

末日實驗? - LHC高能質子對撞實驗

Proton Collisions at LHC - the Doom-day Experiment?

朱明中

香港中文大學物理系

mcchu@phy.cuhk.edu.hk

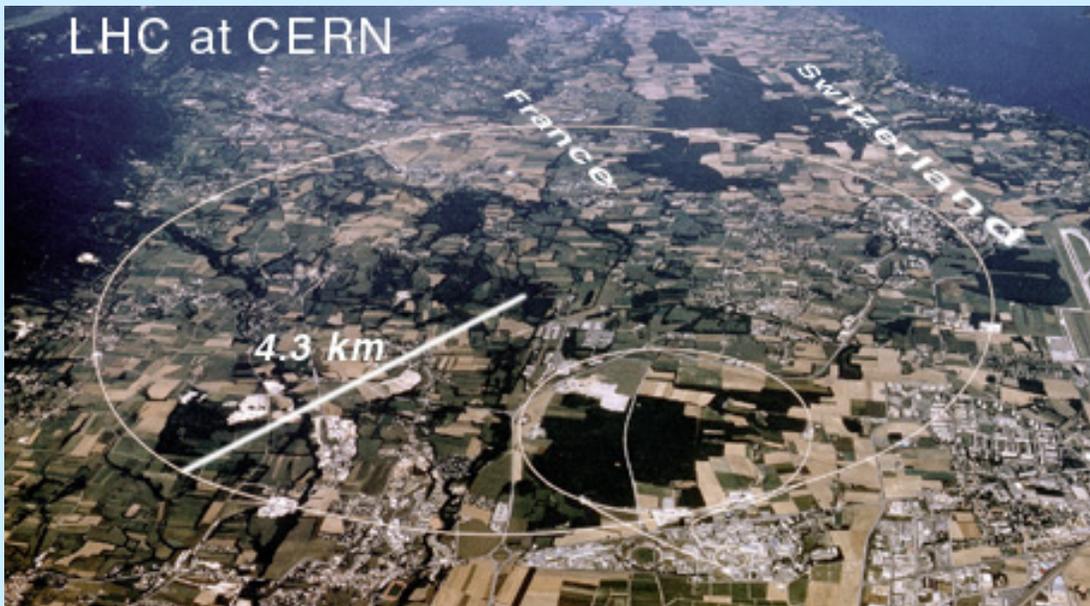
26/9/2008

<http://www.youtube.com/watch?v=WvEK5uZXpZU&feature=related>

<http://www.sciam.com/article.cfm?id=the-discovery-machine-hadron-collider>

Large Hadron Collider

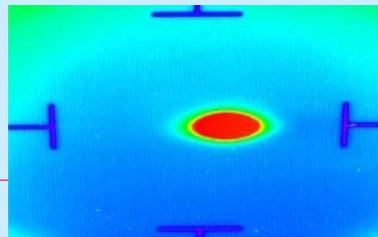
大型強子對撞器



CERN: 世界最大的基礎物理實驗室

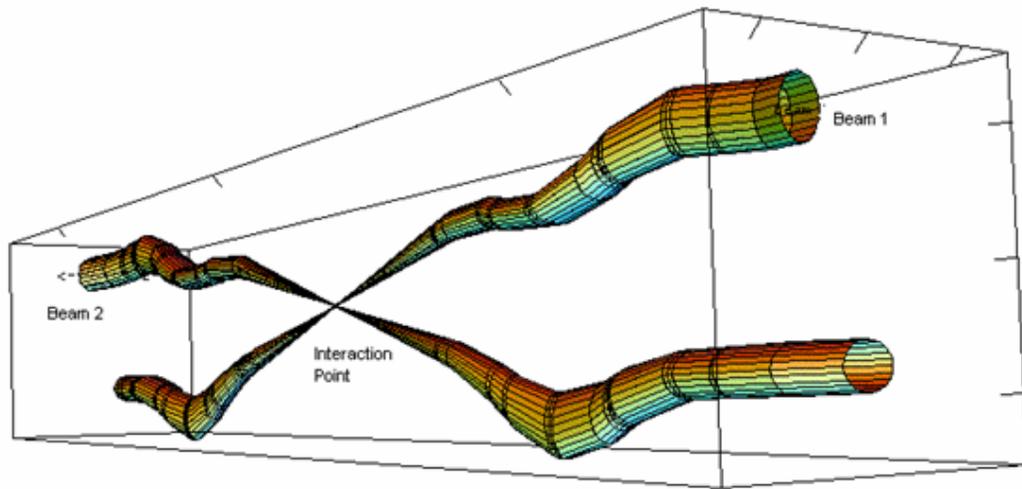
質子加速至 $v = 99.9999999\% c$ (7 TeV)
粒子束: 2808小束x 1.15×10^{11} 質子 (mmxcm)
總能量 = 362 MJ
~ 時速150 km 火車的動能
可把500kg 的銅燒溶

