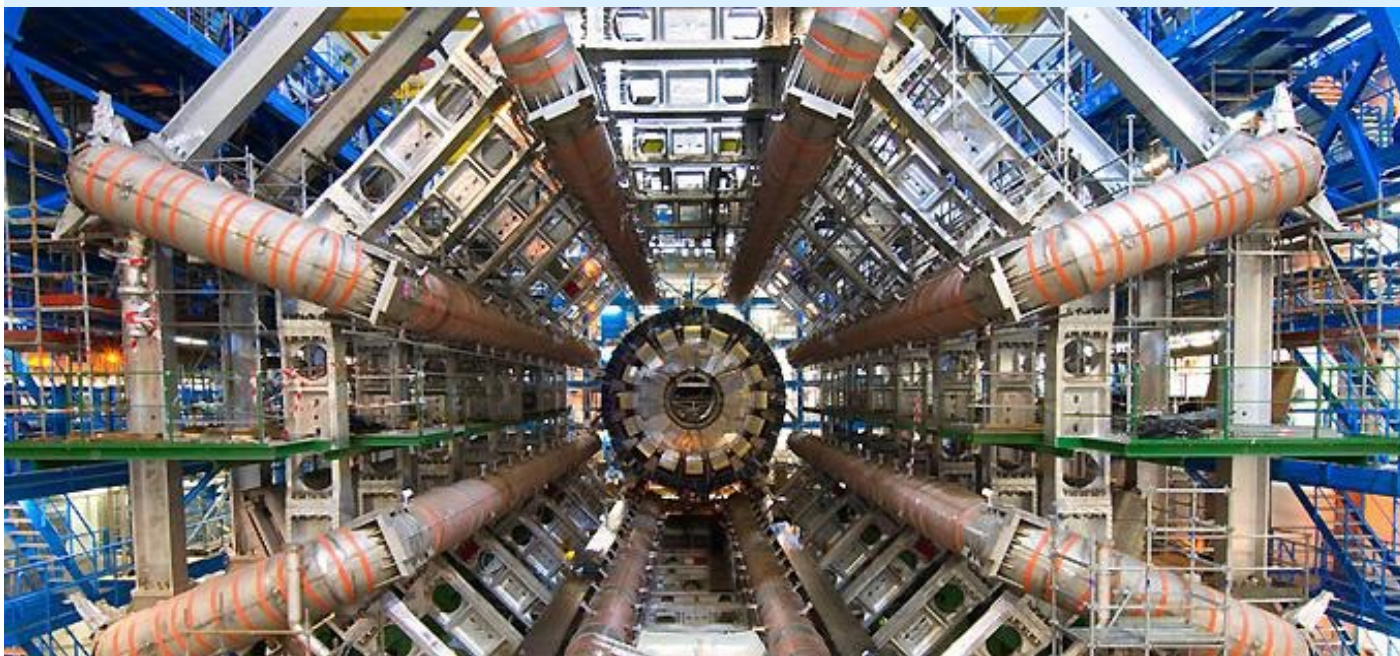


Сучасна Космологія і Фізика на Великому Адронному Коллайдері

06.10.2018, School "The basic ideas and concepts behind
the modern High-Energy Physics and Cosmology",
м.Трускавець



Що відомо про Всесвіт

1. *Всесвіт розширюється:*
галактики віддаляються одна від одної!
Простір розтягується у всі сторони
2. *Всесвіт “теплій”:* у ньому є електромагнітне випромінювання, що характеризується
температурою $T = 2,725 \text{ K}$
3. *Всесвіт баріонно асиметричний –*
у ньому присутня матерія і немає антиматерії
4. *Всесвіт однорідний та ізотропний:* усі області розміром 300 мільйонів світлових років і більше виглядають однаково
5. *Просторова кривизна Всесвіту близька до нуля*
6. *Сучасний вік Всесвіту- 13.73 млрд років, сучасний розмір 45.7 млрд. світлових років*

Звідки ці відомості?

Космологія стала точною наукою за останні 20 років
Властивості Всесвіту виміряні різними способами

1. «Стандартні свічки» — наднові типу Ia
Вимірюється темп розширення Всесвіту зараз і відносно
недалекому минулому
2. Дослідження властивостей реліктового
випромінювання
3. Дослідження великомасштабної структури Всесвіту
4. Глибокі огляди галактик і квазарів більш 10^6
об'єктів => карта Всесвіту до відстані 5000 Мпк = $15 \cdot 10^9$
світлових років
5. Дослідження розповсюдженності легких елементів У
Всесвіті
6. Дані по гравітаційному лінзуванню.

Минуле Всесвіту

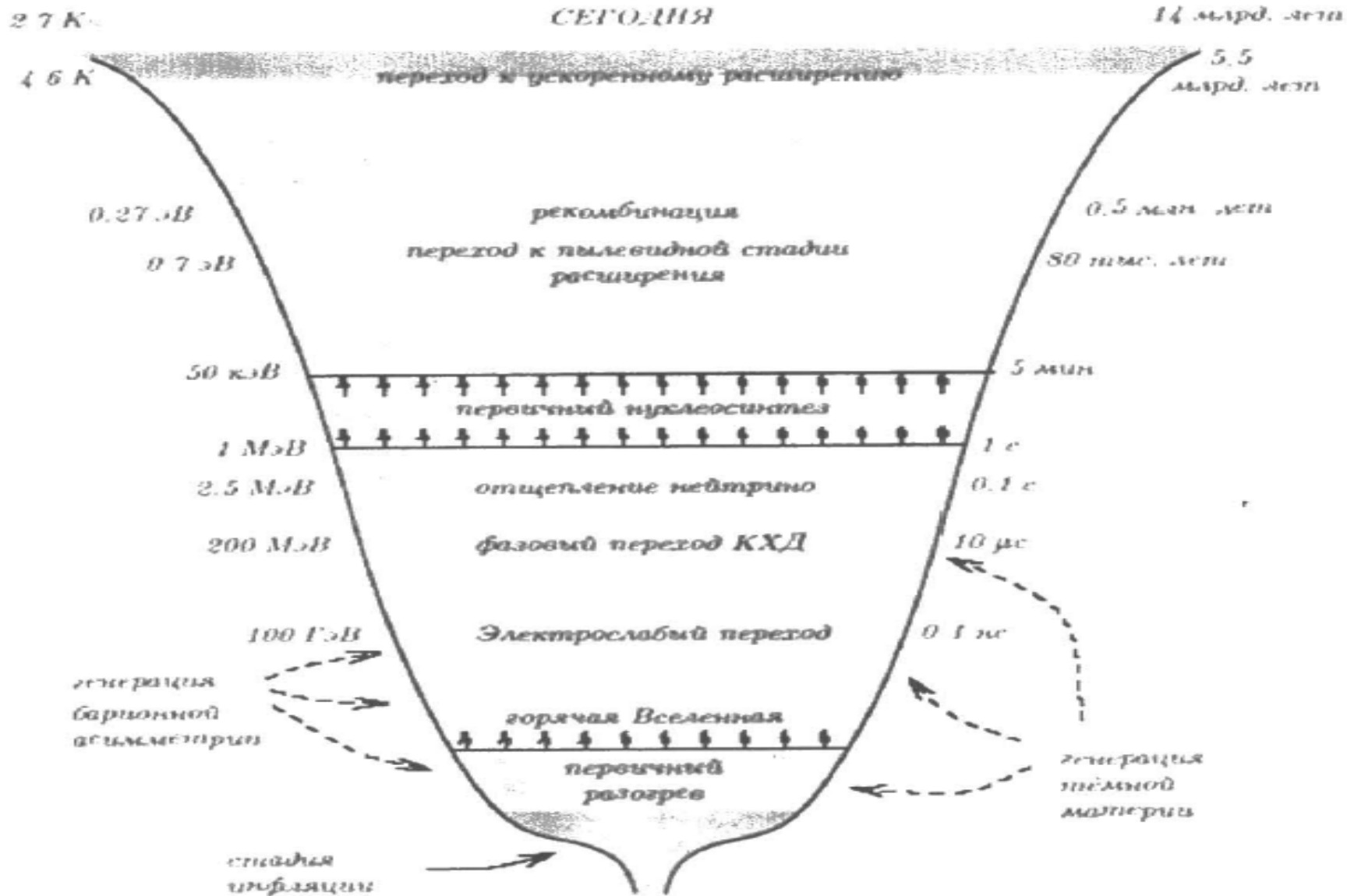
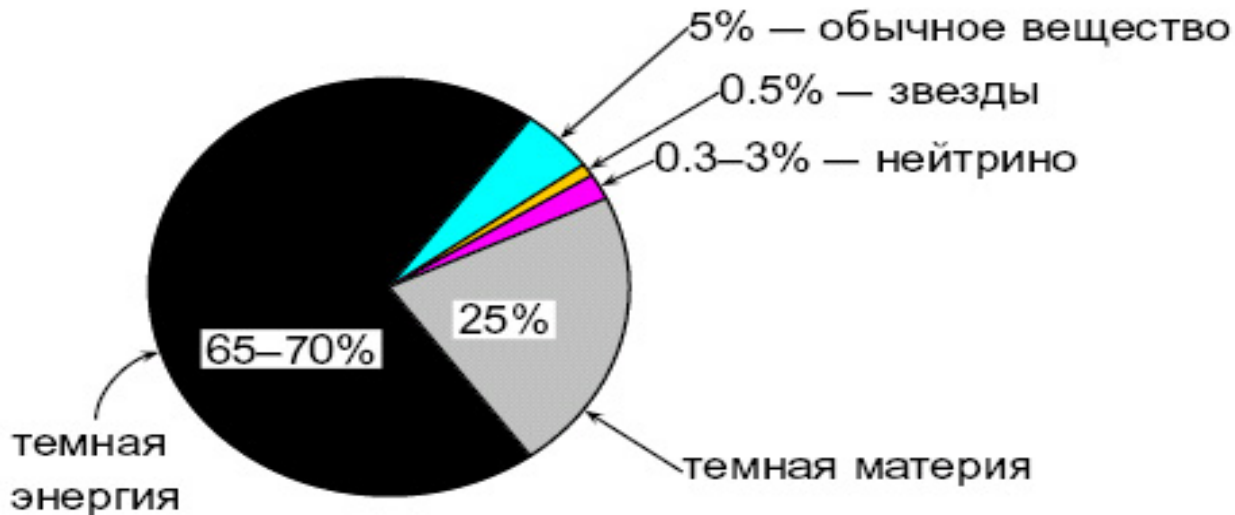


