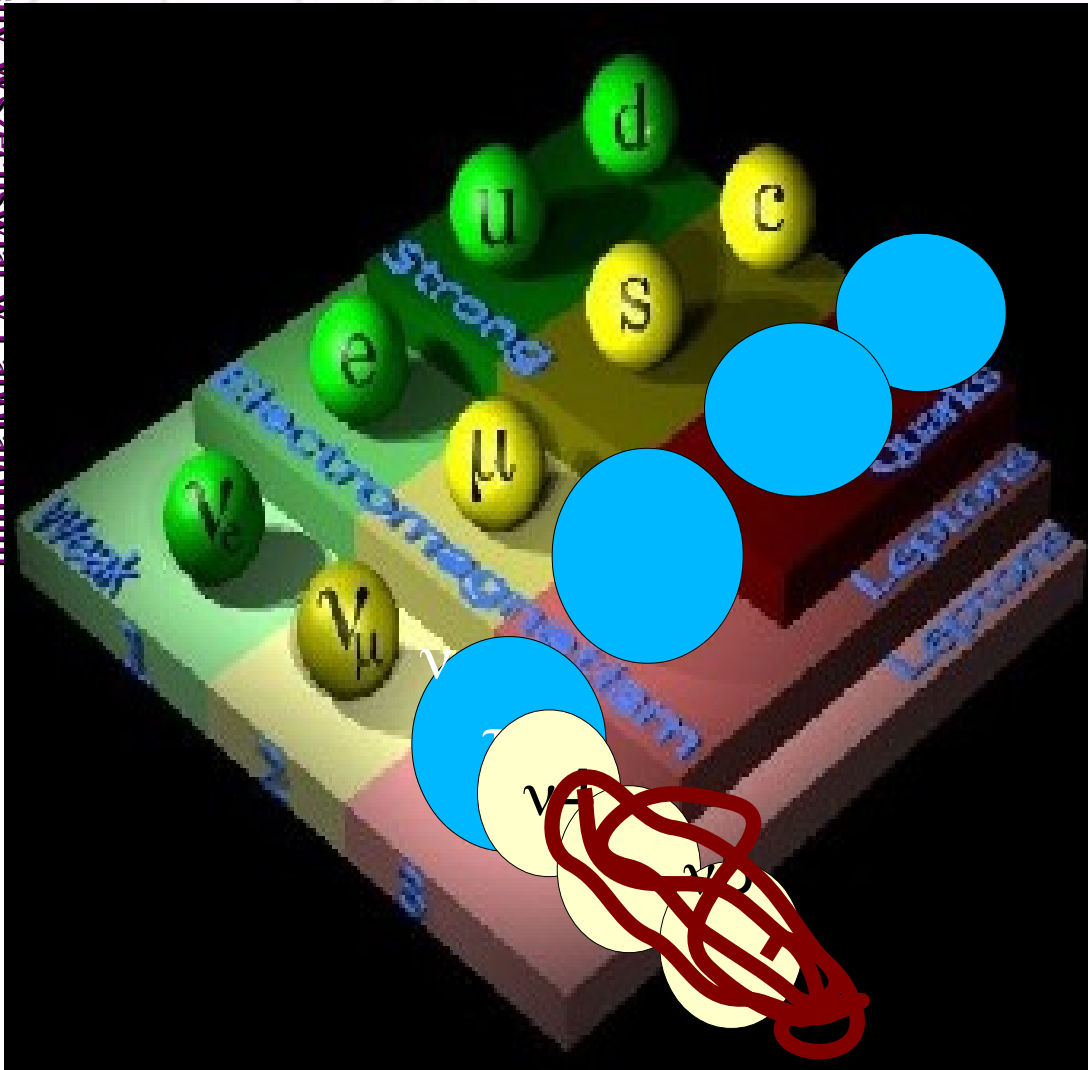
LHCb

CERN

©
PhotoC
ERN

Laboratorium: Co odkryliśmy we wcześniejszych zderzaczach? Prawie cały „model standardowy”

Wczesny wszechświat w Laboratorium



W 1976 lepton τ lepton odkryty Stanford, Kalifornia. Całkiem niespodziewanie: bo dwie pierwsze rodziny były już „skompletowane”.

W 1977, w FERMILAB, Chicago, cząstka składająca się z kwarka b (bottom) i anty-kwarka b została odkryta.

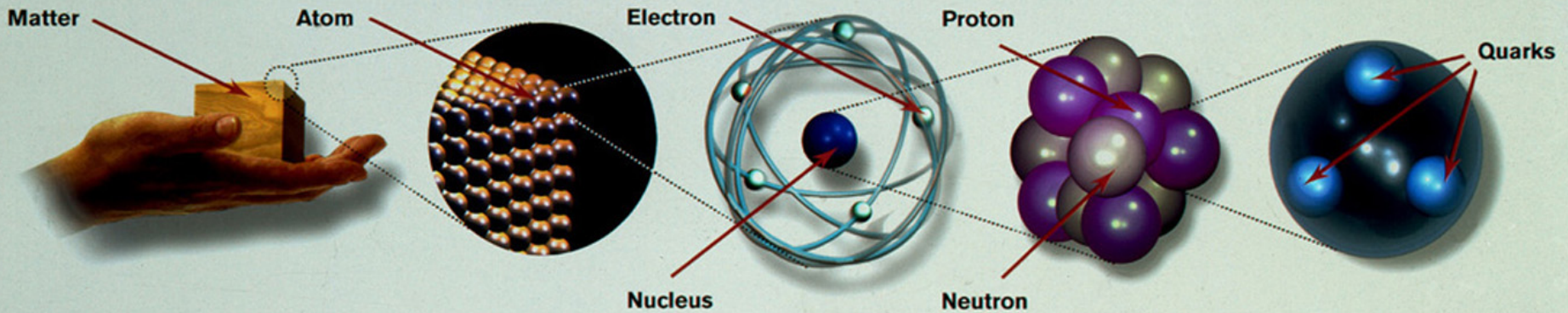
W 1994 LEP “mierzy” pośrednio masę kwarka top z 15% dokładnością
Bezpośrednie odkrycie w 1995 w Tevatron.







Czy jest więcej „rodzin” cząstek elementarnych niż trzy ???







LEP mówi: NIE

Laboratorium: Cząstki modelu standardowego zaobserwowane przed LHC

Wczesny Wszechświat w Laboratorium

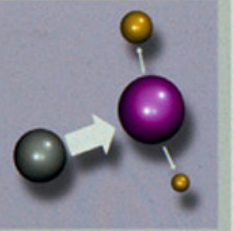



Matter particles		LEPTONS	
<p>All ordinary particles belong to this group</p> <p>These particles existed just after the Big Bang. Now they are found only in cosmic rays and accelerators</p>	<p>FIRST FAMILY</p> <p>Electron Responsible for electricity and chemical reactions; it has a charge of -1</p> 	<p>Electron neutrino Particle with no electric charge, and possibly no mass; billions fly through your body every second</p> 	
	<p>SECOND FAMILY</p> <p>Muon A heavier relative of the electron; it lives for two-millionths of a second</p> 	<p>Muon neutrino Created along with muons when some particles decay</p> 	
	<p>THIRD FAMILY</p> <p>Tau Heavier still; it is extremely unstable. It was discovered in 1975</p> 	<p>Tau neutrino not yet discovered but believed to exist</p> 	

QUARKS	
<p>Up Has an electric charge of plus two-thirds; protons contain two, neutrons contain one</p> 	<p>Down Has an electric charge of minus one-third; protons contain one, neutrons contain two</p> 
<p>Charm A heavier relative of the up; found in 1974</p> 	<p>Strange A heavier relative of the down; found in 1964</p> 
<p>Top Heavier still</p> 	<p>Bottom Heavier still; measuring bottom quarks is an important test of electroweak theory</p> 

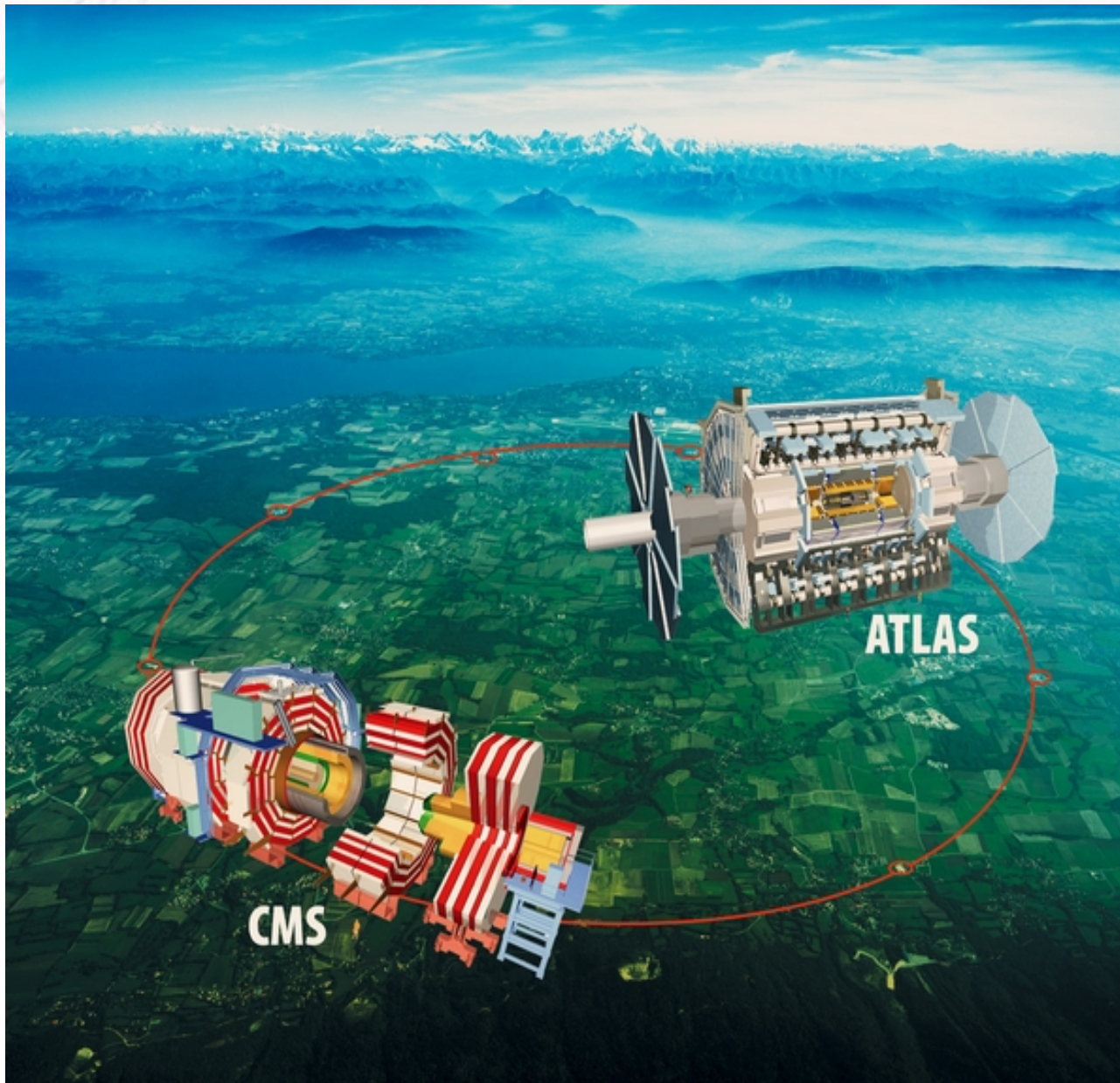
Force particles
These particles transmit the four fundamental forces of nature although gravitons have so far not been discovered