LHC: 87.5 億美元建造費



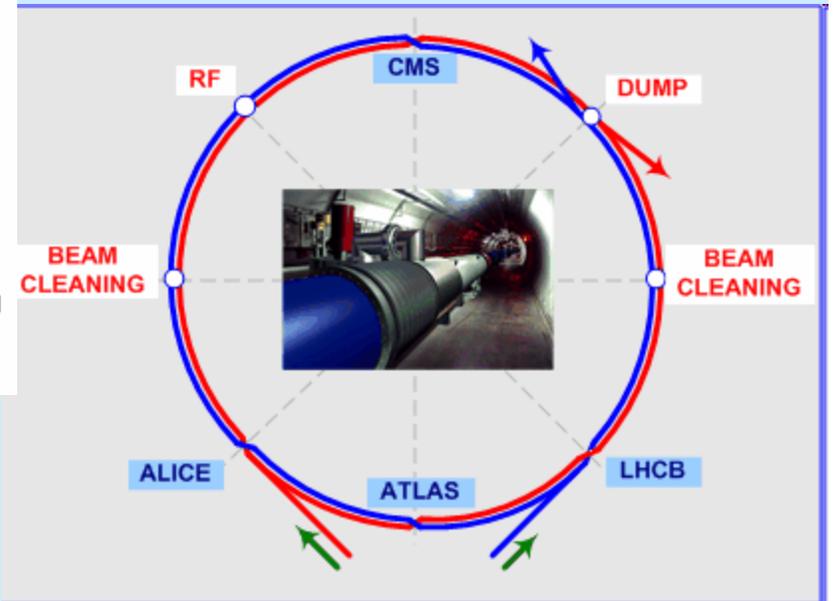
<http://lhc-machine-outreach.web.cern.ch/lhc-machine-outreach/>