Рис. 1.9. Этапы эволюции Вселенной.

Баланс енергій у сучасному Всесвіті

- частка звичайної матерії (протонів, атомних ядер, електронів) у сумарній енергії у сучасному Всесвіті складає всього 5%. Окрім звичайної матерії у Всесвіті присутні реліктові нейтрино — біля 300 нейтрино усіх типів у кубічному сантиметрі. Їх вклад у повну енергію (масу) Всесвіту невеликий, оскільки маси нейтрино малі, і складають не більше 3%. Решта 90–95% повної енергії Всесвіту — **«невідомо що»**. яке складається з двох фракцій — темної матерії і темної енергії



Що нам відомо про “звичайну”

речевину (5% складової Всесвіту)

Three Generations
of Matter (Fermions)

	I	II	III	
mass→	2.4 MeV	1.27 GeV	171.2 GeV	0
charge→	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
spin→	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
name→	u up	c charm	t top	γ photon
Quarks	4.8 MeV	104 MeV	4.2 GeV	0
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	d down	s strange	b bottom	g gluon
<2.2 eV	<0.17 MeV	<15.5 MeV	91.2 GeV	
0	0	0	0	
$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	Z⁰ weak force	
0.511 MeV	105.7 MeV	1.777 GeV	80.4 GeV	
-1	-1	-1	±1	
$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
e electron	μ muon	τ tau	W[±] weak force	

Bosons (Forces)

- Quarks and gluons are confined in hadrons (baryons and mesons)
- The model contains the Higgs scalar doublet, which were discovered in 2011 y.
- Charged leptons are massive and contain both right and left components, while neutrinos are massless and left-handed

Закони Природи, властивості елементарних часток надійно описуються Стандартною Моделлю аж до відстаней 10^{-16} см, енергій 100 GeV

СМ панує у фізиці елементарних часток з 1973 року. Описує всю сукупність експериментальних даних. СМ містить більше 20 параметрів, що визначаються з експерименту і не включає гравітацію.

Стандартна модель взаємодії елементарних частинок (СМ) прекрасно узгоджується з експериментом («апофеоз»: відкриття Z W^\pm бозонів та бозону Хіггса в ЦЕРН)

Ключові невирішені питання

**Сьогодні точно не відомо, яка фізична природа
основної частини (95%) Всесвіту!**

- *темна енергія ?*
- *темна матерія (нові стабільні частинки?)*
- *чому Всесвіт складається з матерії, а антиматерія відсутня? (порушення баріонної і (чи?) лептонної симетрій)*
- *Що відбувалось в перша секунду існування Всесвіту*

Проведення експериментів на ЛНС

- дозволить знайти відповіді на багато з цих питань у недалекому майбутньому — протягом 10–15 років, а може бути, і раніше.

Наш час — це час кардинальної зміни погляду на природу, і головні відкриття тут ще попереду.

Проведення експериментів на LHC

При вдалому збігу обставин дозволить

1. Відкрити частинки темної матерії
2. Вияснити яка фізика лежить в основі асиметрії між речовиною і антиречовиною
3. З'ясувати, які фізичні процеси проходили з моменту **10^{-11}** секунди після Великого Вибуху

В протилежному випадку будуть відкинуті популярні гіпотези!

Основні фізичні задачі експериментів на LHC

ATLAS і **CMS**: пошук бозона Хіггса, фізики поза рамок СМ (суперсиметрія? додаткові розмірності? абсолютно нові взаємодії і/або закони природи?), вивчення властивостей важких кварків (b та t).

LHCb: вивчення властивостей b-кварку і порушення комбінованої просторової і зарядової парності (CP-порушення) у b-секторі.

ALICE: дослідження властивостей ядерної матерії у режимах екстремально високих густин енергії і температур (пошук і вивчення властивостей кварк-глюонної плазми).

Задача 1-детектування бозону Хіггса

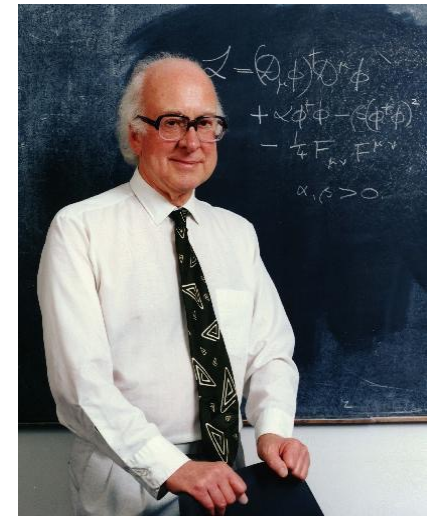
Єдина не відкрита до 2012 р частинка СМ
Передбачена Р. Браутом і Ф. Еглером

Природа механізму спонтанного порушення
електрослабої калібровочної інваріантності:

Пояснення існування мас у W^\pm - і Z^0 -бозонів **потребує введення у теорію скалярних полів** с неінваріантним відносно калібровочних перетворень
основним станом – вакуумом

Наслідок цього – виникнення **нової скалярної частинки – бозона Хіггса**

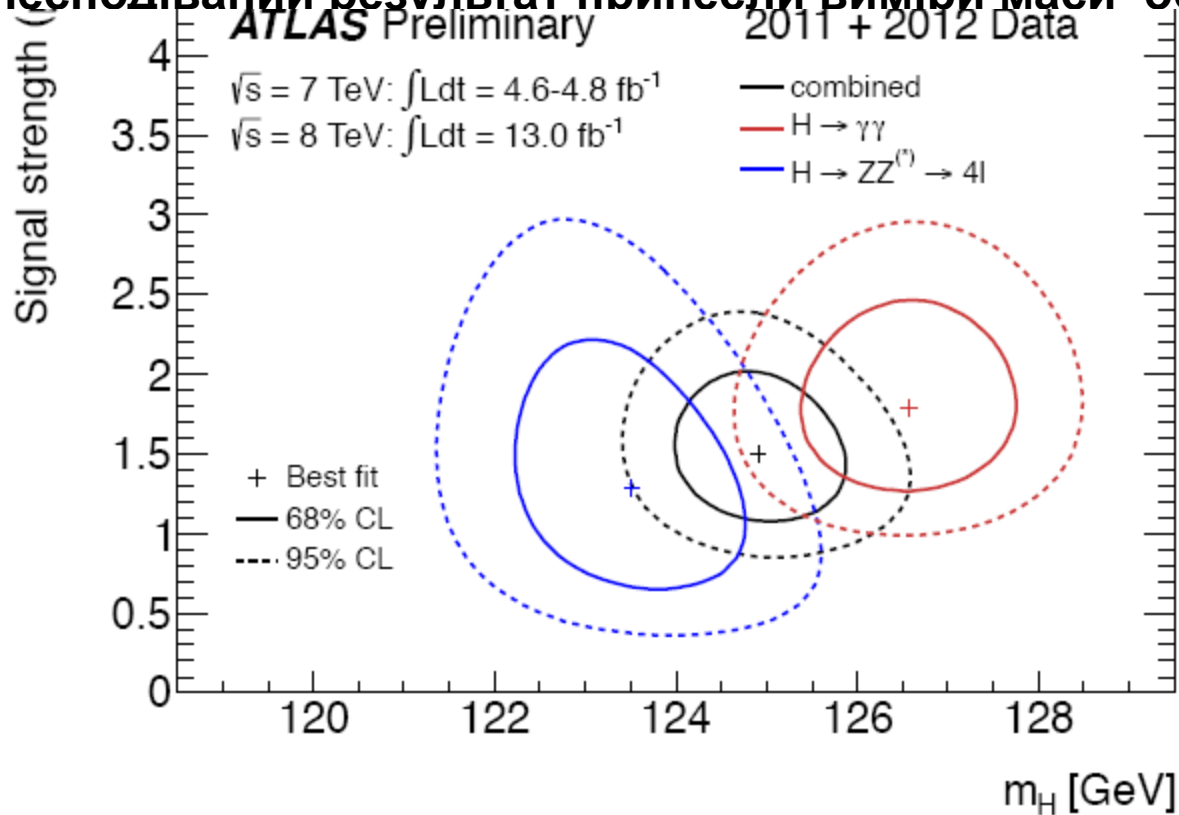
•Відкриття бозону Хіггса не вирішило проблему ієрархії мас елементарних частинок але відкриття бозону Хіггса стало гігантським кроком в напрямку розв'язання проблеми структури вакууму.