<p>Gluons Carriers of the strong force between quarks</p>  <p>Felt by: quarks</p> <p>The explosive release of nuclear energy is the result of the strong force</p>	<p>Photons Particles that make up light; they carry the electromagnetic force</p>  <p>Felt by: quarks and charged leptons</p> <p>Electricity, magnetism and chemistry are all the results of electro-magnetic force</p>
--	--

<p>Intermediate vector bosons Carriers of the weak force</p>  <p>Felt by: quarks and leptons</p> <p>Some forms of radio-activity are the result of the weak force</p>	<p>Gravitons Carriers of gravity</p>  <p>Felt by: all particles with mass</p> <p>All the weight we experience is the result of the gravitational force</p>
---	--

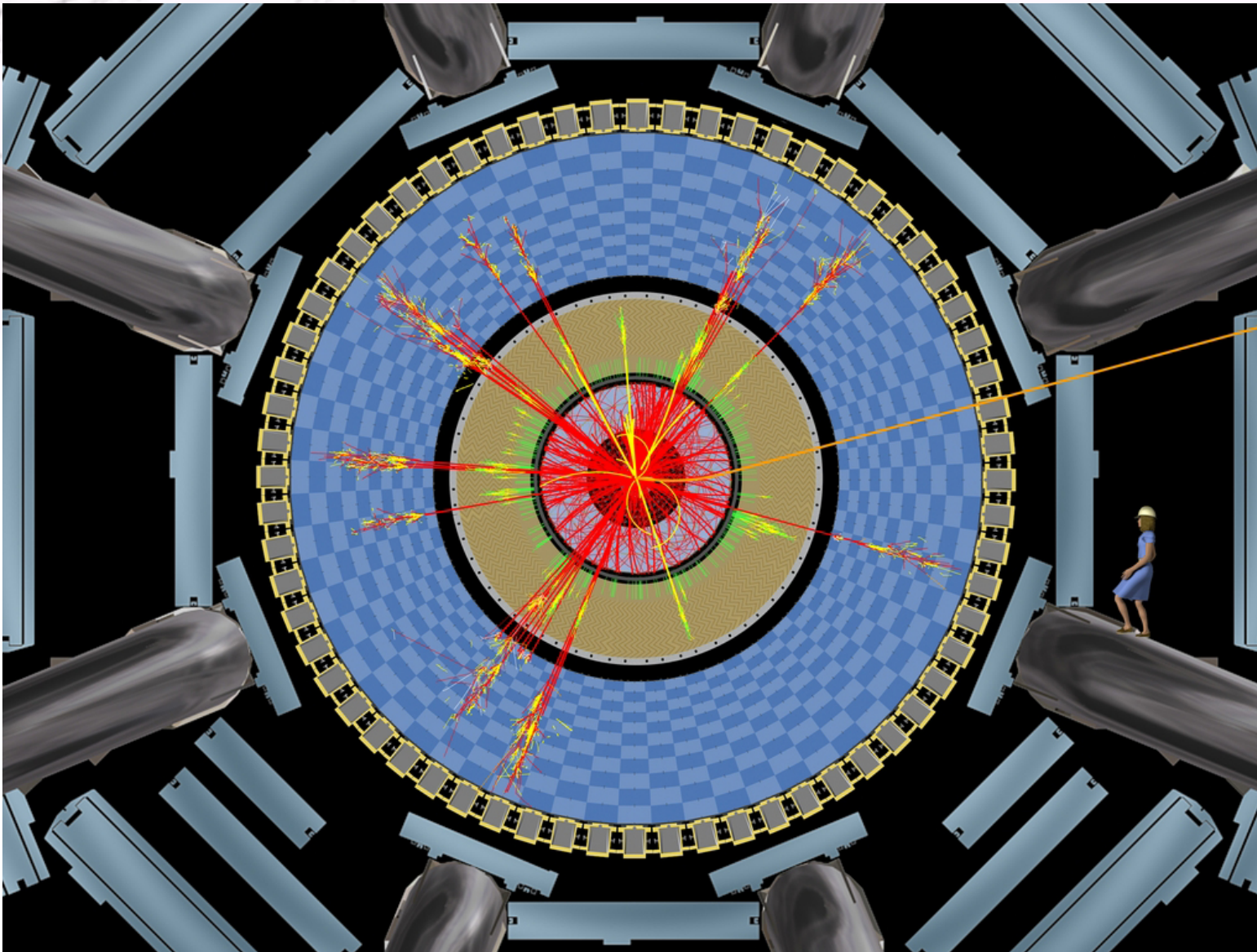
Laboratorium: Era wielkiego zderzacza hadronow : ATLAS and CMS

Wczesny Wszechświat w Laboratorium



Laboratorium: co możemy zobaczyć w ATLASIE, np. rozpadająca się czarna dziura

Wczesny Wszechświat w Laboratorium



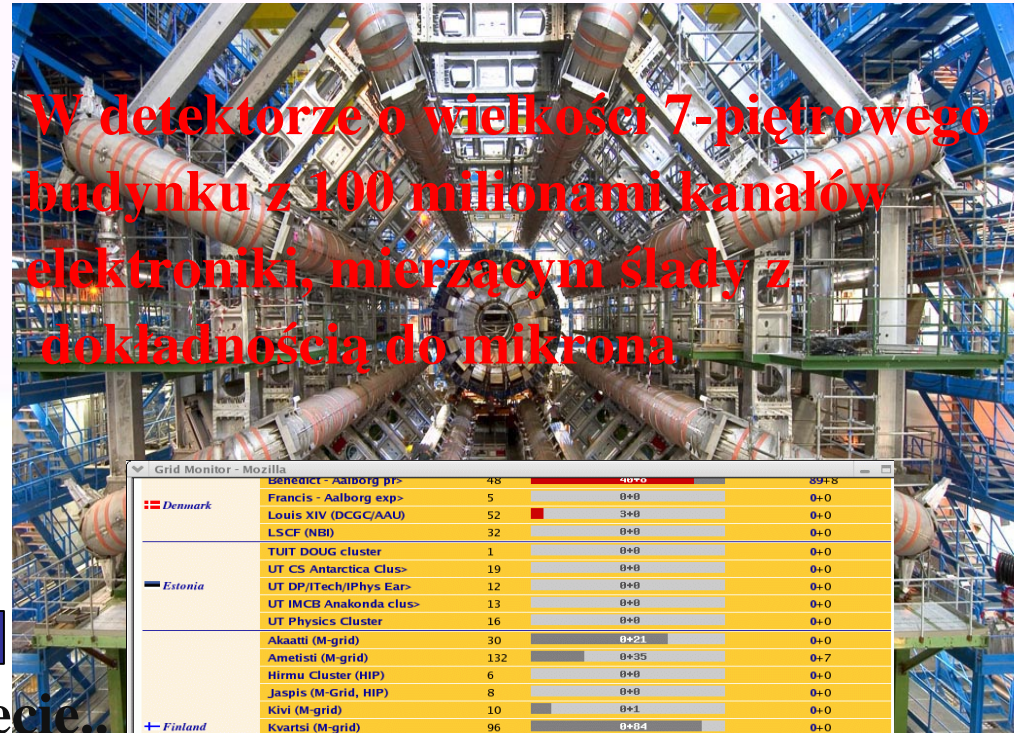
Jeśli przestrzeń ma więcej niż trzy wymiary, grawitacja może być silniejsza na skali mikroskopowej tych dodatkowych wymiarów, niż jest na naszej skali. Jest szansa na Microscopic Black Holes, które rozpadają się przez promieniowanie Hawkinga.

(obrazek dla turystów)

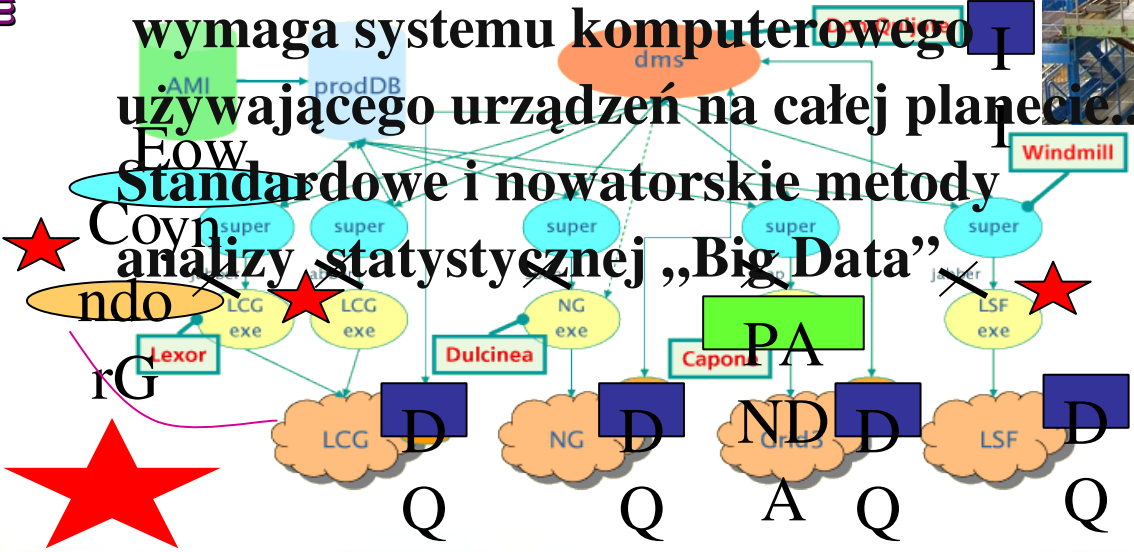
Laboratorium : ~60 zderzeń, 40 miliony razy na sekundę

Wczesny Wszechświat w Laboratorium

Analiza miliardów zderzeń na sekundę



wymaga systemu komputerowego I
używającego urządzeń na całej planecie..