LHC 大型强子對撞器



Relative beam sizes around IP1 (Atlas) in collision

每25ns 二粒子束相交，每次相交只有約二十次撞擊，每秒六億次撞擊



四個撞擊點：探測器

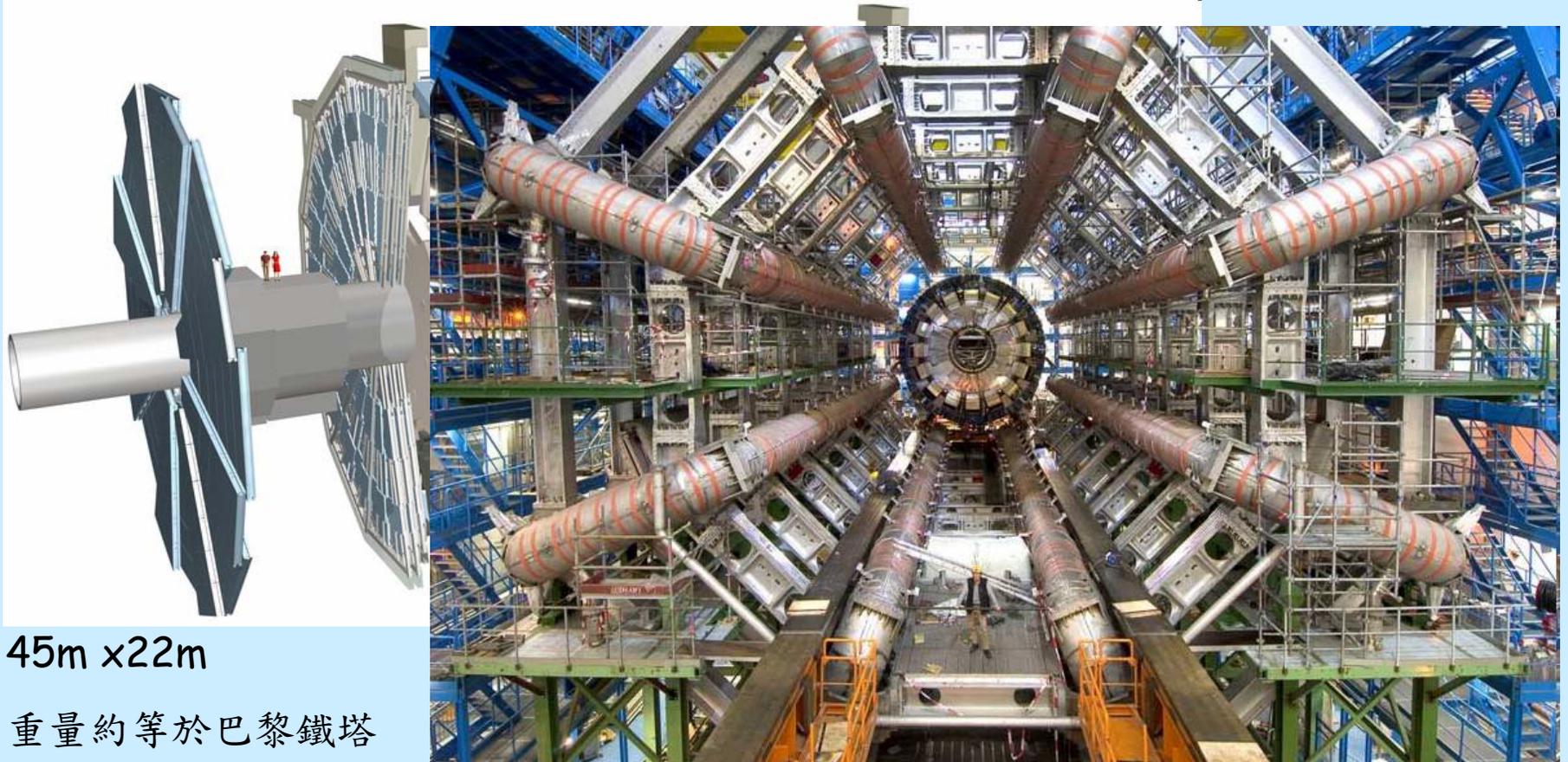
ATLAS 合作組

2,500 物理
學家，37
國家，169
所大學

張承亮，
CUHK
BSc '01,
MPhil '03,
PhD U. of
Toronto



ATLAS探測器



45m x22m

重量約等於巴黎鐵塔

每秒數據=100,000 CDs 每分鐘紀錄27 CDs

當今物理學一些重要及基本的問題

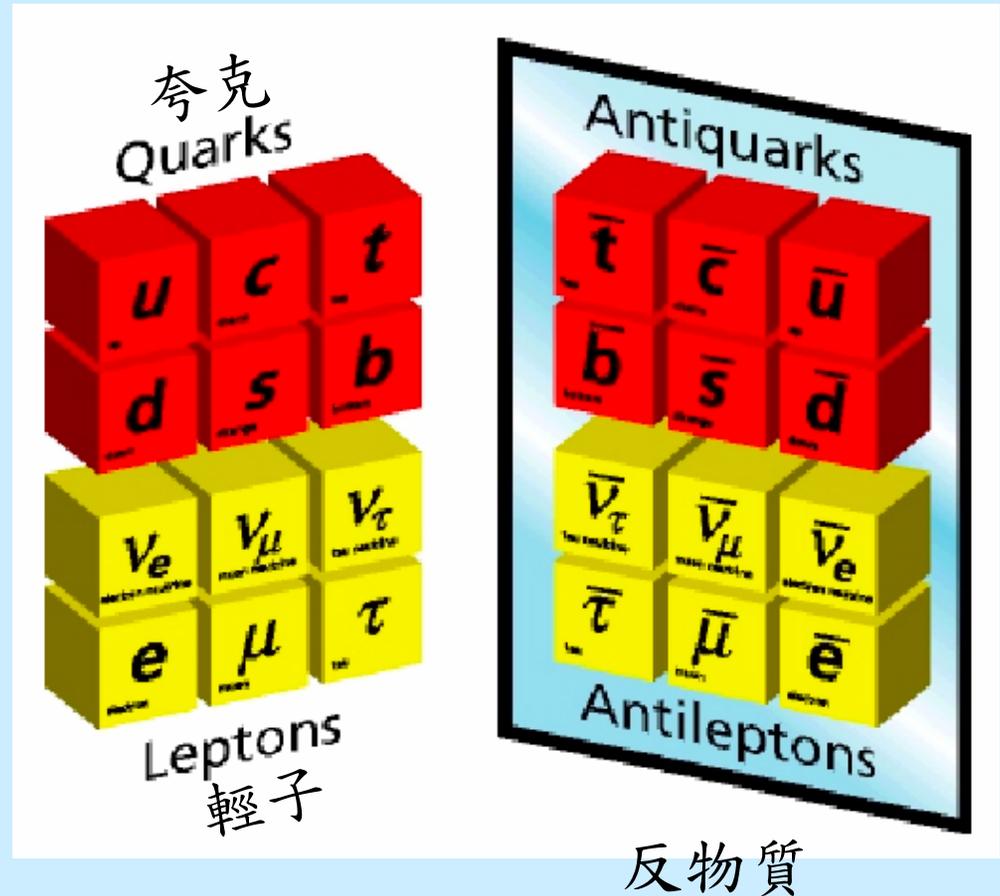
- 基本粒子的質量從何而來？為甚麼分別那麼大？
- 基本粒子的相互作用力是否以規範場進行？
- 基本力場是否統一？統一力場的形式為何？
- 宇宙大爆炸(Big Bang)開始時的物理狀況如何？
- 重力場(gravity)極大扭曲時空的後果？
- 時空(space-time)有否未知的維度(dimensions)？
- 自然界是否存在超對稱(Supersymmetry)？
- ...

答案: Large Hadron Collider 大型強子對撞器

末日實驗? http://news.bbc.co.uk/2/hi/south_asia/7609631.stm

粒子物理的標準模型(Standard Model)

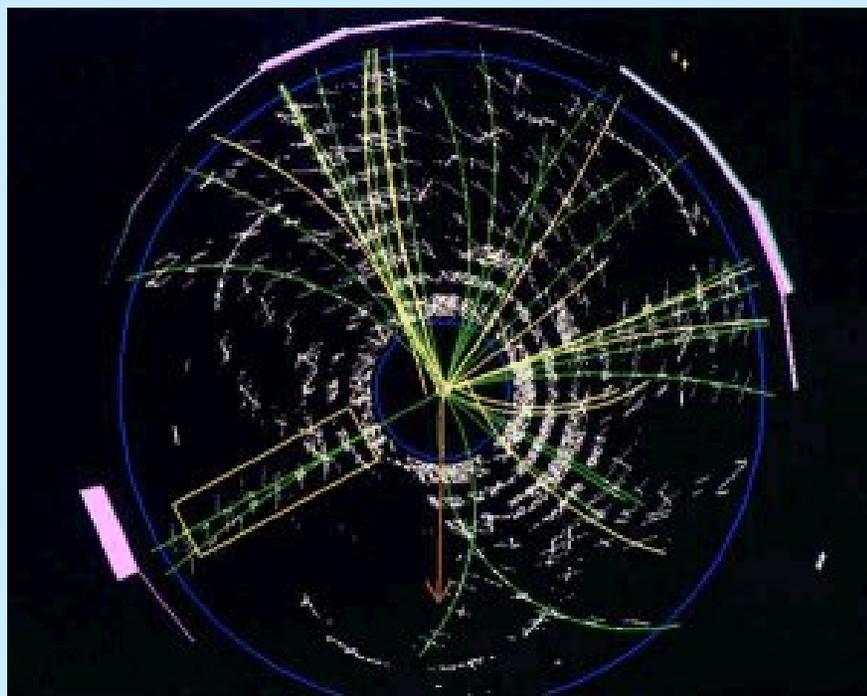
- 所有物質由夸克(quarks)及輕子(leptons)組成: 基本粒子 (無結構, 小於 10^{-18}m)
- 四種基本作用力: 強 (strong)、弱(weak)、電磁 (electromagnetic)、重力 (gravitational)
- 規範場介子 gauge bosons W^\pm, Z , 光子(photon)、膠子 (gluon) 等傳播作用力