За станом на кінець 2017 року склалась така картина

- Була достовірно задетектована частинка з масою в районі 125–126 ГеВ, властивості якої очень близькі до передбаченої Енглером_Браутом –Хіггсом частинки хиггсовского бозона.
- Хіггсовський бозон проявляє себе найбільш чітко в двох каналах розпаду: на два фотони і на два Z-бозони з їх послідуєчими розпадами на чотори лептони (електрона чи мюона).
- Найбільш гучний результат заключається в том, що виміряна ймовірність розпаду на два фотона виявилась в півтора-два рази більше, ніж передбачалась Це перевищення було синхронно помічено в двох головних детекторах, працюючих [CMS](#) и [ATLAS](#).

Самий несподіваний результат принесли виміри маси бозона



- **Рис.** Виміри мас (по горизонтальній осі) і інтенсивностей (по вертикальній осі) хіггсовського бозона. Червоним показано дані, отримані з розпаду на два фотони, синім — данні ZZ-розпаду. Чорним показані результати їх статистичного об'єднання. Зображення з повідомлення колаборації ATLAS

Задача 2 пошук суперсиметричних партнерів вже відомих частинок

Суперсиметрія – новий тип симетрії не виявлений до цього часу у природі с-частинки передбачаються теорією як наслідок суперсиметрії Всесвіту. Внаслідок порушення цієї симетрії такі частинки повинні бути дуже важкими і поки що експериментально не виявлені, їх детектування залежить від того наскільки с-частинки є важкими.

Поперечний переріз лежить в межах від декількох фемптобарн до декількох пікобарн. Відмінною особливістю суперсиметричних теорій є однакове число бозонних і ферміонних станів з ненульовою енергією.

Калібрувальні теорії такого типу є цілком задовільними для опису взаємодій у достатньо широкій області енергії.

Задача 2 пошук суперсиметрії

Minimal particle content

□ Gauge / Gaugino Sector

Standard Bosons	Supersymmetric Partners
$W^\pm \quad H^\pm$	Charginos $\chi_{1,2}^\pm$
$g \quad Z$ $h \quad H \quad A$	Neutralinos $\chi_{1,2,3,4}^0$
g_i	Gluinos \tilde{g}_i

[Two Higgs doublets]

[All fermions]

And also ...

Graviton G	Gravitino \tilde{G}
--------------	-----------------------

□ Particle / Sparticle Sector

Standard Particles	Supersymmetric Partners
Leptons l	Sleptons $\tilde{l}_{R,L}$
Neutrinos ν_ℓ	Sneutrinos $\tilde{\nu}_\ell$
Quarks q	Squarks $\tilde{q}_{R,L}$

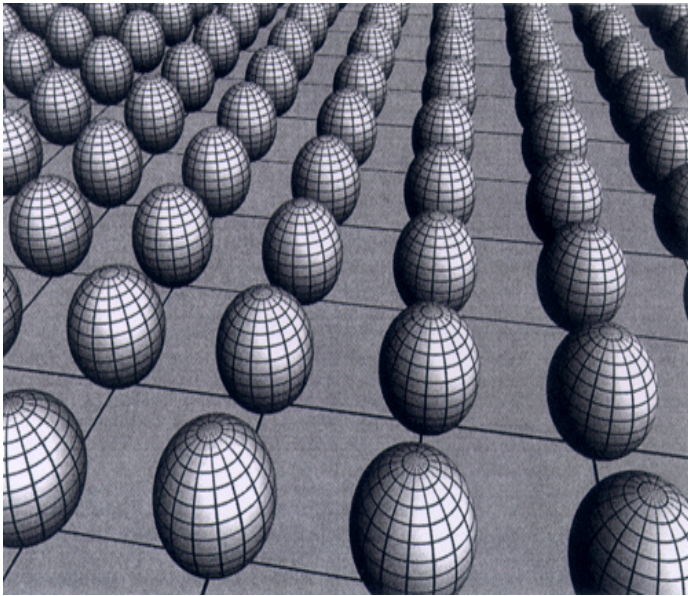
[All scalars]

SUSY відповідає на більшість відкритих питань СМ

- Містить об'єднання сильної та електрослабкої взаємодії (локальна теорія SUSY може включати також гравітацію – зв'язок зі струнною теорією).
- Вирішує проблему ієрархії енергетичних масштабів.
- Передбачає значення ряду параметрів СМ.
- Передбачає час життя протону (квазістабільний).
- Пояснює квантування електричного заряду.
- Пояснює малість маси нейтрино.
- Пояснює асиметрію матерія-антиматерія (CP-порушення).
- Співвідносить масу кварків та лептонів.
- «Темна матерія» може складатися з легких SUSY частинок.

Задача 3 – пошук додаткових вимірів

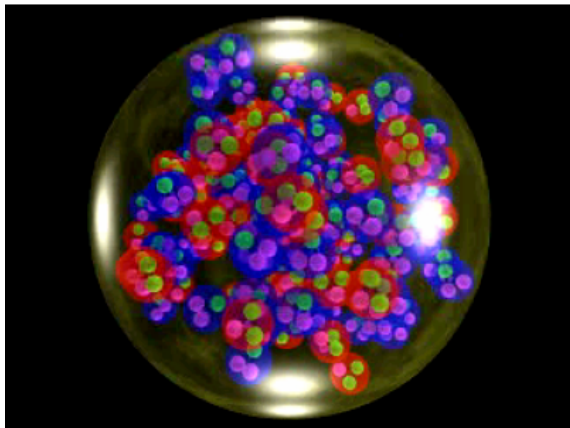
- Додаткові виміри?



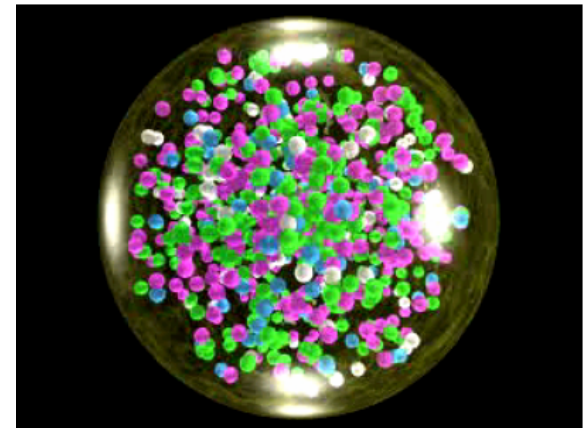
Інший шлях за рамками стандартної моделі відкривається ідеєю про додаткові розміри простору і часу, які згорнуті “компактифіковані”, але при енергіях більше ніж 1 TeV їх можна буде помітити.

Задача 4 дослідити КГП

- Дослідити новий стан речовини — кварк-глюонну плазму (КГП), що виникає при зіткненнях ядер свинцю на високих швидкостях.
- Згідно моделі Великого Вибуху у такому стані перебувала речовина через 10^{-25} секунди після Великого Вибуху .