Grid Monitor - Mozilla

Denmark	Benedict - Aalborg pr>	48	40+0	89+8
	Francis - Aalborg exp>	5	0+0	0+0
	Louis XIV (DCGC/AAU)	52	3+0	0+0
	LSCF (NBI)	32	0+0	0+0
	TUIT DOUG cluster	1	0+0	0+0
	UT CS Antarctica Clus>	19	0+0	0+0
	UT DP/Tech/IPhys Ear>	12	0+0	0+0
	UT IMCB Anakonda clus>	13	0+0	0+0
	UT Physics Cluster	16	0+0	0+0
Estonia	Akaatti (M-grid)	30	0+21	0+0
	Ametisti (M-grid)	132	0+35	0+7
	Hirmu Cluster (HIP)	6	0+0	0+0
	Jaspis (M-Grid, HIP)	8	0+0	0+0
	Kivi (M-grid)	10	0+1	0+0
Finland	Kvartsi (M-grid)	96	0+04	0+0
	Mill (Physicum)	60	0+15	0+0
	Opaali (M-grid)	24	0+11	0+8
	Sepeli (M-grid)	256	0+153	0+147
	Spektrolitti (M-grid)	26	0+24	0+0
	Topaasi (M-grid)	24	0+20	0+0
Germany	LRZ cluster	299	0+272	0+488
Lithuania	grid.ku.lt	1	0+0	0+0
	Bergen Grid Cluster	9	7+2	0+0
	IBM 1300 cluster - Fi>	40	0+0	0+0
	Norgrid @ NTNU	63	1+38	1+0
Norway	Oslo Grid Cluster	14	0+0	0+0
	Oslo Hyper Test Box	1	0+0	0+0
	UiO Grid	56	10+46	0+37
Russia	NorduNode in IHPCIS 5>	1	0+0	0+0
	The SPBSU First Clust>	1	0+0	0+0
Slovakia	UPJS ALICE Grid	1	1+0	1+0
	UPJS AMOS Grid	9	0+0	0+0
	UPJS Grid	1	1+0	1+0
Slovenia	SIGNET	102	0+0	0+0
	Bluesmoke (Swegrid,NS>	99	20+1	0+0
	Dayhoff	32	0+32	0+0
	Hagrid (SweGrid, Uppm>	100	8+0	0+0
	Hive (Swegrid, UNICC)	100	60+0	2+0
Sweden	ISV	4	0+0	6+0
	Kosufy farm	54	36+0	1+0
	Monolith (NSC)	398	12+359	0+127
	Quark Cluster	4	0+0	0+0
	Sigrid (SweGrid, Luna>	98	6+52	0+3
Switzerland	Bern ATLAS Cluster	12	0+0	0+0
TOTAL		47 sites	2481 263 + 1207	101 + 825

Laboratorium: “Run 2” Wielkiego Zderzacza, po raz pierwszy od Wielkiego Wybuchu udało się wyprodukować tyle ciężkich czastek *

Particle	Produced in 139 fb^{-1} at $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$
Higgs boson	7.7 million
Top quark	275 million
Z boson	2.8 billion ($\rightarrow \ell\ell$, 290 million)
W boson	12 billion ($\rightarrow \ell\nu$, 3.7 billion)
Bottom quark	~ 40 trillion (significantly reduced by acceptance)

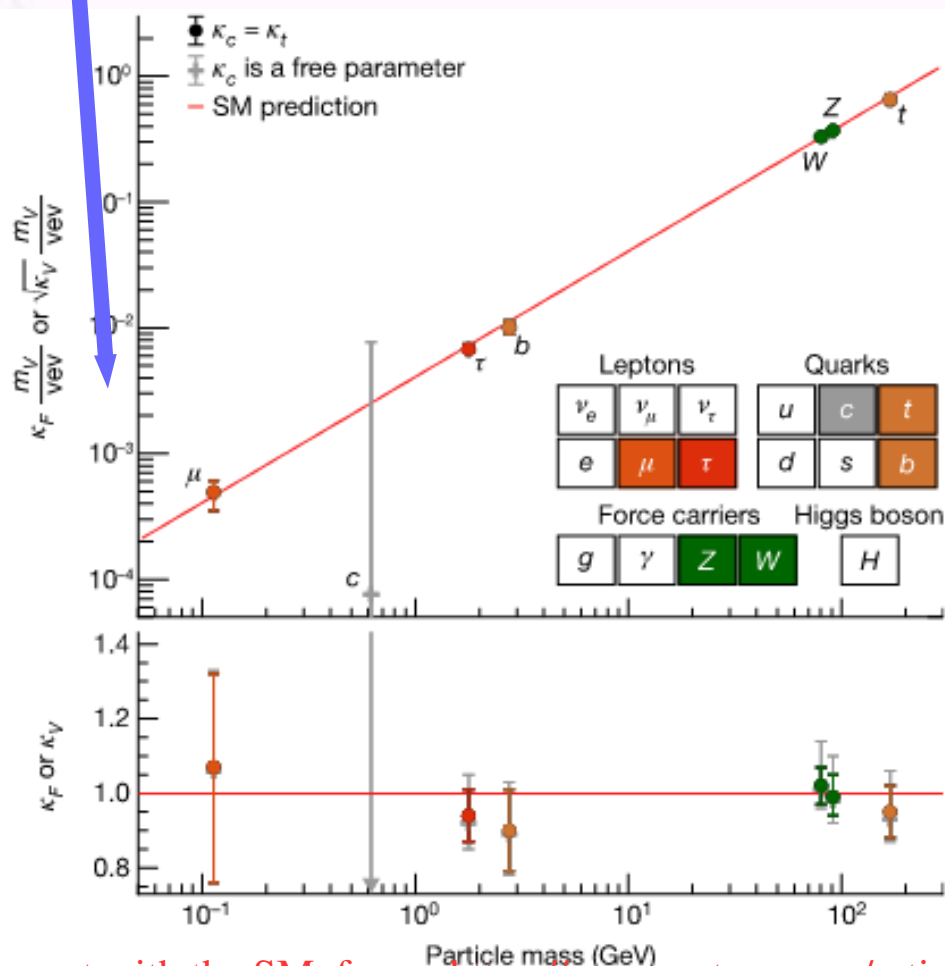
Run 3+2	(2022- end of 2025)	$\sim 500 \text{ 1/fb}$	(factor 4)
Run 4+3+2	(2029 end of 2032)	$\sim 1000 \text{ 1/fb}$	(factor 7)
Run 5+4+3+2	(– end of 2041)	$\sim 3000 \text{ 1/fb}$	(factor 20)

(far future -if there is any..)

\sim statistical improvement factor $\sim 2, \sim 2.5, \sim 4.5$

Laboratorium: Tylko u nas !* Bozon Higgsa !

Odkryty w 2012 przez ATLAS i CMS. Dziś masa i oddziaływania są precyzyjnie zmierzone. **Sila oddziaływań** jest rzeczywiście proporcjonalna do **masy cząstek** które oddziałują z bozonem. Tak jak chce Model Standardowy → dziwny pomysł o tym jak „pole Higgsa nadaje masę” należy potraktować poważnie.



so far in agreement with the SM from <https://www.nature.com/articles/s41586-022-04893-w.pdf>

Member

of



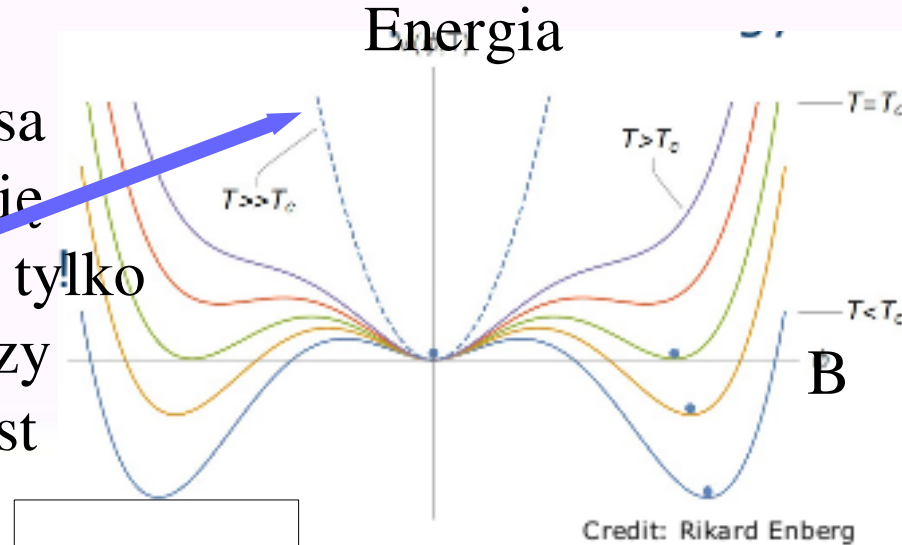
Slide 26

* i we wczesnym Wszechświecie oczywiście!

Wczesny Wszechświat w Laboratorium

Pole Higgsa ma potencjał !

Zapomnijmy na chwile o polu Higgsa i pomyślmy o żelazie. Blok żelaza się spontanicznie magnetyzuje (B). Ale tylko poniżej temperatury Curie! To znaczy że powyżej T_c minimum energii jest dla $B=0$ a dla $T < T_c$ minimum



energii żelaza jest dla wartości pola B różnego od zera .. w dowolnym kierunku.

W żelazie dla $T < T_c$ obserwowane jest „spontaniczne łamanie symetrii”, tzn pojawia się wyróżniony kierunek \rightarrow ten pola B .

Ponadto cząstki o różnym momencie magnetycznym zaczynają się zachowywać inaczej w namagnesowanym żelazie niż w żelazie z $T_c < T$. Te z dużym momentem magnetycznym będą się „zaczepiać” o pole B .