<http://particleadventure.org/particleadventure/>

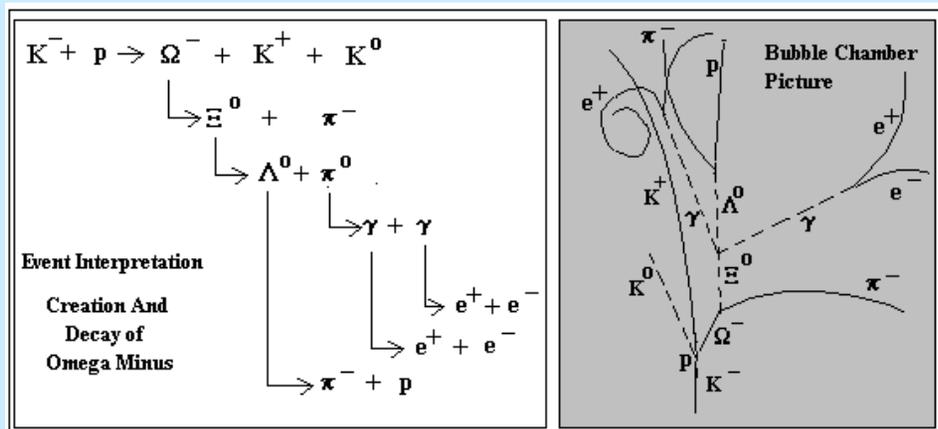
<http://www.phy.cuhk.edu.hk/gee/mctalks/mctalks.html>

強子(hadron) = 帶強作用力的粒子



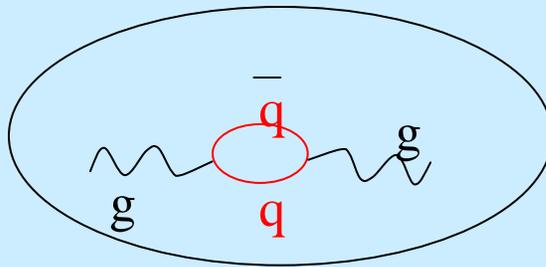
高能粒子撞擊實驗中產生超過一百粒各種粒子，大部份於極短時間衰變

質子與中子是最穩定的強子

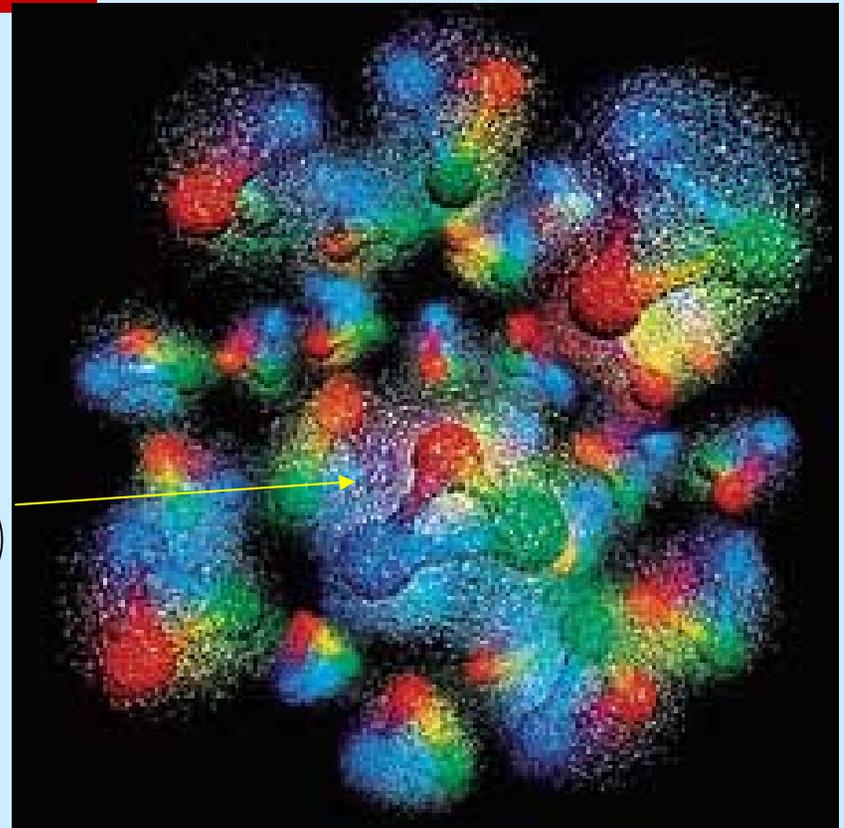


強子

- 夸克，膠子間強作用→緊密連結成強子
- 每一強子內有不定數量之夸克及膠子，隨生隨滅



- 高能撞擊亦未能釋出自由夸克子→永久束縛



1. 上帝粒子

楊米規範場論 (Yang-Mills Gauge Theory)

- Yang, Mills 於1954年提出楊米規範場論
- 只有規範場可以有漸近自由 (asymptotic freedom) → 粒子近距離的相互作用變弱，解決場理論中物理量發散的問題。
- 電磁、弱、強等三種基本力均以規範場為理論根基
- LHC 幾項最重要工作都是驗證規範場理論



楊振寧教授



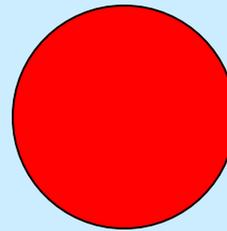
楊振寧教授與中大物理系的傻仔傻女們

http://www.phy.cuhk.edu.hk/public_lectures/#101504_2

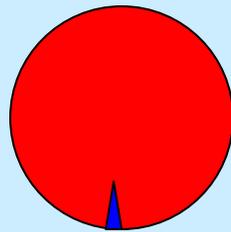
<http://www.phy.cuhk.edu.hk/gee/mctalks/rqm3.pdf>