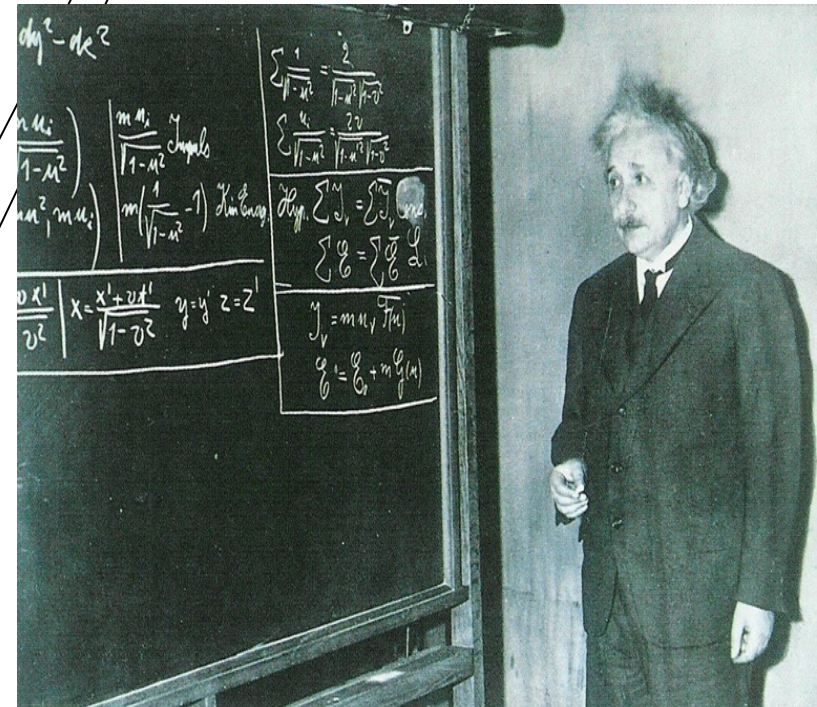
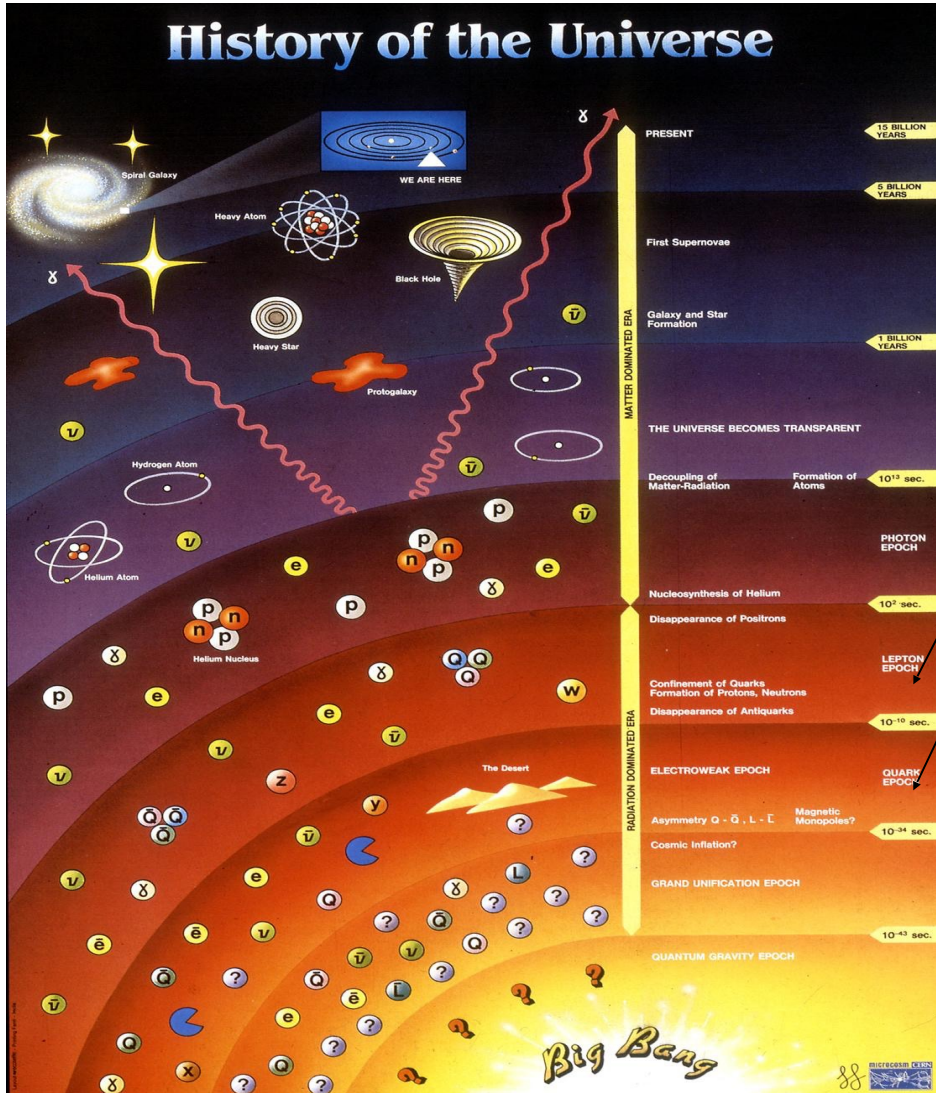


Газ адронів



Газ кварків

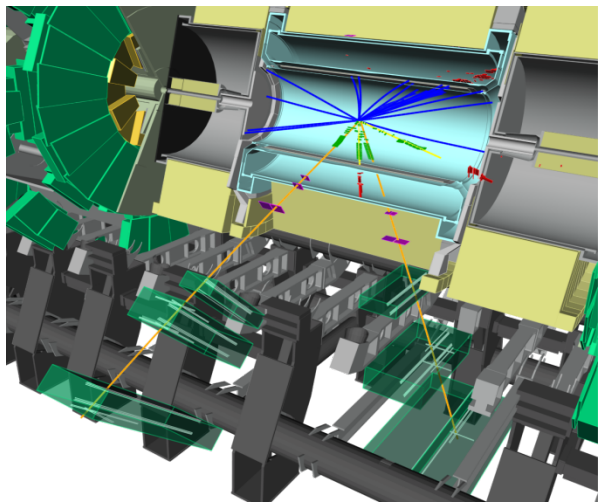
Експерименти на ЛНС – можливість вивчити процеси на ранніх стадіях Всесвіту





Я пережил
запуск
Большого
Андронного
Коллайдера

Задача 1- пошук бозона Хіггса



Поки що невідомо яка маса бозона Хіггса і чи існує один бохон Хіггса чи їх декілька, а також чи мають вони внутрішню структуру. Напрямок пошуків бозона Хіггса визначаються різними механізмами народження та мод розпаду цієї частинки.

Змодельована подія: Розпад бозона Хіггса на два гамма-кванти (жовті короткі треки) и два мюона (оранжеві довгі)

Гра «Спіймай хіггс»

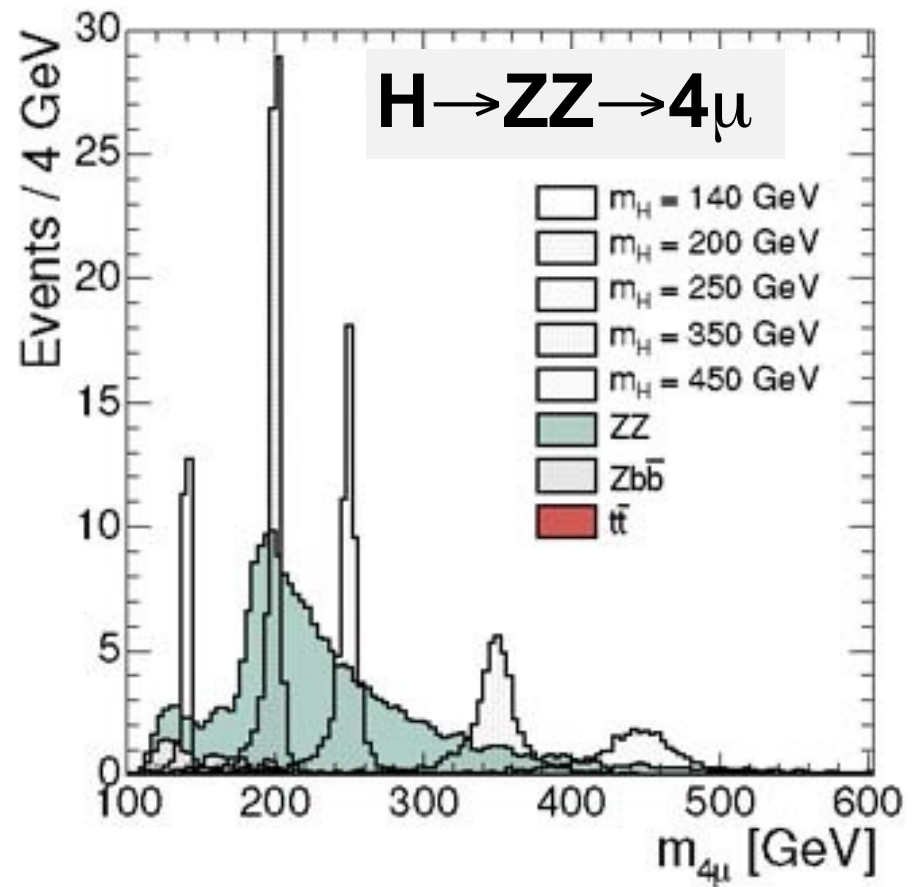
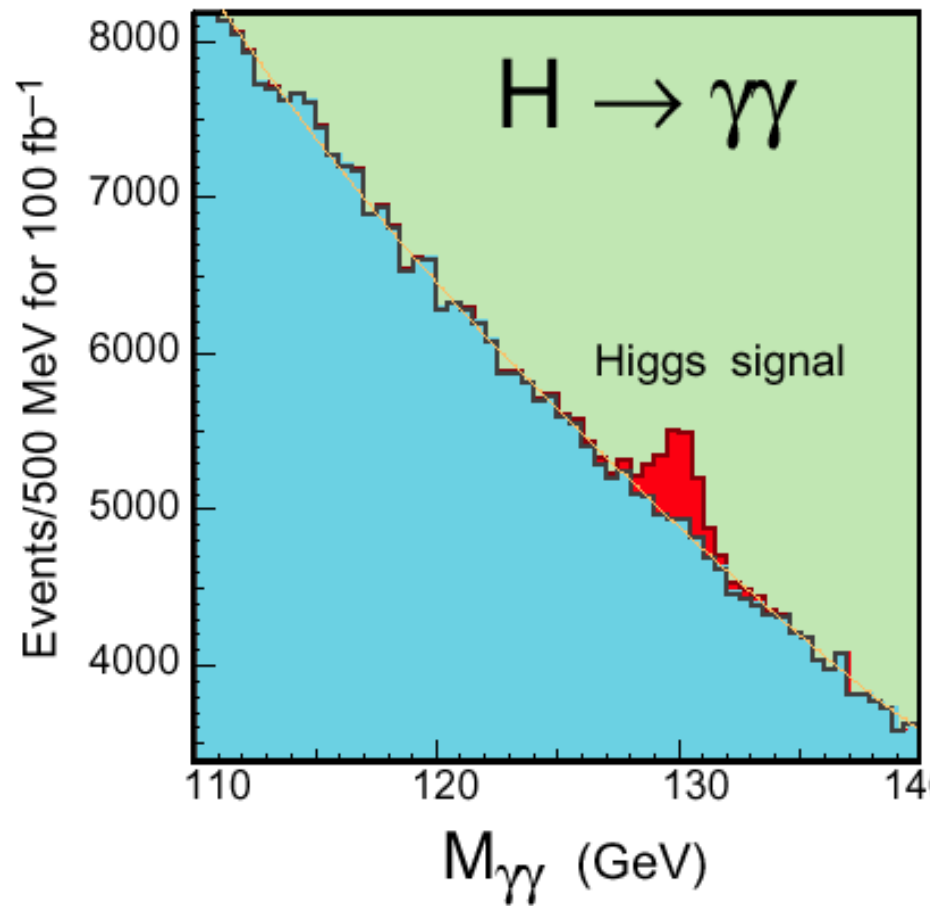
<http://www.sciencemuseum.org.uk/antenna/bigbang/huntforhiggs/index.asp>