Mechanizm Higgsa: Nasza próżnia to „żelazo” a pole Higgsa to pole „ B ”

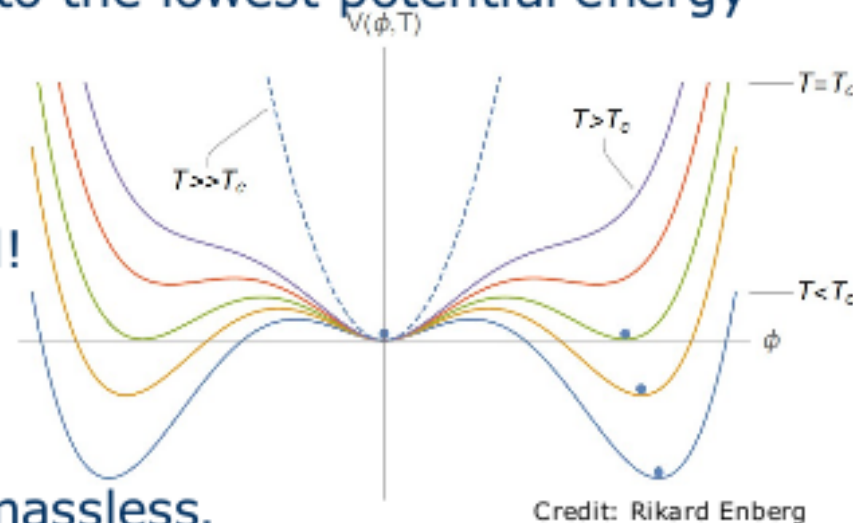
(prawie)

Tajemnica : pusta przestrzeń (z polem Higgosa)



The Higgs potential

- All quantum fields have an associated potential energy function.
- The ground state corresponds to the lowest potential energy (minimum of potential).
- Usually the value of the field is zero in the ground state.
- Not the case for the Higgs field!
- In the early Universe, the minimum of Higgs potential was at $\phi=0$.
- All elementary particles were massless.
- But $O(\text{ps})$ after the Big Bang a new minimum at $\phi \neq 0$ developed.
→ Electroweak phase transition.
- Particles acquired mass by interacting with the $\neq 0$ Higgs field.



- To better understand this phase transition we need to experimentally probe the shape of the Higgs potential.

Tajemnica : Czy żyjemy w stabilnym minimum?

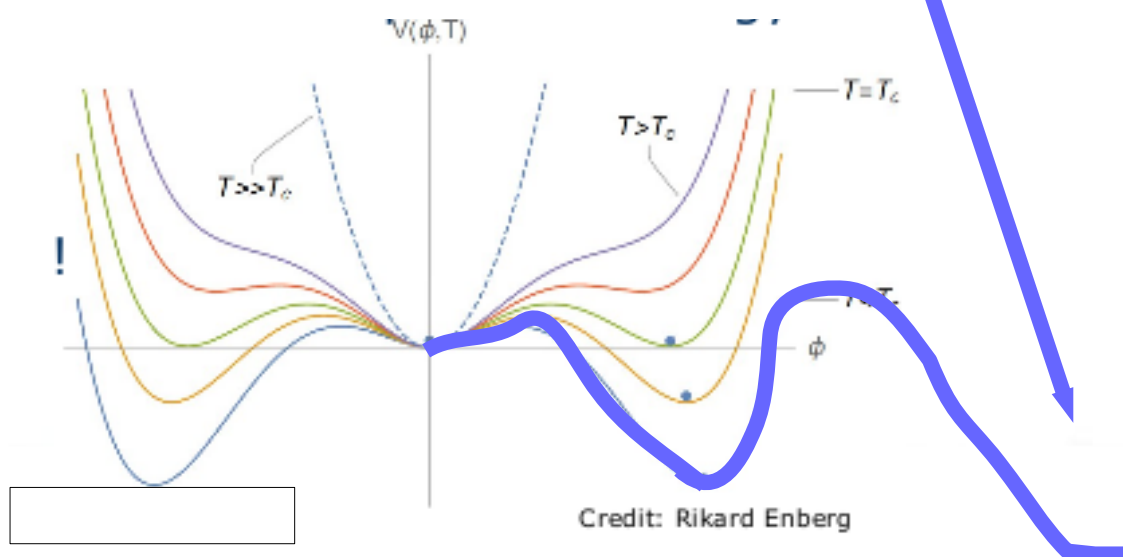
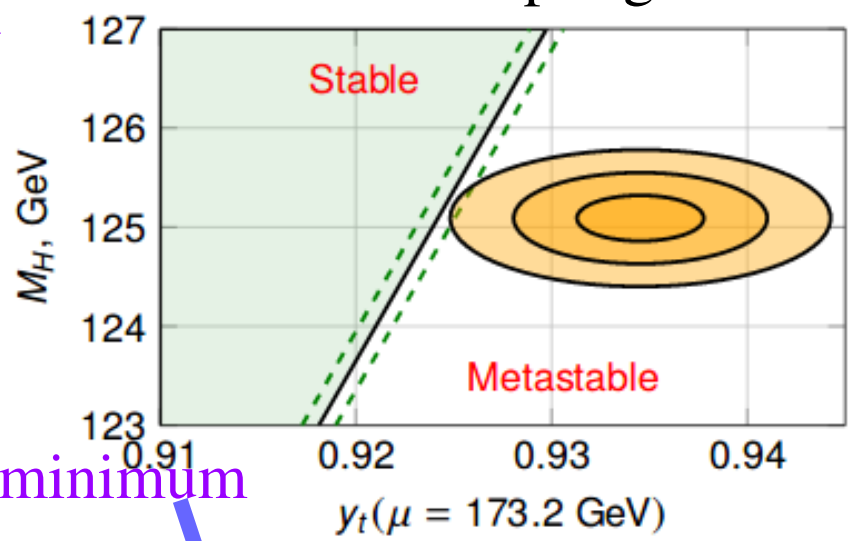
arXiv:1205.2893

t h coupling

Unlikely:

Zależność energii próżni od wartości pola Higgsa zależy od tego jak Higgs oddziałuje sam ze sobą (hh coupling) i jak z kwarkiem top (t h coupling).

Wygląda na to że jesteśmy w próżni metastabilnej → istnieje inne, głębsze minimum energii.

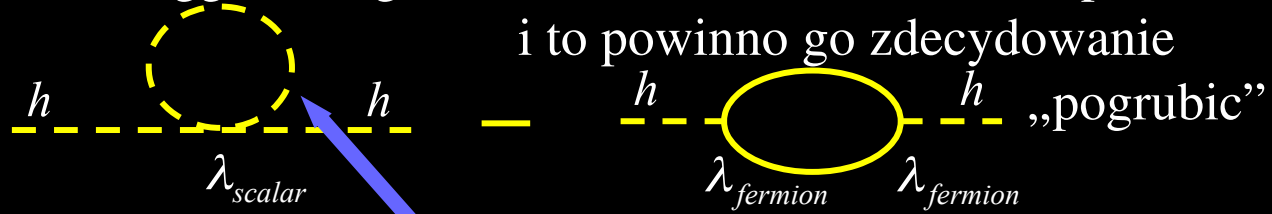


Musimy zmierzyć hh aby odtworzyć kształt

Wczesny Wszechświat w Laboratorium

Tajemnica : Czemu bozon Higgsa jest taki „lekki”?

Bozon Higgsa ciągnie za sobą chmurę kwarków top, i to powinno go zdecydowanie „pogrubic”

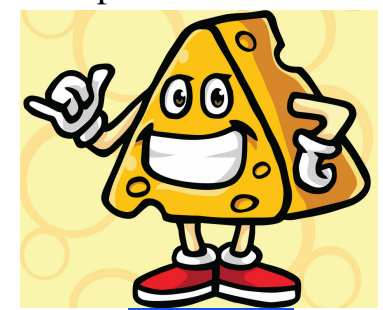


$$\delta m_h^2 = \frac{1}{8\pi^2} \left[\lambda_{scalar}^2 - \lambda_{fermion}^2 \right] \Lambda^2 + \dots$$

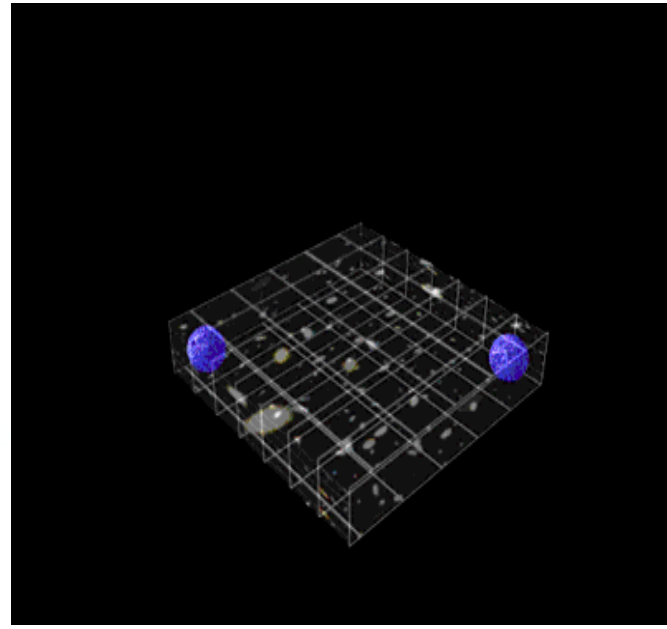
chyba że istnieją jakieś nowe cząstki które go „odchudzają” ekranując efekt kwarku top. A może coś więcej niż 3D ?

Tzw „problem hierarchii” (znowu?).

$$M_{top} \sim 173 \text{ GeV}$$



$$M_h \sim 125 \text{ GeV}$$



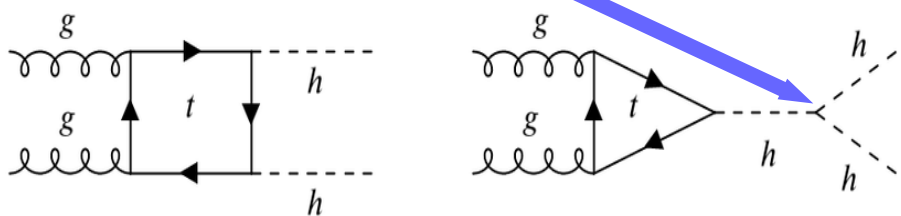
Lista kilku tajemnic:

- 1) Czy mieszkamy w „próżni metastabilnej”? (oddziaływanie hh) ?
- 2) Co stabilizuje masę bozonu Higgsa (problem hierarchii) ?
- 3) Z czego jest „zbudowane” 95% obecnego Wszechświata ?
(Co jest Ciemna Materia ? Ciemna Energia ?)
- 4) Dlaczego nasza materia w ogóle jest ? (tzn niezanihilowała całkowicie z antymateria we Wczesnym Wszechświecie ? Bariogeneza, łamanie CP, łamanie liczby barionowej.)

“Higgs self-coupling”: Oddziaływanie hh można zmierzyć .

Wczesny Wszechświat w Laboratorium

Higgs self-coupling via double Higgs production. Related to the Higgs boson mass . Basis to understand “the minimum of potential energy” the Universe ended-up in.