規範場(Gauge Field)

簡單類比：
圓對稱



不滿足圓對稱



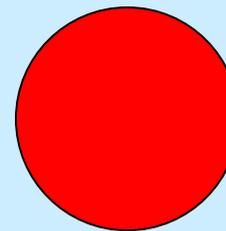
「電子」

補救：「**電磁場**」
(規範場)



電磁場和電子整體
才滿足圓對稱

$U(1)$ 對稱 \rightarrow 電磁力



規範場(Gauge Field)

類比二 (楊綱凱教授提供):

幣值: 商品價值(x_i)只有相對意義, 沒有絕對意義。數值只因歷史而訂定。規範對稱: $x_i \rightarrow ax_i$, $a > 0$ 為任意數。

實驗: 突然把所有港幣數值乘大十倍 ($a = 10$)

→ 金融海嘯! 缺乏對稱?

因為香港和其他地方有交易(相互作用)!

可以把所有各種貨幣數值乘大十倍 → 對稱 (global symmetry)

亦可以把各種貨幣數值各自乘大不同倍數 a_i → 局域對稱 (local symmetry), 但必需有適當兌換率改變 (規範場)

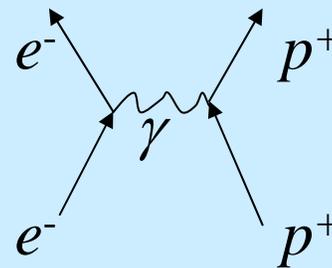
規範場(Gauge Field)

- 為符合物理系統某些對稱性，必需引入規範場。

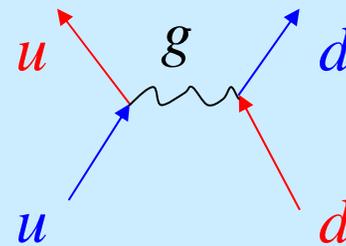
- 例如：單一電子破壞局域U(1)對稱，必需加入光子(規範場)。

- 規範場的物理性質並不任意，而由對稱性決定。例如 $m_\gamma = m_g = 0$ 。

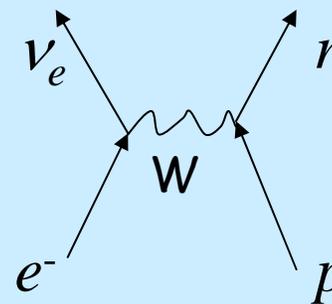
- 強、弱作用力的規範場理論得到空前成功，預測獲一一證實。例如：膠子、 W^\pm 及Z的存在，夸克的漸近自由，強子的質量，...



電磁力以交換光子
(photon)傳遞



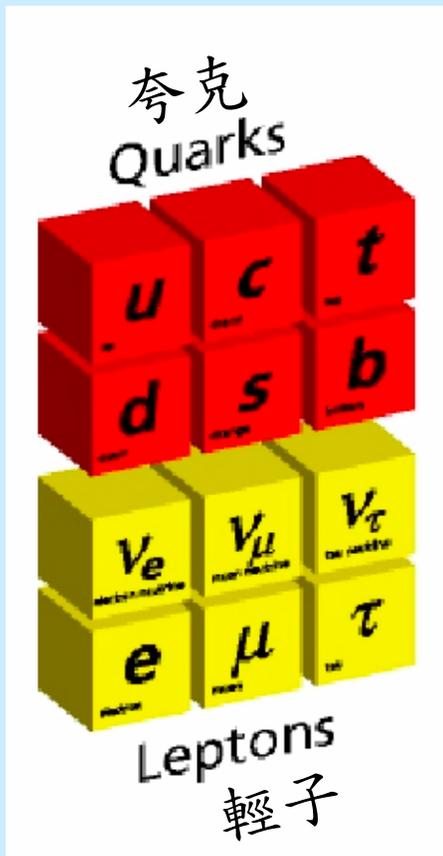
夸克交換膠子(gluon)
強作力



弱力:交換 W^\pm , Z傳遞

但是 $m_W, m_Z \neq 0!$ → 希格斯機制 (Higgs Mechanism)

基本粒子質量



為甚麼基本粒子有質量？

$$m_u \sim m_d \sim 1-10 \text{ MeV}$$

$$m_s \sim 150 \text{ MeV} \quad m_c \sim 1.3 \text{ GeV}$$

$$m_b \sim 4.2 \text{ GeV} \quad m_t \sim 174 \text{ GeV}$$

$$m_e \sim 0.511 \text{ MeV}$$

$$m_\mu \sim 105 \text{ MeV}$$

$$m_\tau \sim 1.777 \text{ GeV}$$

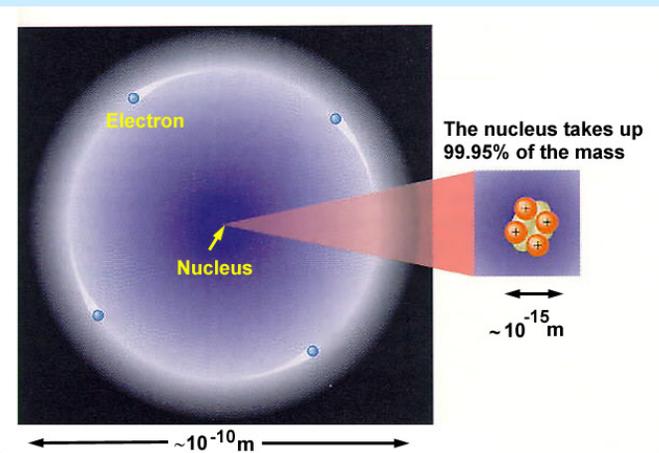
$$m_W \sim 80 \text{ GeV} \quad m_Z \sim 91 \text{ GeV} \quad m_\gamma = 0$$