Задача 1- пошук бозона Хіггса

- Найбільш ймовірний інтервал мас 114-126 GeV розпад бозона Хіггса на два гамма кванти.
- Мода розпаду бозона Хіггса на два Z-бозони кожен з яких розпадеться на два мюона проявиться якщо маса бозона більш ніж 200 GeV.
- Якщо виявиться, що маса бозона Хіггса порядку 1 TeV то потрібно вивчати його канали розпаду з народженням W і Z бозонів і струменів у різних комбінаціях.

Відкриття бозону Хіггса не вирішить проблему ієрархії мас елементарних частинок але відкриття бозону Хіггса стане гігантським кроком в напрямку розв'язання проблеми структури вакууму.

Реконструкція бозона Хіггса на LHC



Задача 2 пошук суперсиметрії

Minimal particle content

□ Gauge / Gaugino Sector

Standard Bosons	Supersymmetric Partners
W^\pm H^\pm	Charginos $\chi_{1,2}^\pm$
g Z h H A	Neutralinos $\chi_{1,2,3,4}^0$
g_i	Gluinos \tilde{g}_i

[Two Higgs doublets]

[All fermions]

And also ...

Graviton G	Gravitino \tilde{G}
--------------	-----------------------

□ Particle / Sparticle Sector

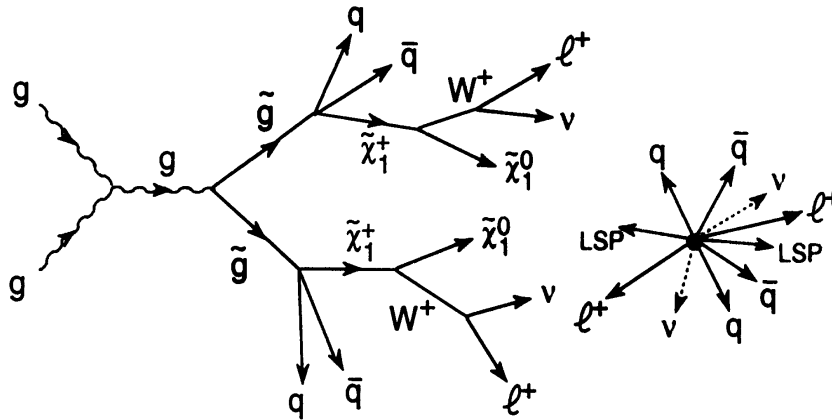
Standard Particles	Supersymmetric Partners
Leptons l	Sleptons $\tilde{l}_{R,L}$
Neutrinos ν_ℓ	Sneutrinos $\tilde{\nu}_\ell$
Quarks q	Squarks $\tilde{q}_{R,L}$

[All scalars]

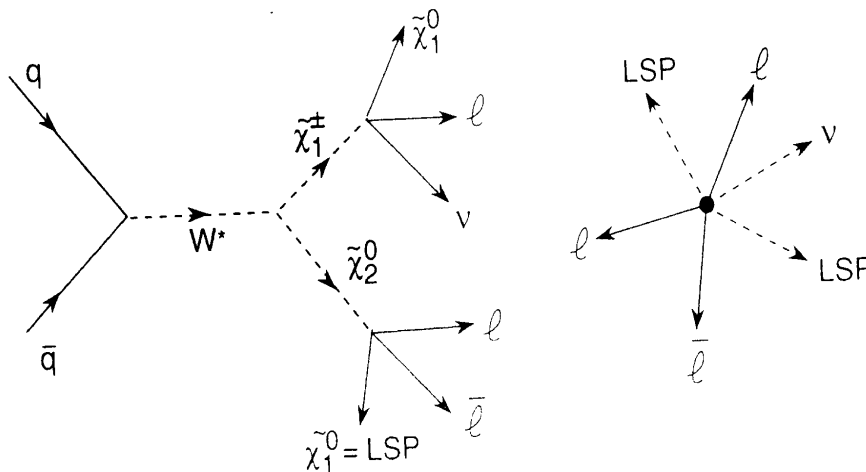
SUSY відповідає на більшість відкритих питань СМ

- Містить об'єднання сильної та електрослабкої взаємодії (локальна теорія SUSY може включати також гравітацію – зв'язок зі струнною теорією).
- Вирішує проблему ієрархії енергетичних масштабів.
- Передбачає значення ряду параметрів СМ.
- Передбачає час життя протону (квазістабільний).
- Пояснює квантування електричного заряду.
- Пояснює малість маси нейтрино.
- Пояснює асиметрію матерія-антиматерія (CP-порушення).
- Співвідносить масу кварків та лептонів.
- «Темна матерія» може складатися з легких SUSY частинок.