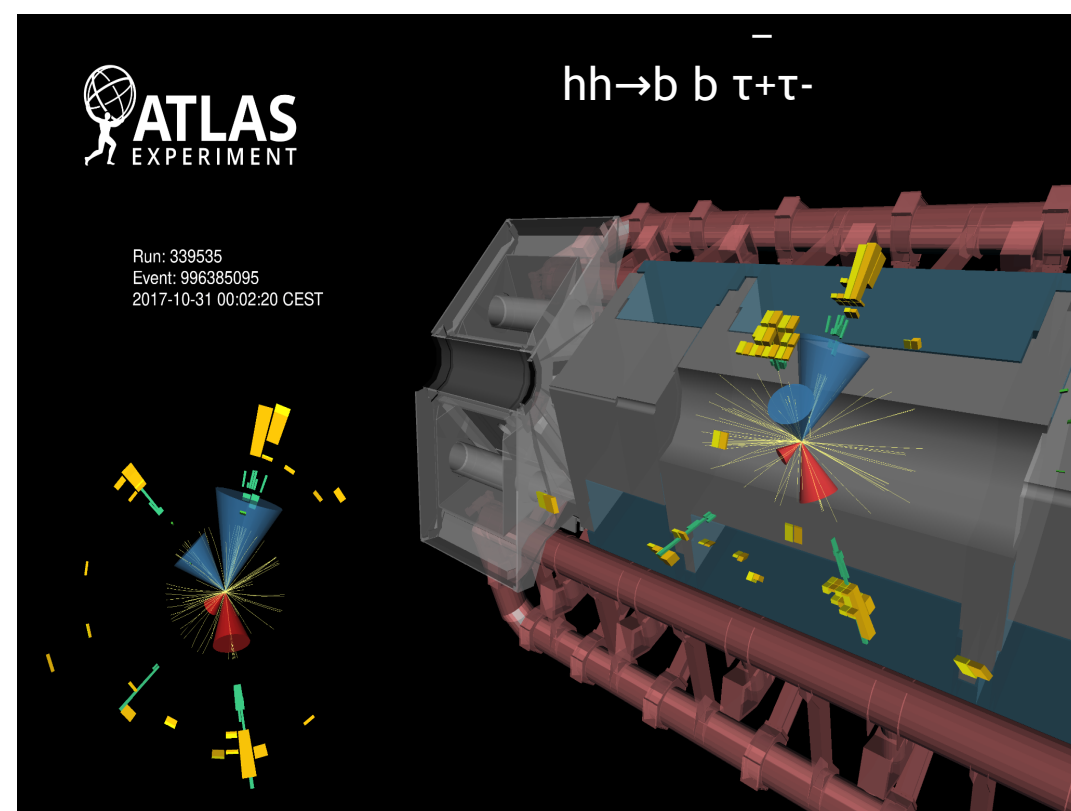


- B=box diagram, amplitude proportional to κ_t^2 , $\kappa_t = y_t/y_t^{SM}$
- T=triangle diagram, amplitude proportional to $\kappa_t\kappa_\lambda$, $\kappa_\lambda = \lambda_{HHH}/\lambda_{HHH}^{SM}$

Amplitude: $A(\kappa_t, \kappa_\lambda) = \kappa_t^2 B + \kappa_t\kappa_\lambda T$

Flagship LHC measurement:
example final state in the ATLAS
Detector

Pomiar możliwy, ale trudny (tło),
chyba że oddziaływanie większe niż
przewiduje Model Standardowy.



Lamanie Charge Parity (CP) i liczby Barion+Lepton (B+L) jest potrzebne aby „uratować” nasza materie

1) W naszych „mikro Big Bang” materia i antymateria są produkowane w tych samych ilościach .

2) jednak w naszym Wszechświecie materia „wygrała”.

3) Teoretycznie, potrzebujemy :

a) łamania kombinacji dwóch symetrii (CP)

Zamiany materia \leftrightarrow antymateria (charge parity, C)

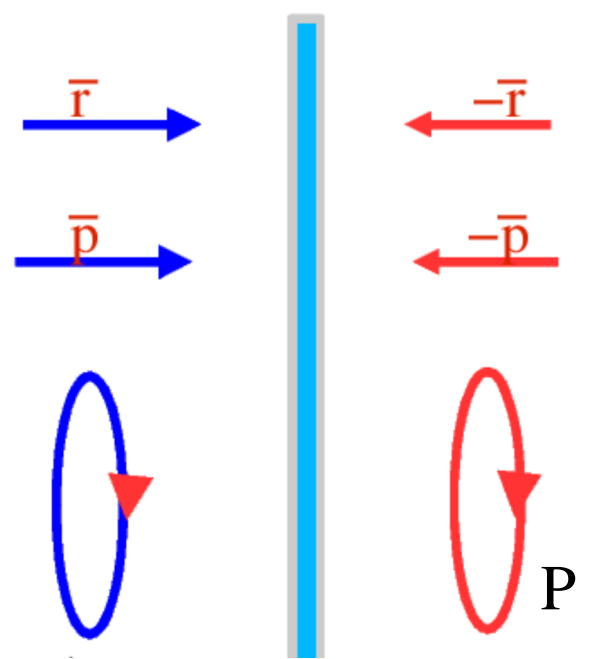
Odbicia lustrzanego (parity , P)

b) niezachowania liczby barion+lepton

aby wyjaśnić nasza egzystencje „materialna” .

Łamanie P : India Times odkrywa wampira

Wczesny Wszechświat w Laboratorium



lewoskrętne neutrino → prawoskrętne neutrino

C

prawoskrętne antyneutrino → lewoskrętne antyneutrino

CP

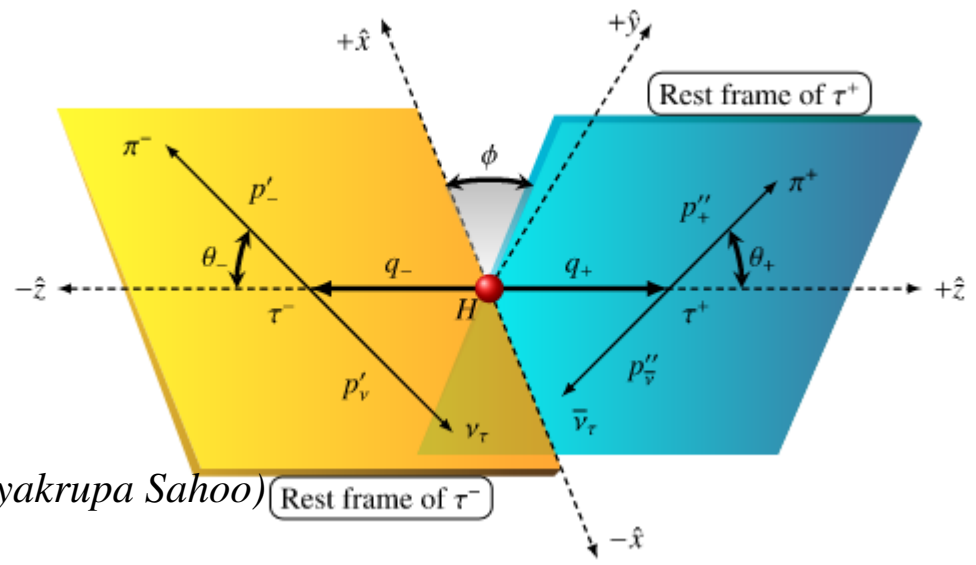
↓ To cząstki nieistniejące
 ↓ A więc neutrino to wampiry.
 ↓ Innymi słowami C i P wzięte osobno są drastycznie łamane w Naturze

lewoskrętne neutrino → prawoskrętne antyneutrino

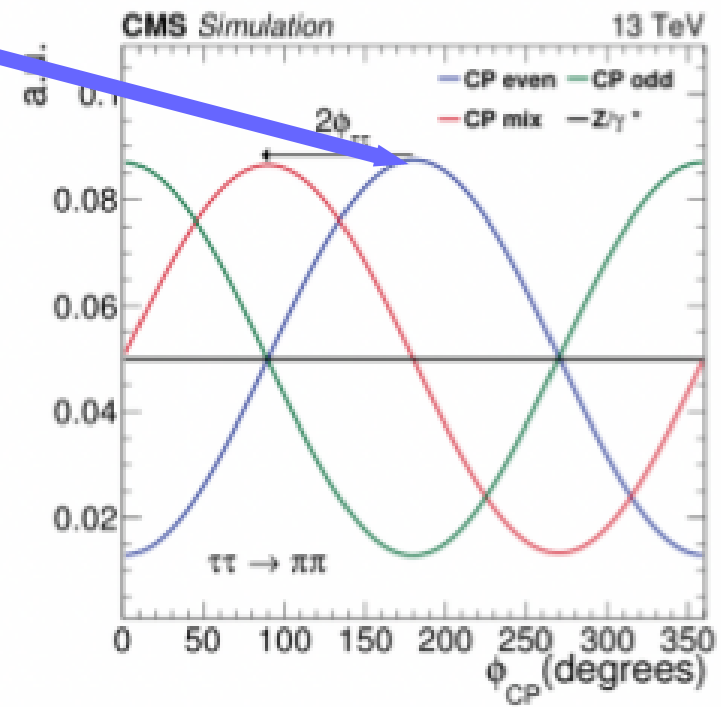
Some measurements show very weak violation of CP, too weak to explain the existence of our matter.

Szukamy CP- wampirów czyli “nowych źródeł łamania CP”

Stan CP w rozpadach Higgs → tau tau. CP objawia się w rozkładzie kąta między płaszczyznami rozpadu dwóch leptonów tau. Jeśli CP nie jest łamane to maximum rozpadów jest przy kacie=180 stopni.



(Dibayakrupa Sahoo)