為甚麼基本粒子質量差異那麼大？

上帝粒子 - 希格斯粒子 (God Particle - Higgs Boson)

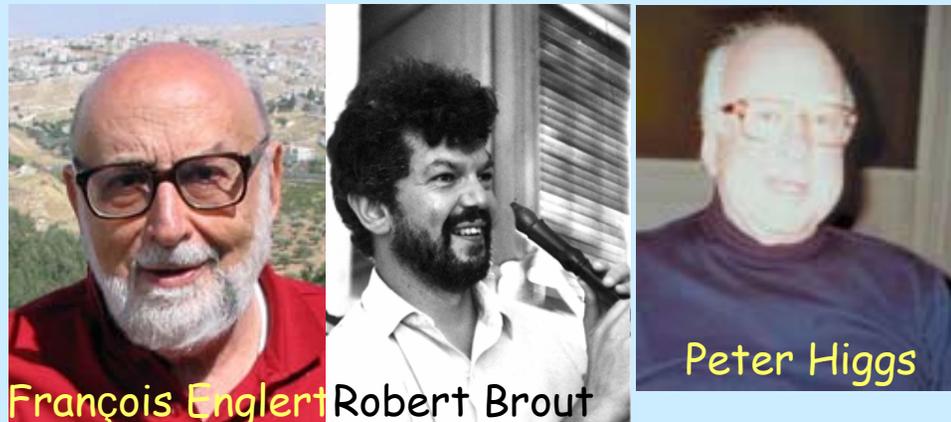
物體大小、重量皆由基本粒子質量決定

例如: 原子(atoms)的大小由電子的「軌道」大小 a 決定。而 $a \propto 1/m_e$



基本粒子的質量從何而來?
規範場粒子可否有質量?

希格斯機制 - 由三位物理學家於1964提出



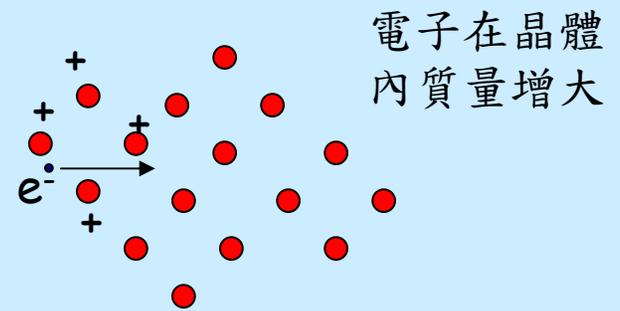
Phil Anderson, Gerald Guralnik, C. R. Hagen, and Tom Kibble

希格斯場 (Higgs Field)

粒子質量: 對外力引起加速的抵抗 (慣性)

粒子質量可能因介質而改變:

例如電子在晶體中質量可以大幾十倍



假設有一能量場 (如磁場) = 希格斯場，
穿透真空。它與基本粒子有不同的相互作用，令本來無質量的基本粒子變成有不同質量。

希格斯場的振動 (激發態) = 希格斯粒子
真空 = 最低能量態，可以充滿粒子及能量。

色即是空、
空即是色

自發對稱破壞 (Spontaneous Symmetry Breaking)

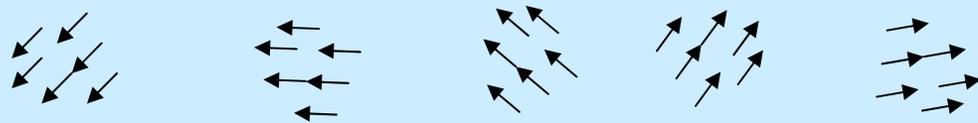
物理系統最低能量狀態可能隨機地破壞內在對稱

類比：圓桌上的左右對稱

第一個隨機地揀杯子的人把對稱破壞

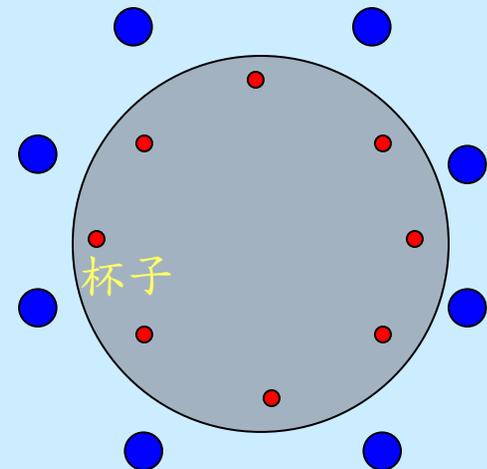
另一例子：磁鐵 (ferromagnet)

磁矩相同方向 → 降低能量



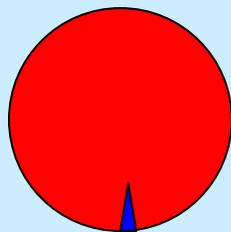
每一個都是最低能態，但都破壞球對稱

不需外在磁場破壞對稱 → 自發



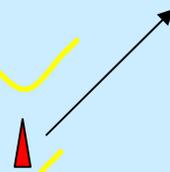
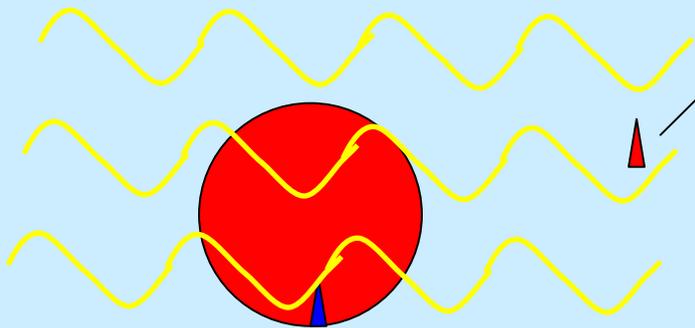
希格斯機制 (Higgs Mechanism)