Сигнали народження SUSY частинок



Пара глюіно \rightarrow
струмені + лептони +
missing E_T

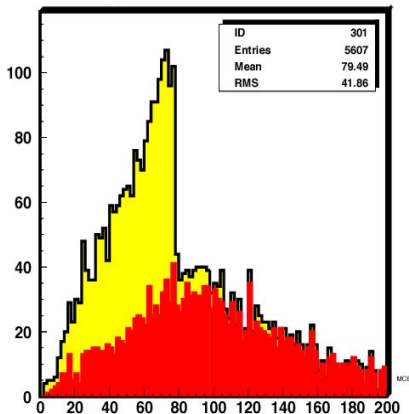


Пара кварків \rightarrow
3 лептони + missing E_T

Реконструкція SUSY частинок на LHC

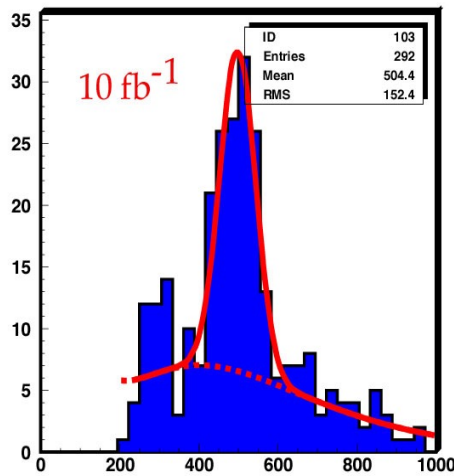
Dilepton edge

$E_t^{\text{miss}} > 100 \text{ GeV}$



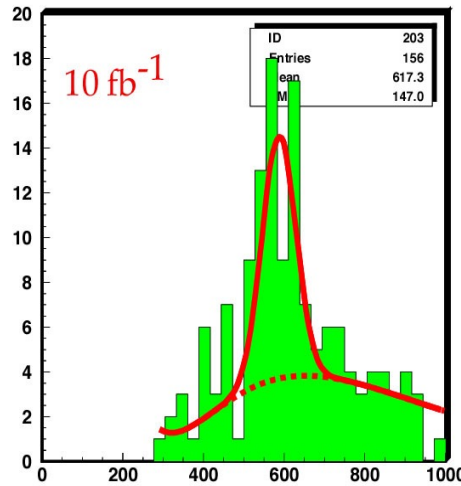
$M(e^+e^-) + M(\mu^+\mu^-) \text{ GeV}$

Sbottom reconstruction



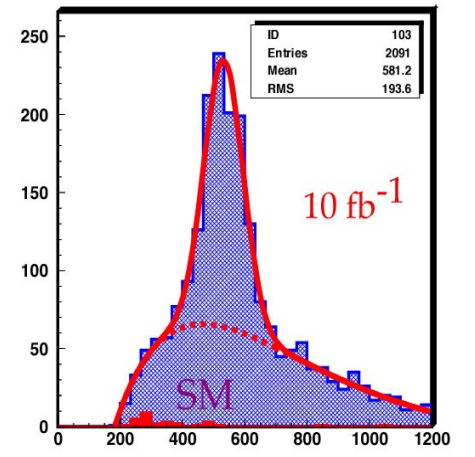
$M(b \tilde{\chi}_2^0) \text{ GeV}$

Glino reconstruction

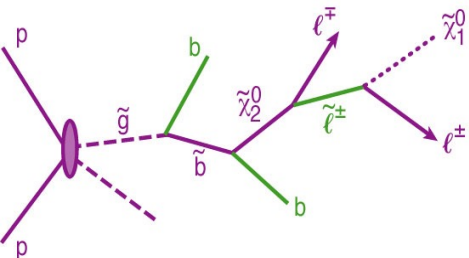


$M(bb \tilde{\chi}_2^0) \text{ GeV}$

Squark reconstruction anti-b-tag: $\sigma < 2$, b-veto



$M(q \tilde{\chi}_2^0) \text{ GeV}$



fit:

$$M(b \tilde{\chi}_2^0) \text{ GeV} = 499 \pm 7 \text{ GeV}$$

$$\sigma = 48 \text{ GeV}$$

generated:

$$M(\tilde{b}_L) = 496 \text{ GeV}$$

$$M(\tilde{b}_R) = 524 \text{ GeV}$$

fit:

$$M(bb \tilde{\chi}_2^0) \text{ GeV} = 587 \pm 11 \text{ GeV}$$

$$\sigma = 41 \text{ GeV}$$

generated mass: $M(\tilde{g}) = 595 \text{ GeV}$

fit:

$$M(q \tilde{\chi}_2^0) = 532 \pm 4 \text{ GeV}$$

$$\sigma = 62 \text{ GeV}$$

$$M(\tilde{d}_L) = M(\tilde{s}_L) = 543 \text{ GeV}$$

$$M(\tilde{u}_L) = M(\tilde{c}_L) = 537 \text{ GeV}$$

Альтернатива суперсиметрії: моделі з додатковими вимірами (Large Extra Dimensions – LXD) $d = 1, 2, \dots, 6, 7$?

Основна мотивація: проблема ієрархії (слабкість гравітації).

Рішення: гравітація сильна у додаткових просторових вимірах, а слабка тільки у нашому (3+1)-розмірному світі (брані), так як є залишковою (наведеною) від більш фундаментальної гравітаційної багатовимірної взаємодії.

Поля СМ можуть бути локалізовані на «тонкій» доменній стінці (брані) в багатовимірному просторі (В.А.Рубаков, М.Е.Шапошников, 1983)

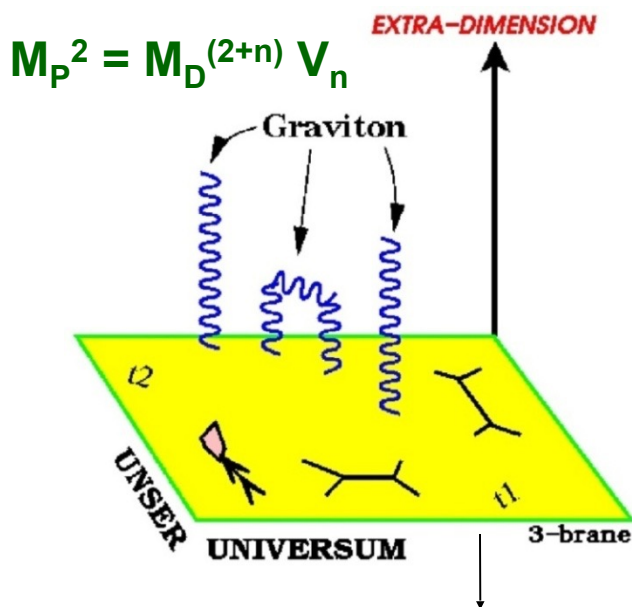
Ефективні сучасні теорії з LXDs:

- *Arkani-Hamed, Dimopoulos & Dvali (ADD, 1998)*
- *Randall & Sundrum (RS, 1999)*
- Universal Extra Dimensions (UXD)
- Warped ...

Популярні сценарії моделей з додатковими вимірами у плоскій та експоненційно спадаючій метриці

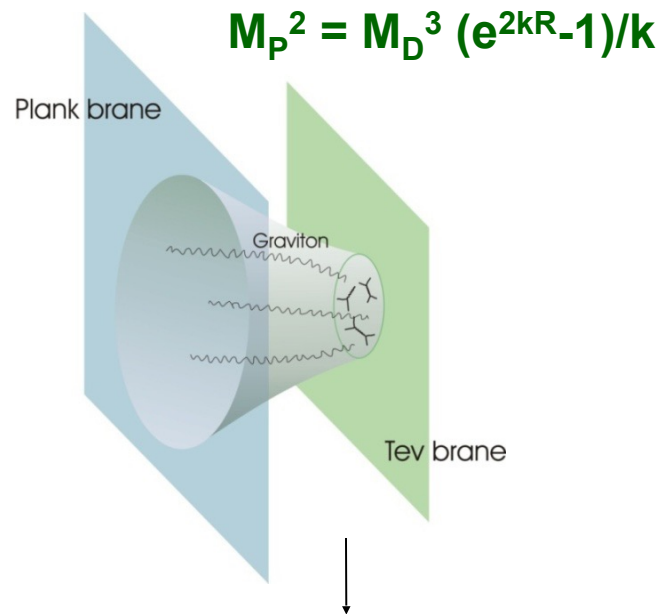
ADD сценарій з плоским n-вимірним простром (одна брана без натягу та 2-6 компактних Extra Dim $\rightarrow n=5-9$)

RS сценарій з двома бранами (1 Extra Dim), масштаб дії полів СМ при їх проекції з 5-вимірної брани на «видиму» брану падає від M_p до TeV експоненційно



Процеси з удаваним порушенням закону збереження енергії-імпульсу

Вся звична матерія (кварки, лептони, калібрувальні бозони, Хіггс-бозон) є локалізованою на брані, тільки гравітони (і, можливо, якісь інші, поки що невідомі екзотичні частинки) мають можливість «подорожувати» по додаткових вимірах.