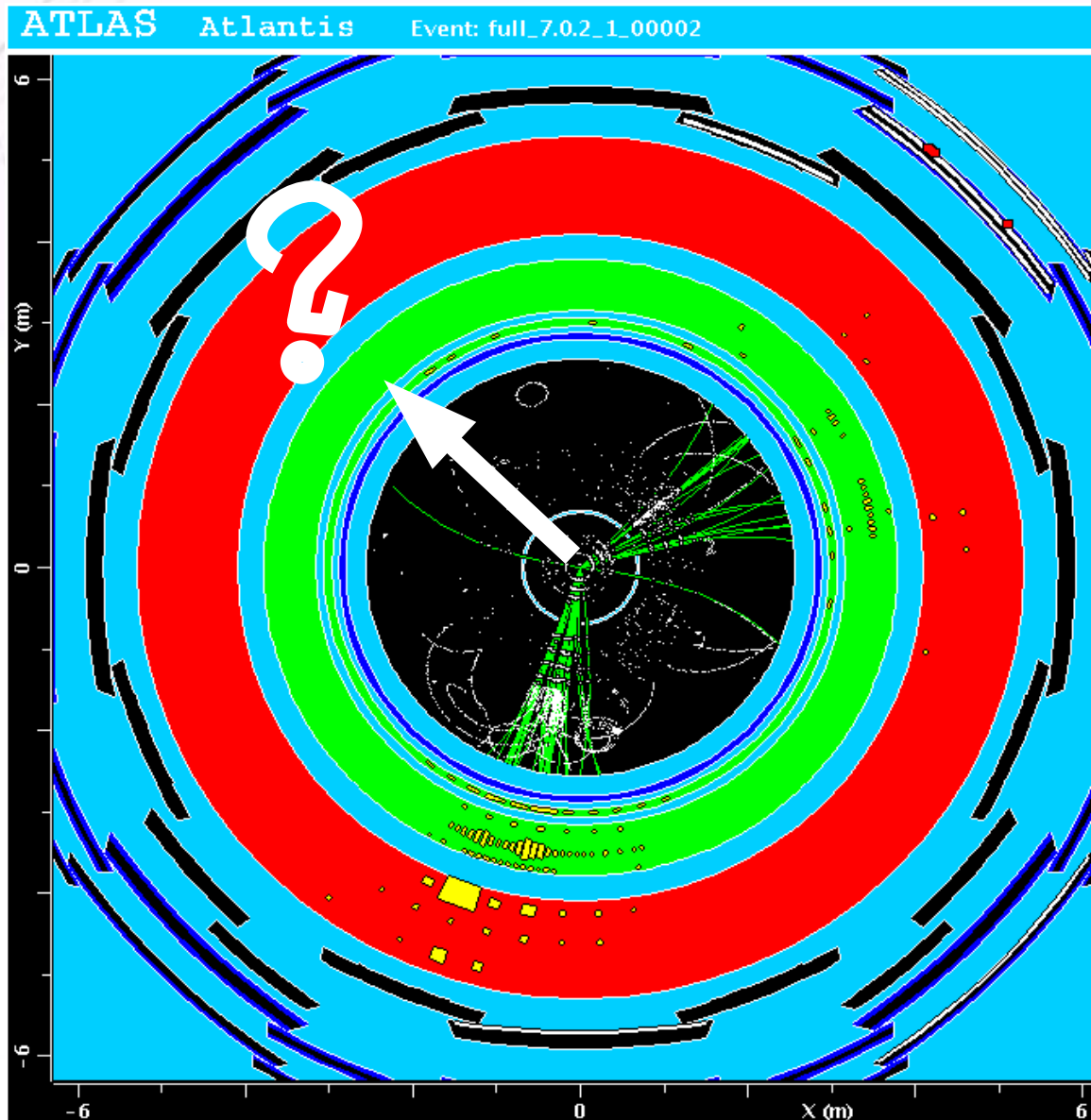


[arxiv.2110.04836](https://arxiv.org/abs/2110.04836)

Precision of $3-5^0$ needed to test some of the baryogenesis models. (Our existence requires more CP violation than we presently see, baryogenesis). Can we add more precision to the CP measurement by testing other Higgs boson decay channels?

2012.13922 ,1510.03850 : CP phase precision after Run5 = 10^0-5^0

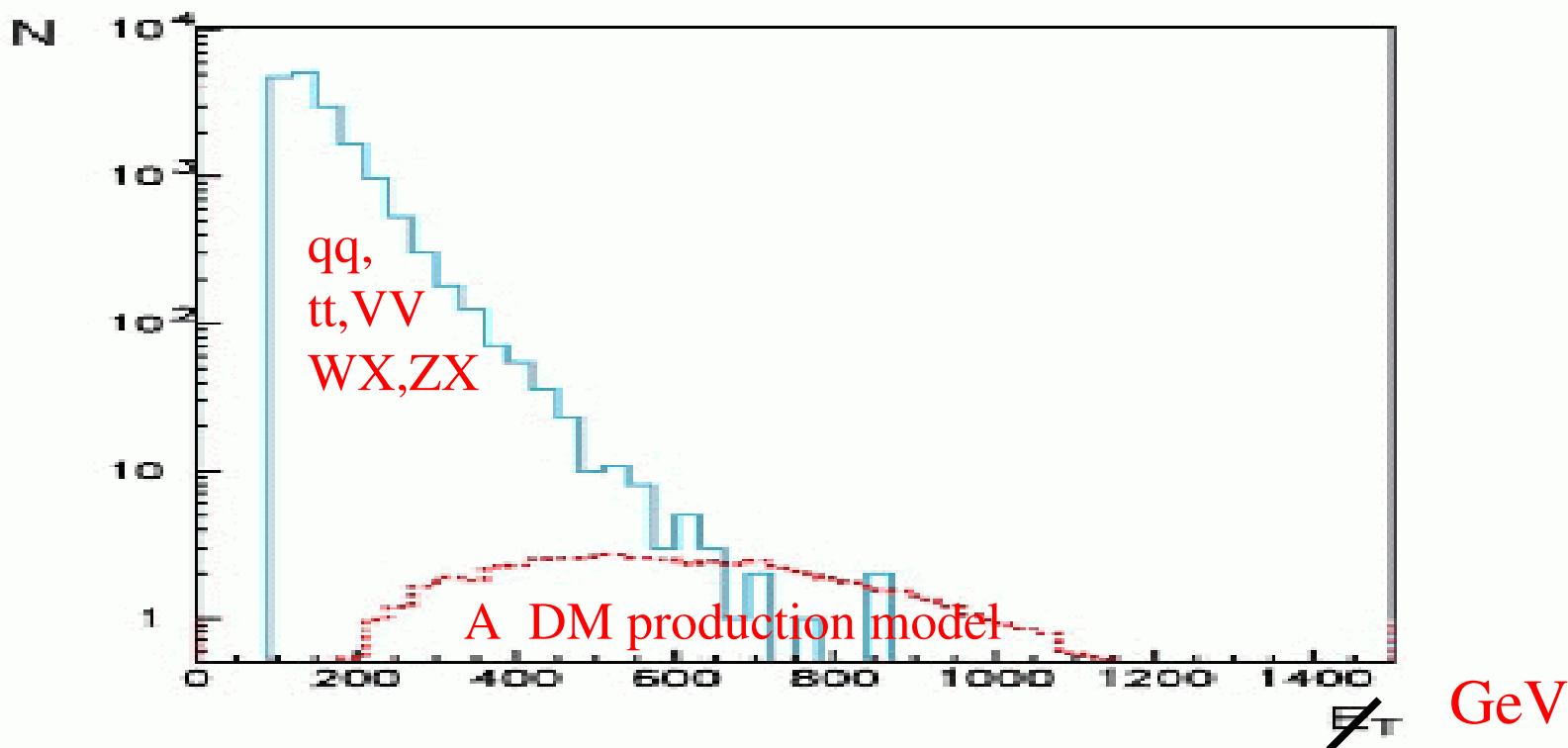
Ciemna materia w detektorze ATLASa. (Symulacja)



Czy ja widać ?
Przykład: zderzenie
z brakującym
pędem
poprzecznym i
i dwoma „dzetami”.

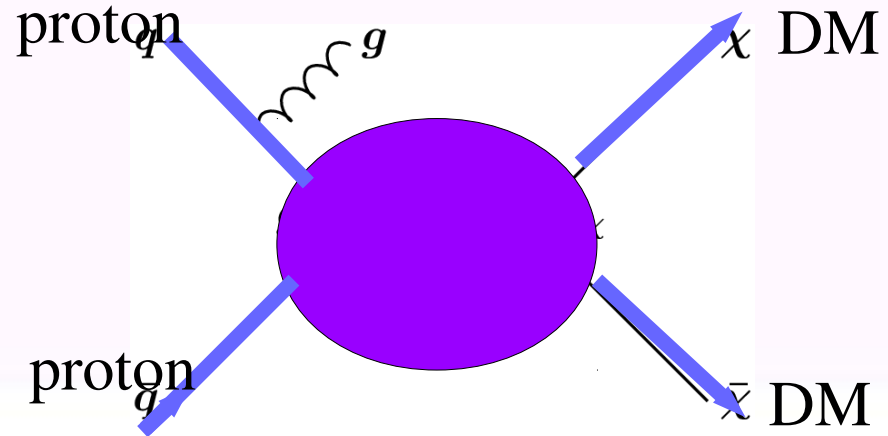
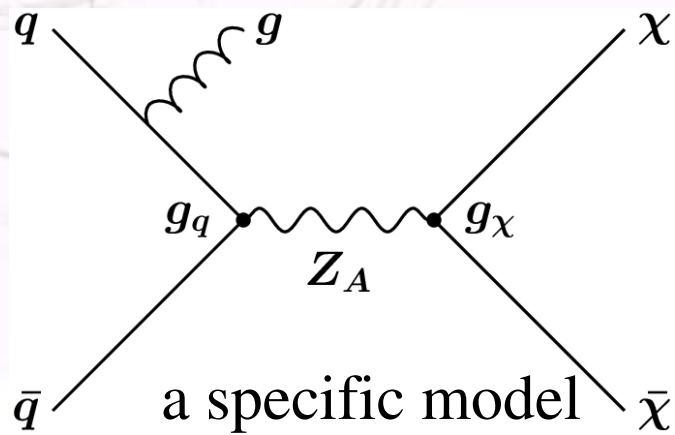
Czy możemy zobaczyć Ciemna Materie ?

Pedy poprzeczne wszystkich cząstek wyprodukowanych w zderzeniu powinny sumować się do zera (zachowanie pędu). Ale ciemna materia nie rejestruje się w detektorze → po prostu ucieka. Skutek: „brakujący pęd poprzeczny”, który można zmierzyć