規範對稱 (gauge symmetry) \rightarrow 規範場粒子沒有靜止質量



希格斯場與規範場粒子的相互作用 \rightarrow 自發破壞規範對稱

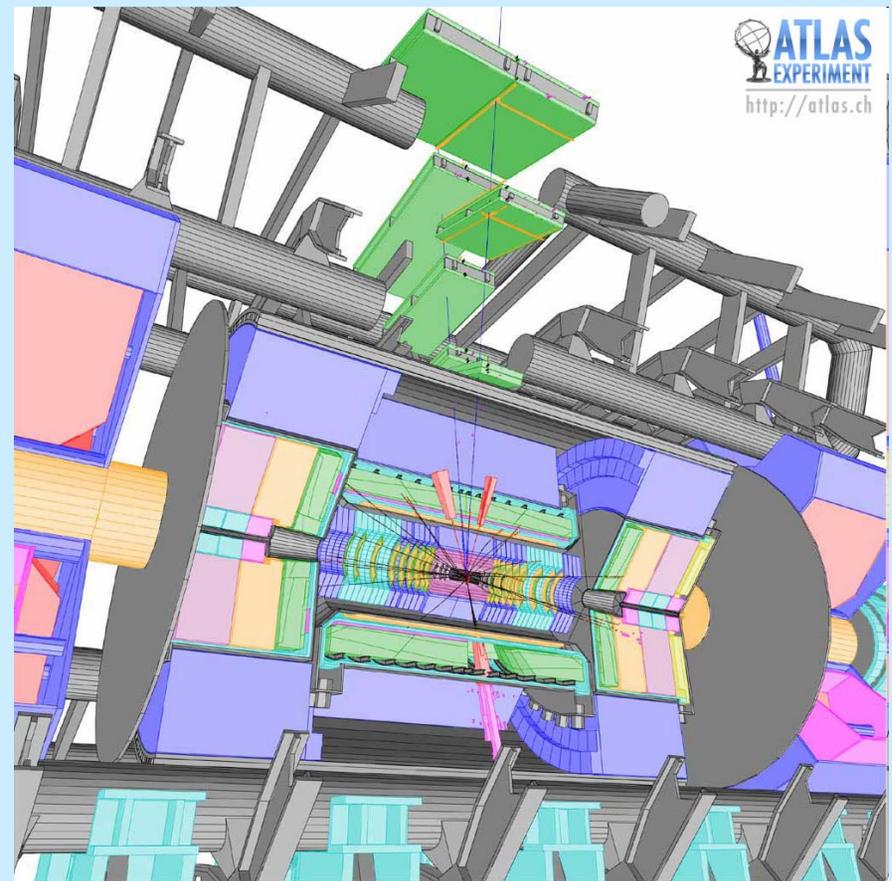
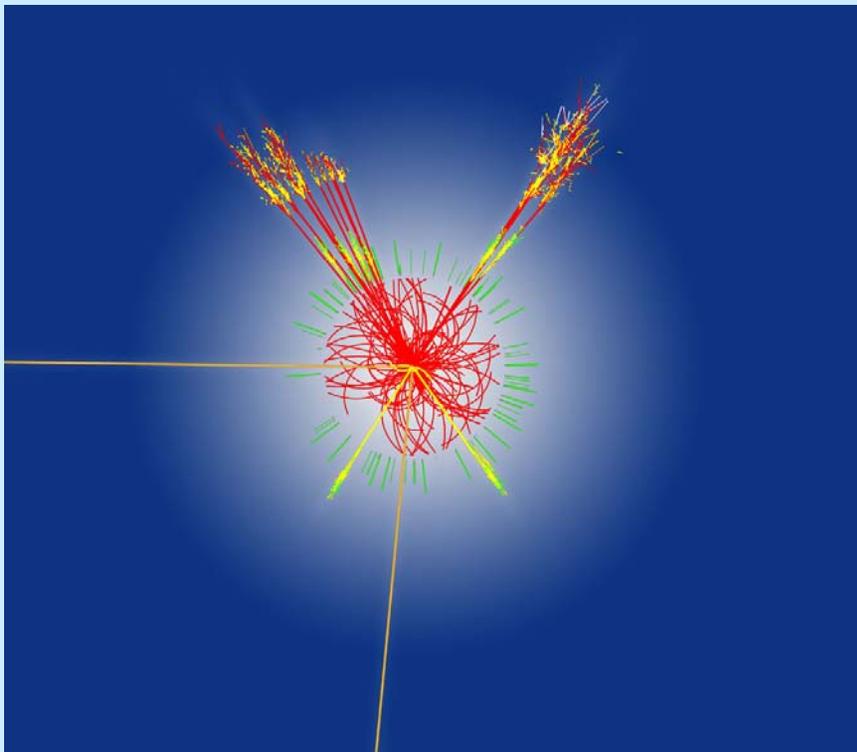
\rightarrow 規範場粒子變得有質量