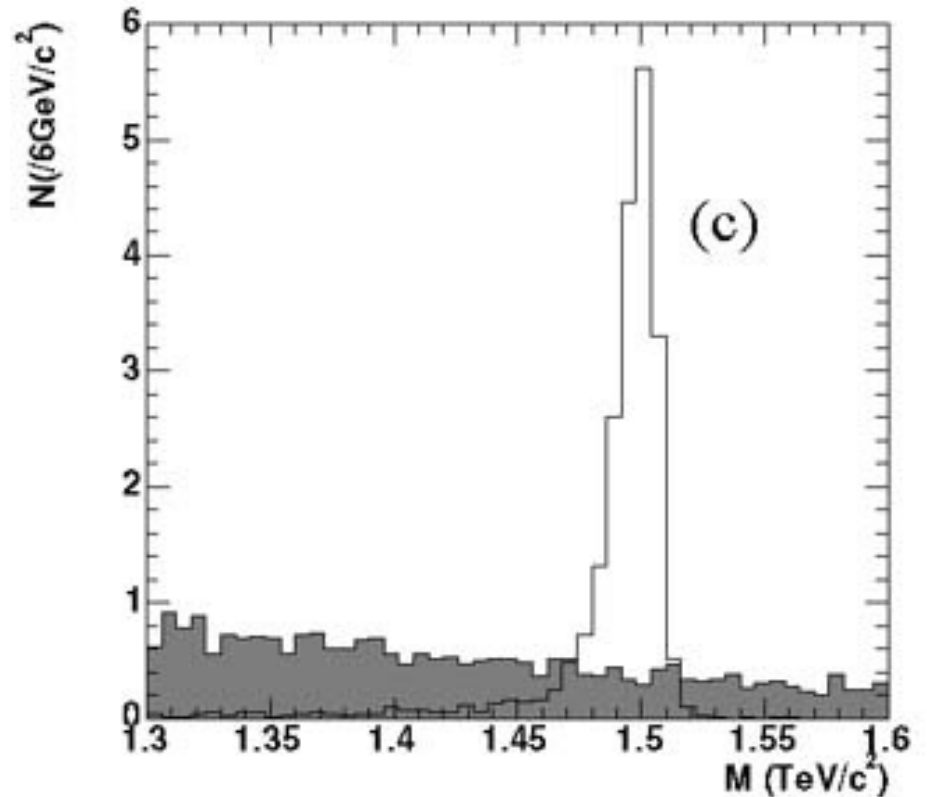
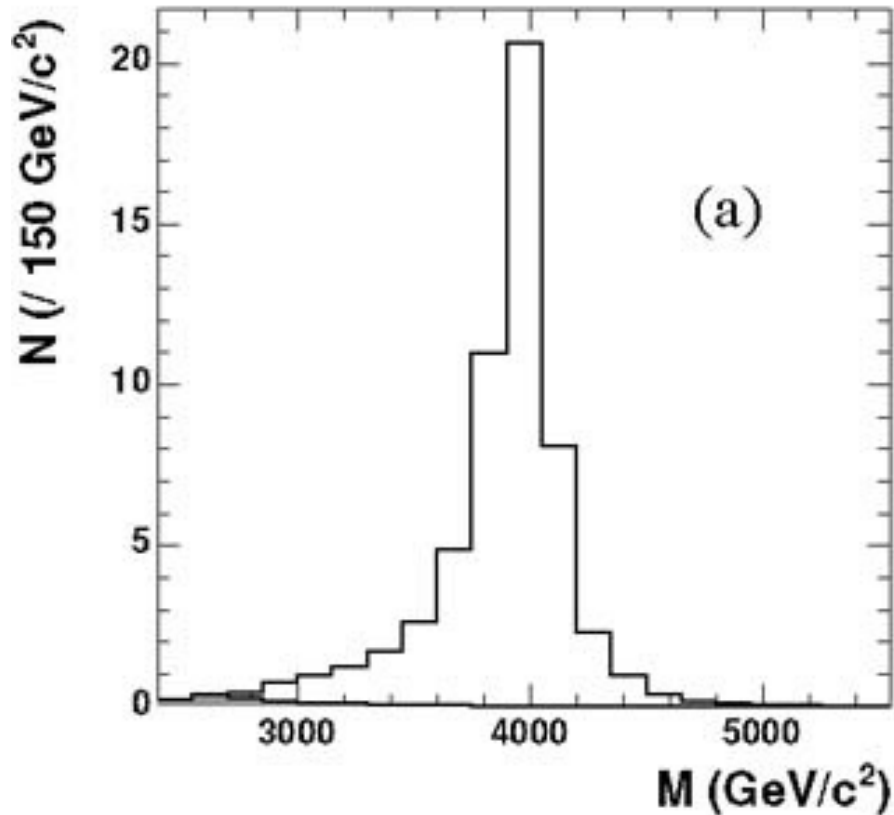


Процеси з народженням спектру масивних резонансів спіну 2

Реконструкція ExtraDim частинок на LHC

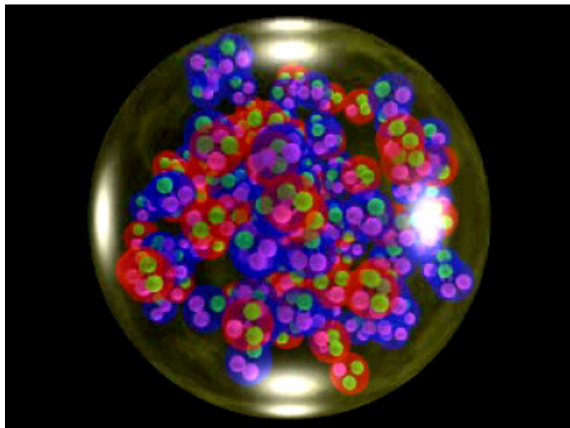
$Z \rightarrow e^+e^-$, $M=4 \text{ TeV}/c^2$

$G \rightarrow e^+e^-$, $M=1.5 \text{ TeV}/c^2$

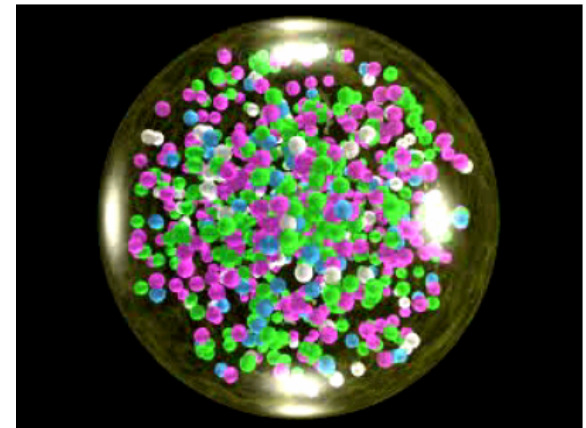


Задача 4 дослідити КГП

- Дослідити новий стан речовини — кварк-глюонну плазму (КГП), що виникає при зіткненнях ядер свинцю на високих швидкостях.
- Згідно моделі Великого Вибуху у такому стані перебувала речовина через 10^{-25} секунди після Великого Вибуху .



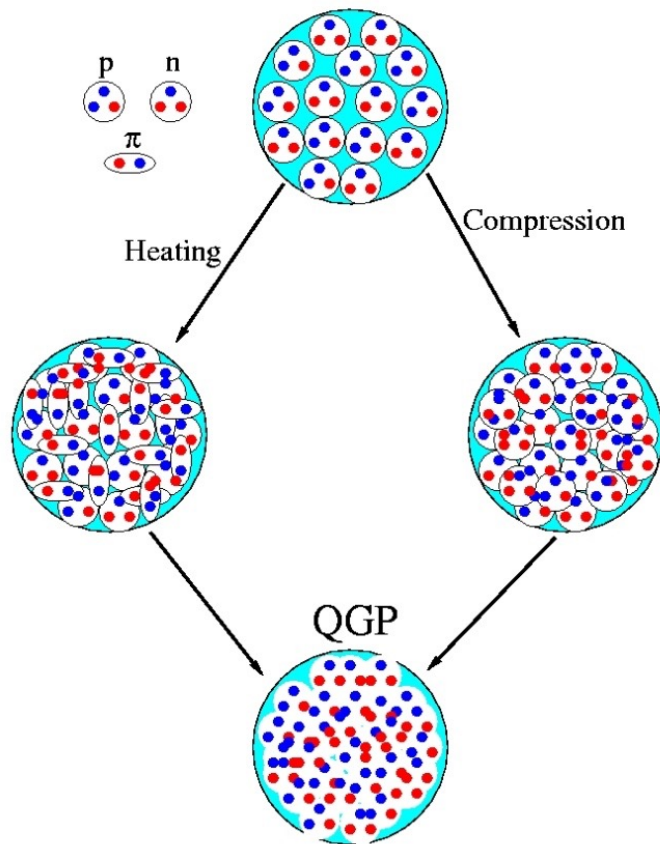
Газ адронів



Газ кварків

Деконфаймент і кварк-глюонна плазма

- Що буде, якщо ми стиснемо або нагріємо середовище так, що адрони почнуть перекриватися?

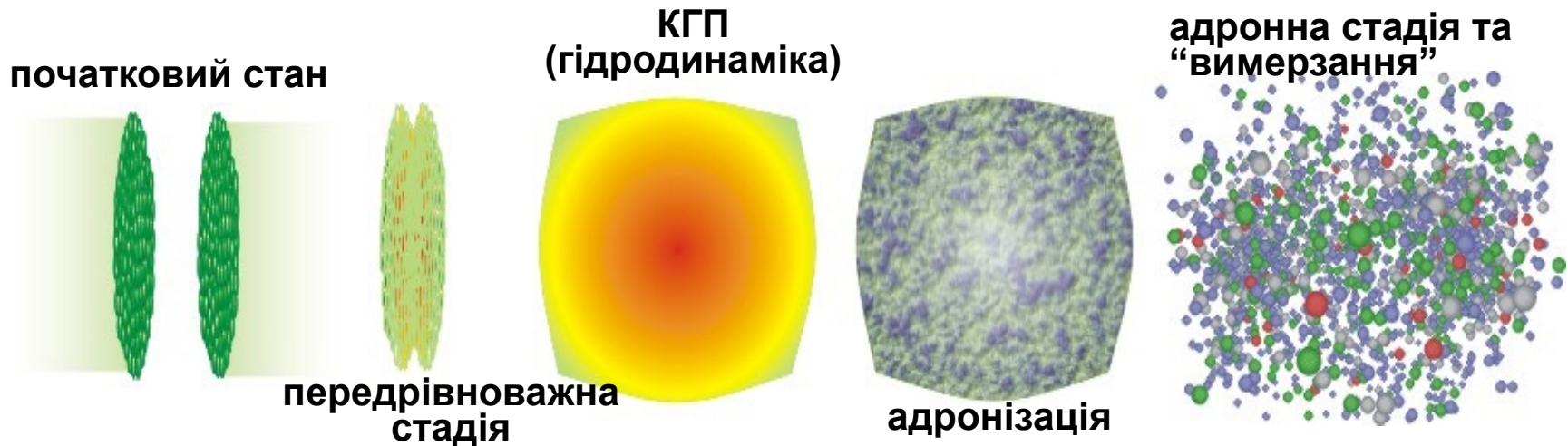


Розрахунки КХД на ґратах передбачають, що якщо система адронів досягне високої густини і/або температури, то відбудеться фазовий перехід в стан деконфаймента.