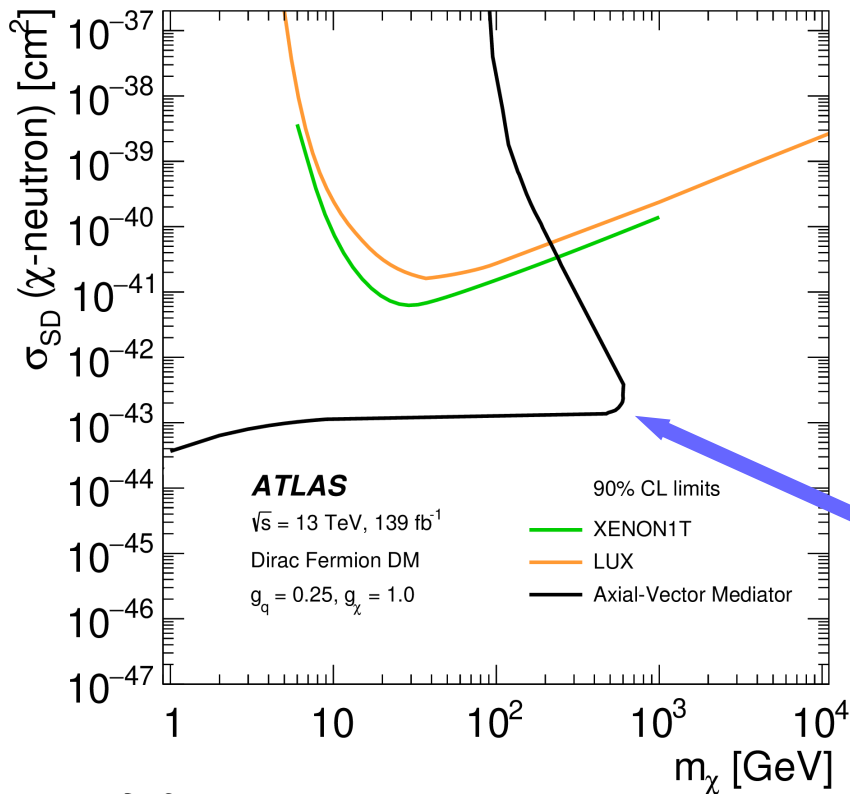
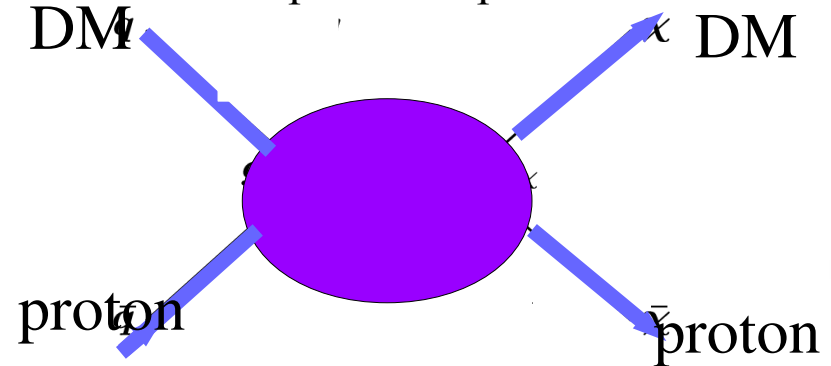


Look for very high E_T events

Mono-jet search, generic Dark Matter search?



Generic : $p+p \rightarrow \text{DM DM}$ to be related to $\text{DM}+p \rightarrow \text{DM}+p$

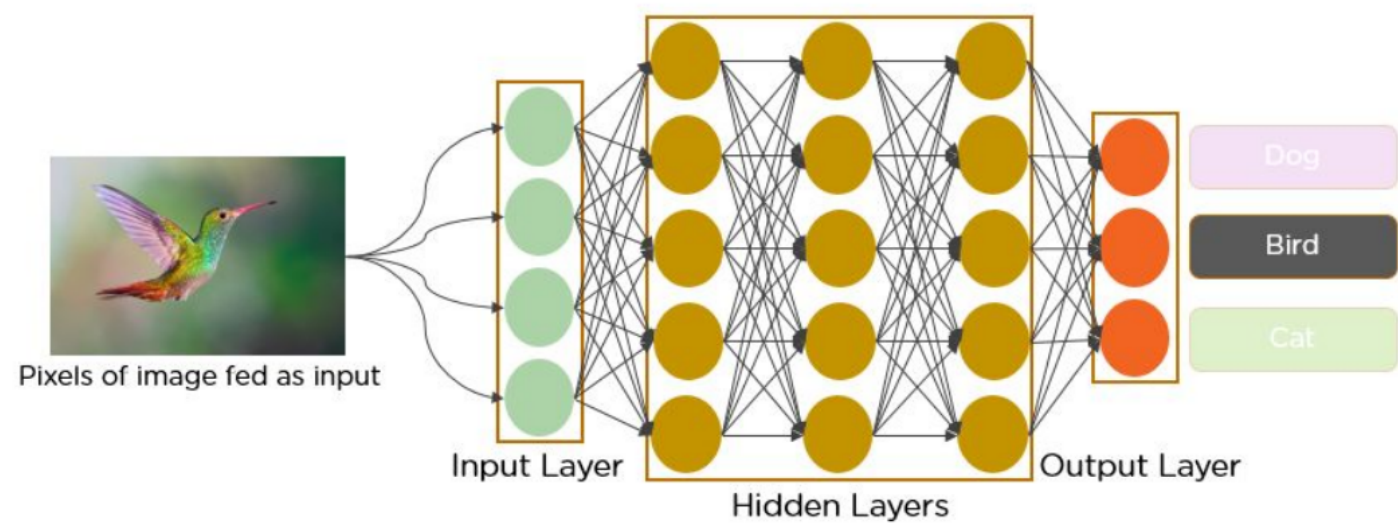


Example ATLAS result, for a specific model. Results competitive with the direct search for DM scattering on nucleons

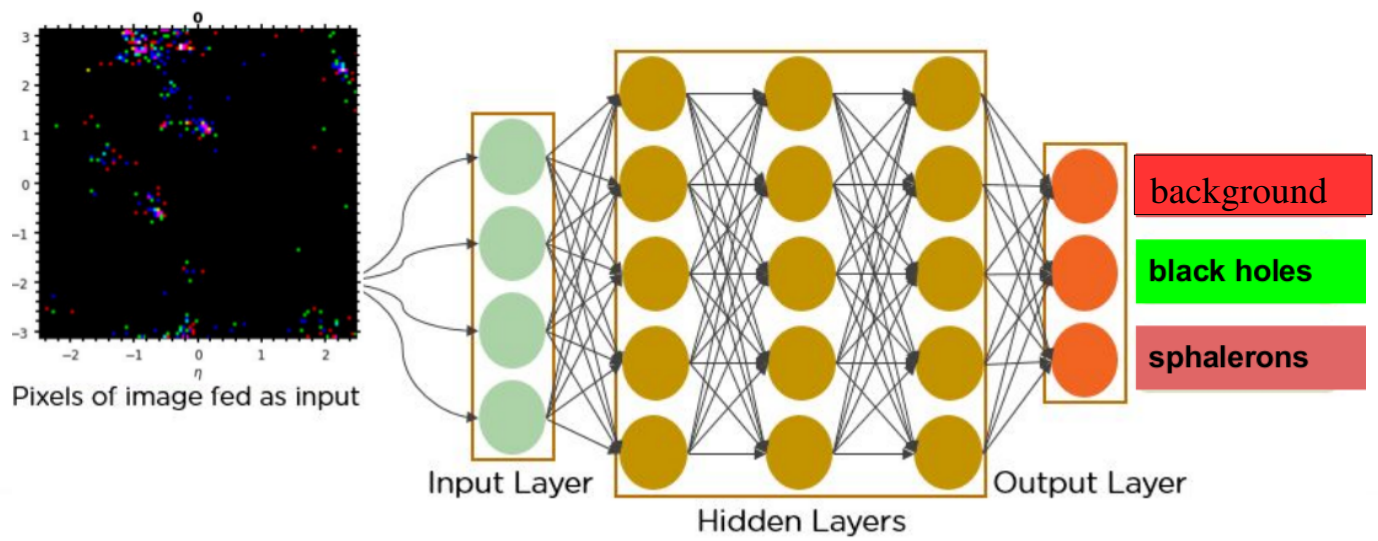
Phys. Rev. D 103 (2021) 112006

Mikro czarne dziury i sphalerony wyglądają podobnie, produkują dużo cząstek w stanie końcowym.

Apply ML computer vision techniques on LHC data.



Czy metody wizji komputerowej są w stanie odróżnić Czarną Dziurę od Sphaleronu? Convolution Neural Network



We treat the detector as a camera and energy deposits as pixels. Some promising results in distinguishing SPH from BH

Wczesny Wszechświat w Laboratorium

Podsumowanie.

Tajemnice obecnego Wszechświata którymi „zaowocował”
Wczesny Wszechświat można studiować w laboratorium.

Przykłady:

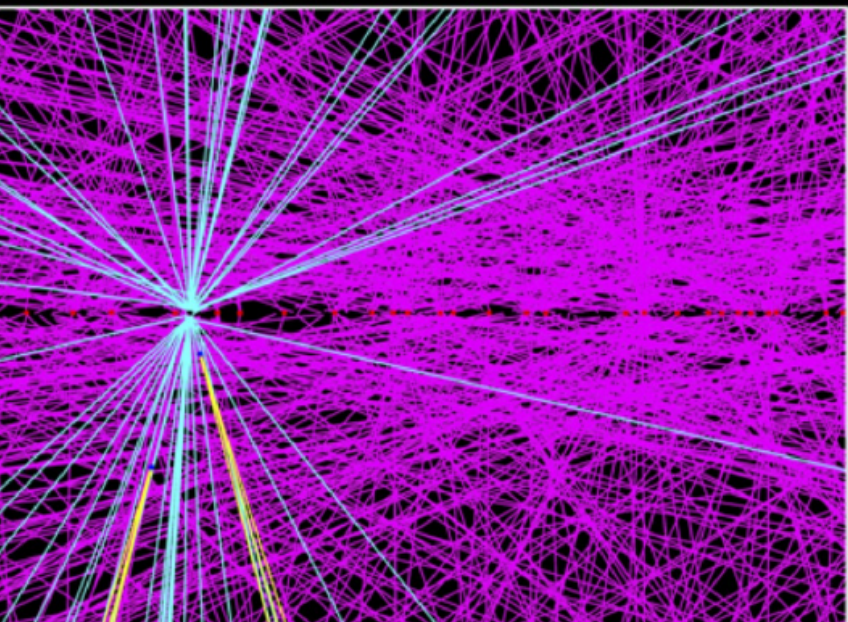
- 1) Czy mieszkamy w „metastabilnej próżni”? (zmierz oddziaływanie hh) ?
- 2) Co stabilizuje masę bozonu Higgsa (szukaj nowych cząstek oraz/lub wymiarów) ?
- 3) Z czego jest „zbudowane” 95% obecnego Wszechświata ?
(Szukaj Ciemnej Materii w produktach zderzeń)
- 4) Dlaczego nasza materia w ogóle jest ? (szukaj nowych źródeł łamania CP, łamania liczby B+L)

The future at the HL-LHC



ATLAS
EXPERIMENT

HL-LHC $t\bar{t}$ event in ATLAS
at $\langle\mu\rangle=200$



The “EarlyUniverse” project



Norway grants



NATIONAL SCIENCE CENTRE POLAND

The research leading to the results presented in this talk has received funding from the Norwegian Financial Mechanism for years 2014-2021, grant nr 2019/34/H/ST2/00707