У новій фазі, що називається **кварк-глюонною плазмою** (КГП), кварки і глюони більше не стримуються всередині індивідуальних адронів, вони починають вільно пересуватися всередині великого об'єму.

Пошук та вивчення властивостей КГП у релятивістських зіткненнях іонів

У релятивістських зіткненнях важких іонів можливе формування надщільного стану КХД-матерії у квазімакроскопічних об'ємах (у порівнянні з характерними адронними масштабами).



«М'які» тести ($p_T \sim \Lambda_{\text{QCD}} = 200 \text{ MeV}$)

- ✓ спектри частинок з малими поперечними імпульсами p_T та їх імпульсні кореляції;
- ✓ потокові ефекти;
- ✓ теплові фотони та ділептони;
- ✓ вихід дивних частинок.

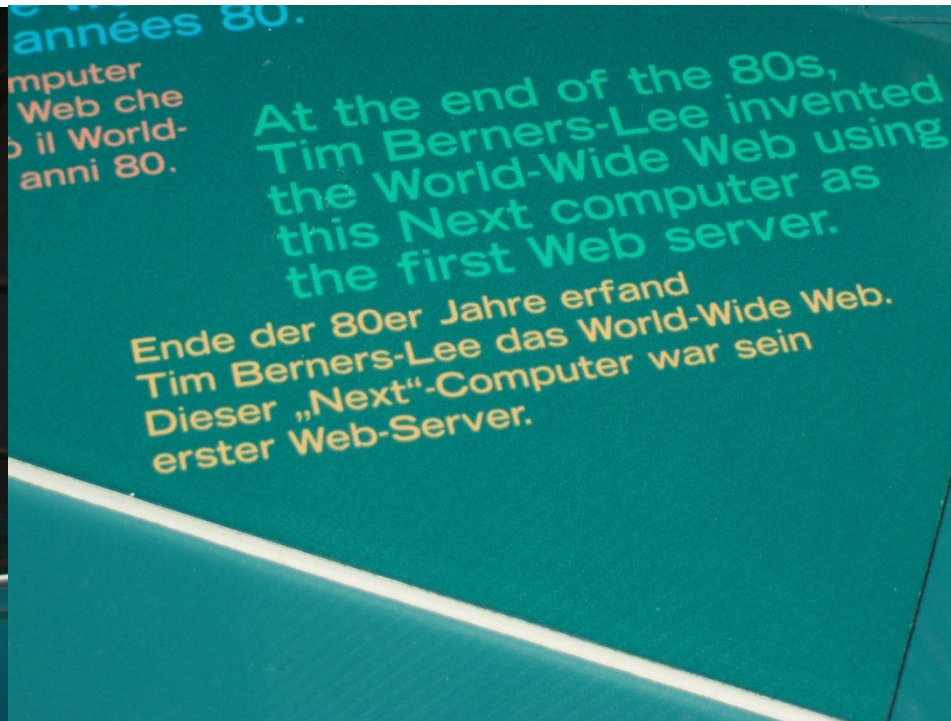
«Жорсткі» тести ($p_T, M \gg \Lambda_{\text{QCD}} = 200 \text{ MeV}$)

- ✓ спектри частинок з більшими поперечними імпульсами p_T та їх кутові кореляції;
- ✓ адронні струмені;
- ✓ кварконії;
- ✓ важкі кварки.

ВАК та «народне господарство»

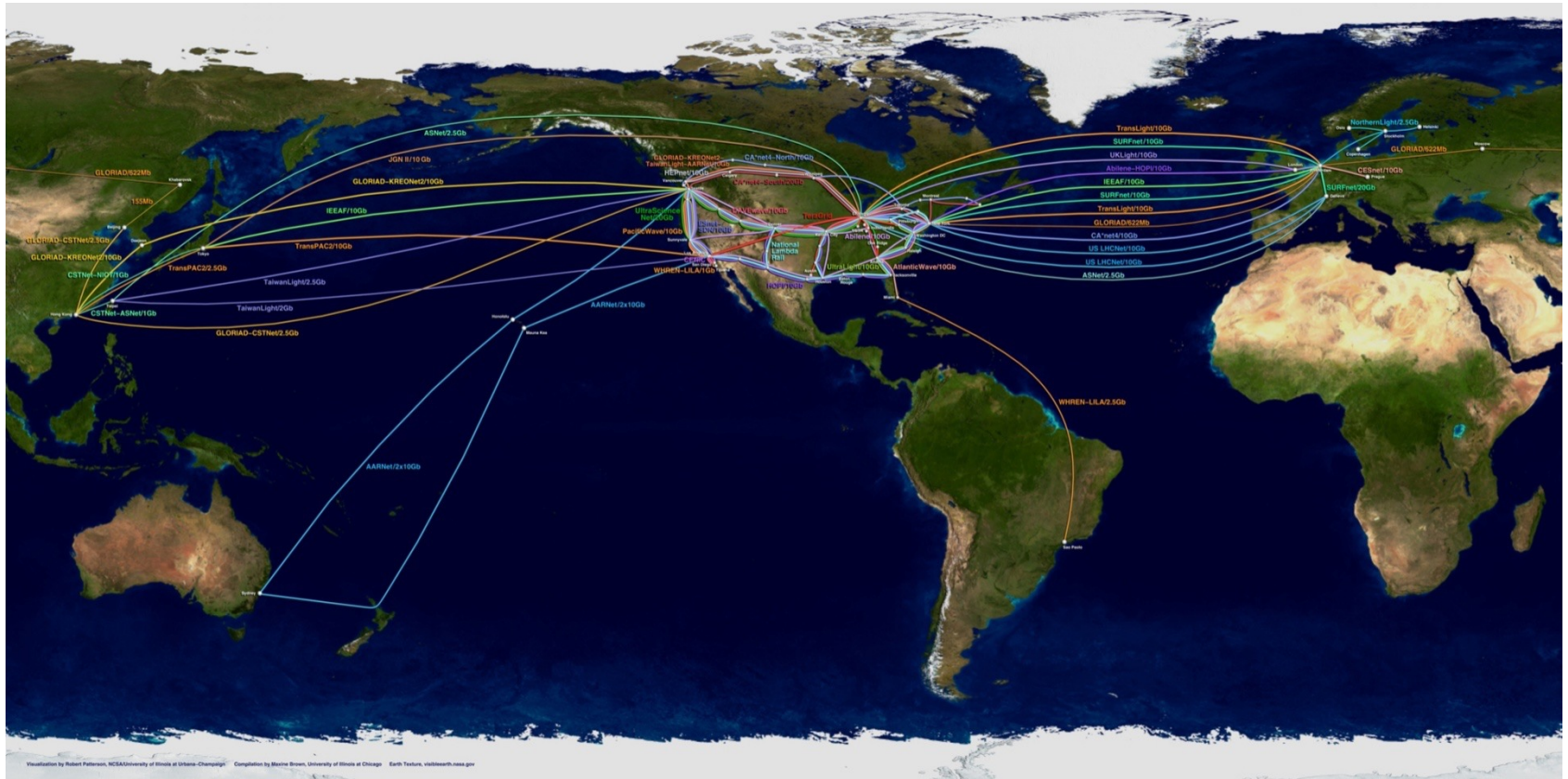
- Спорудження ВАК потребувало абсолютно нових технологічних рішень (виготовлення магнітів, фокусування пучка, кріогенна техніка).
- Необхідність збереження та обробки величезного об'єму інформації (100 000 DVD на рік) стимулювало до розробки нових інформаційних технологій (ГРІД)

Розвиток нових комп'ютерних технологій для обробки даних LEP (WWW)



У кінці 80-х років у ЦЕРНі було створене комп'ютерне середовище World-Wide Web (WWW) та перший веб-браузер (як “побічний продукт” досліджень на LEP). Комп'ютер – перший веб-сервер зберігається в музеї Microcosm у ЦЕРНі. Дирекція ЦЕРН свого часу відреагувала на перспективи створення WWW зі стриманим оптимізмом: «Looks vague, but exciting» («Виглядає не до кінця зрозумілим, але хвилюючим»).

Розвиток нових комп'ютерних технологій для обробки даних LHC (GRID)



GRID – серед розподілених обчислень, що дозволяє об'єднати комп'ютерні ресурси світових наукових центрів для проведення аналізу величезного об'єму даних та інтенсивних обчислень. НДІАФ МДУ – регіональний комп'ютерний центр для аналізу даних LHC (“Tier-2” center).