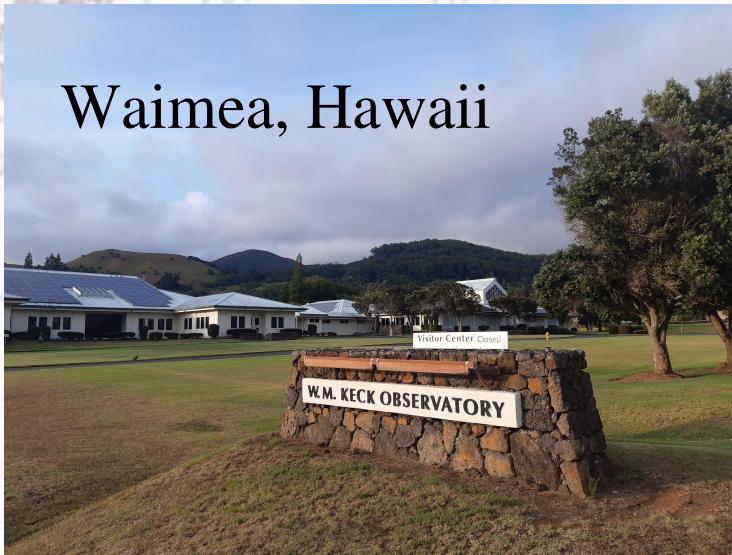


Understanding the Early Universe:
interplay of theory and collider experiments

Joint research project between the University of Warsaw & University of Bergen

Theory & Experiment

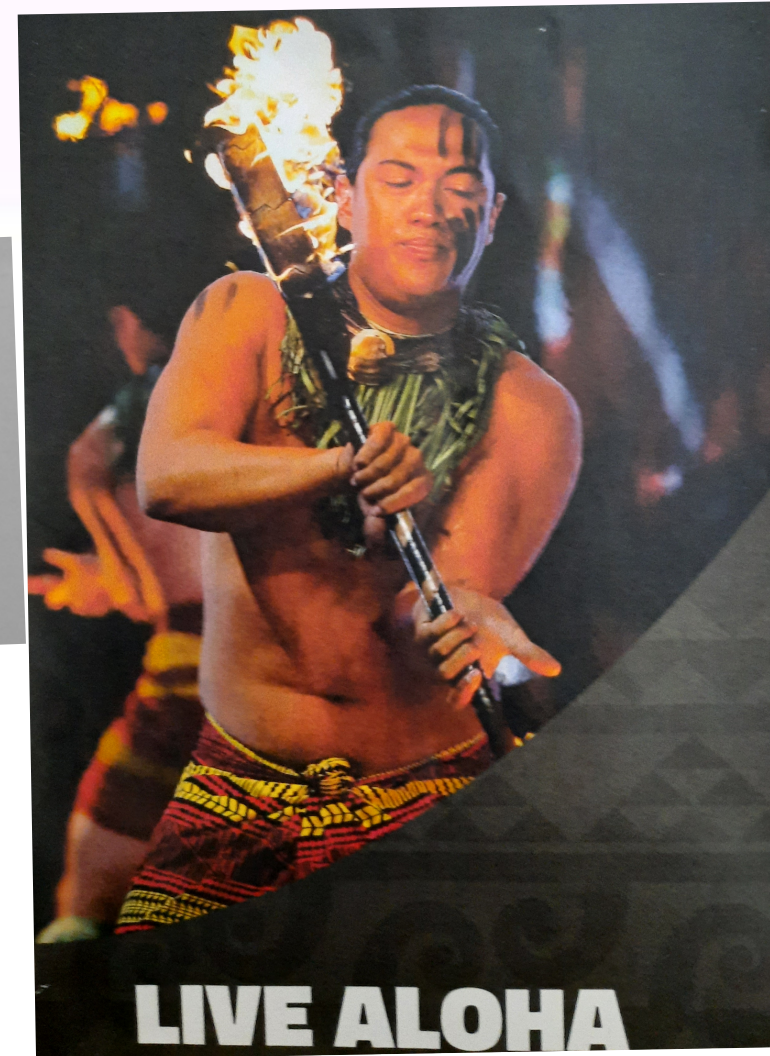
Waimea, Hawaii



E`apo i ke a`o a ho`ohana, a e `oi mau ka na`auao.
Those who apply their teachings increase
their knowledge.

**I PLEDGE TO BE PONO (RIGHTEOUS) ON
THE ISLAND OF HAWAI`I:**

Mahalo !!!



LIVE ALOHA





Two Higgs Doublets Models (2HDM)-an interesting extension of the SM

$$\Phi = \begin{pmatrix} \phi^+ \\ \phi^0 \end{pmatrix},$$

SM: one “complex doublet”= 4 fields

Mass=Transverse polarization for

W^+ Z^0 and SM scalar h boson

$$\Phi_1 = \begin{pmatrix} \phi_1^+ \\ (v_1 + \eta_1 + i\chi_1)/\sqrt{2} \end{pmatrix}, \quad \Phi_2 = \begin{pmatrix} \phi_2^+ \\ (v_2 + \eta_2 + i\chi_2)/\sqrt{2} \end{pmatrix},$$

BSM: two “complex doublets”= 8 fields

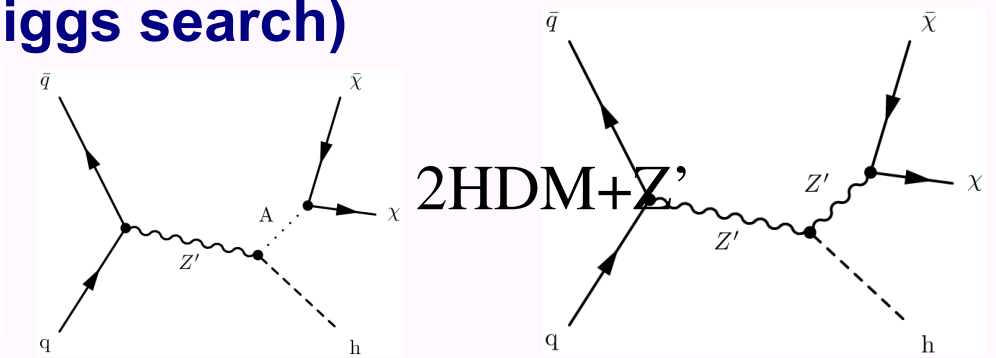
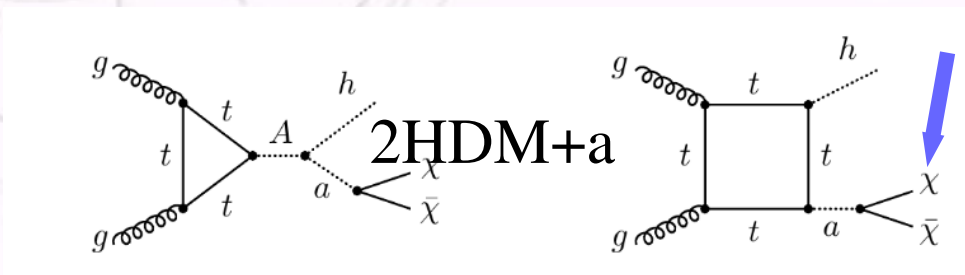
=Transverse polarization for

W^+ Z^0 and 5 Higgs bosons H^+ , A, H and h

2HD models do not “spoil” precise EW measurements and involve additional symmetries making the existence of Dark Matter (DM) possible. Compatible with SUSY

Higgs boson and Dark Matter, 2HDM + new bosons (Mono-Higgs search)

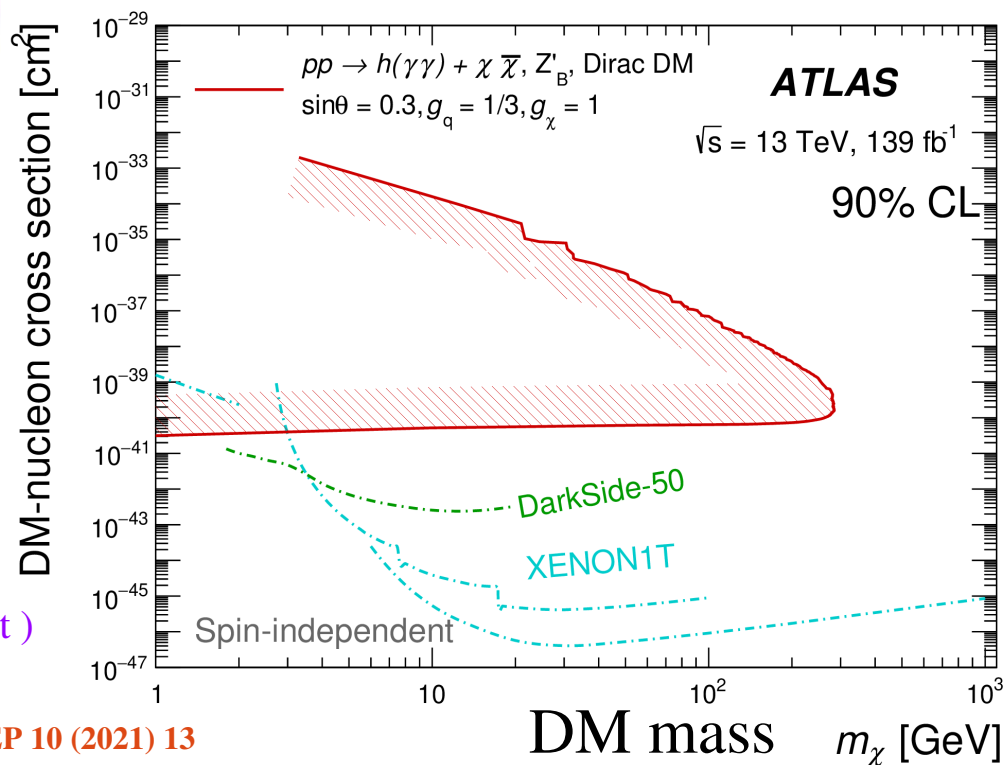
Wczesny Wszechświat w Laboratorium



Run 2: Published results with
 $H \rightarrow 2\text{photons}$ (Oslo) and $H \rightarrow b\bar{b}$
 $H \rightarrow \tau\tau$ ongoing in Bergen
 (supported by MCIF* in the past, now
 “EarlyUniverse”**).

Plans: **Combine all Higgs decay channels,
 interpretation in other relevant models.**

(Collaboration with theory via Grieg “EarlyUniverse” project)



JHEP 10 (2021) 13

*Example results: can be related to
 direct searches for DM scattering
 on nucleons*

Can we distinguish sphalerons from micro black holes?

<https://indico.cern.ch/event/753170/attachments/1713995/2764365/lhcSphalerons.pdf>

What is a Sphaleron?

- Non-abelian gauge field configuration
 - First proposed by 't Hooft in 1976
 - Sister to instantons
 - Potential in Chern-Simons number (N_{CS}) of gauge field
- Not yet discovered, now know SM energy: **~9 TeV**
 - Higgs mass was the last piece needed to calculate
 - "Fireball" final states: around twelve 0.8 TeV particles \longrightarrow lots of particles !
- **Violates B+L**
 - B-L is conserved
 - Potential piece of universal matter antimatter asymmetry \longrightarrow yes !
- **First dedicated EW sphaleron search**
 - Using full 2016 CMS dataset
 - QCD sphalerons violate chirality and searched for by ALICE (<https://indico.cern.ch/event/656773/>)