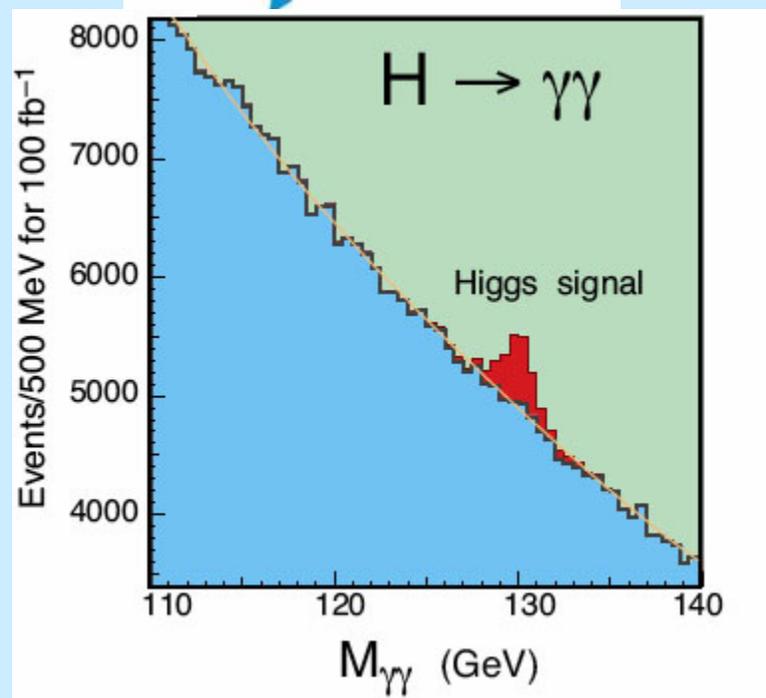
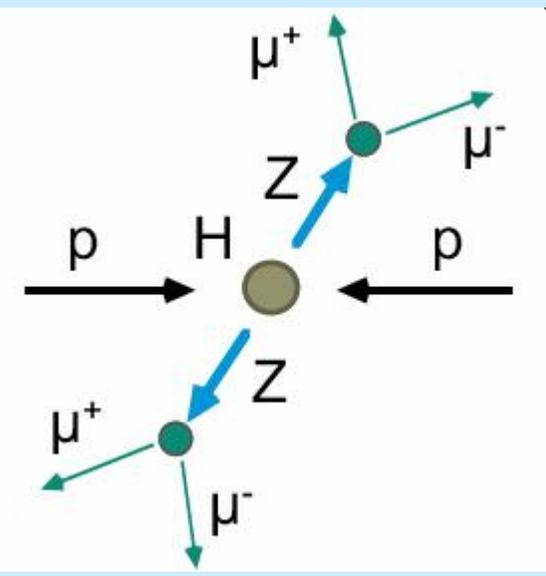
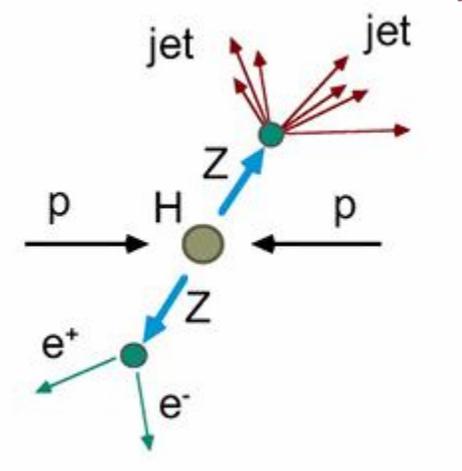
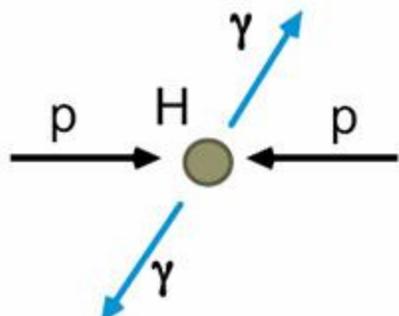
所有基本粒子都因此得到質量?

希格斯粒子

模擬產生希格斯粒子



找尋希格斯粒子



希格斯

"There is a sort of mythology that grows up about what happened, which is different from what really did happen," says Higgs. "None of us - not me, or Brout and Englert - tried the right application. We were fixated by the strong interaction."

"Anderson should have done basically the two things that I did," says Higgs. "He should have shown the flaw in the Goldstone theorem, and he should have produced a simple relativistic model to show it happened. However, whenever I give a lecture on the so-called Higgs mechanism I start off with Anderson, who really got it right, but nobody understood him."

"...However, as far as the mechanism of generating vector boson masses is concerned, I usually write down a whole string of names, starting with Anderson and including Englert and Brout, Gerald Guralnik, Dick Hagen and Tom Kibble, and also Gerard 't Hooft."

Peter Rodgers, *Peter Higgs: the man behind the boson*, Physics World, July 10, 2004.

<http://physicsworld.com/cws/article/print/19750>

<http://www.youtube.com/watch?v=kW0iRW2hoC4>

希格斯粒子與GRID網絡計算

Les Robertson, Carl Kesselman, Harvey Newman: 分析實驗數據找尋希格斯粒子所需電算資源太多→網絡計算

GRID – 長遠目標: 全球共享計算機資源

已有很多例子, 如

SETI (尋找外星人訊號): <http://setiathome.berkeley.edu/>

LHC@home (分析LHC數據): <http://lhathome.cern.ch/>

Einstein@home (分析重力波數據): <http://einstein.phys.uwm.edu/>

<http://www.gridcomputing.com/>

<http://www.wired.com/wired/archive/12.04/grid.html>

2. 模擬大爆炸?

大爆炸 (Big Bang)

- 宇宙所有物質曾經在很細小時空範圍內! 能量轉換成物質 $E=mc^2!$
- → 宇宙曾經溫度、密度都很高
- = 原始火球
- 證據:
- 宇宙膨脹
(遠方星系亦然)
- 微波背景輻射
- 輕元素比例



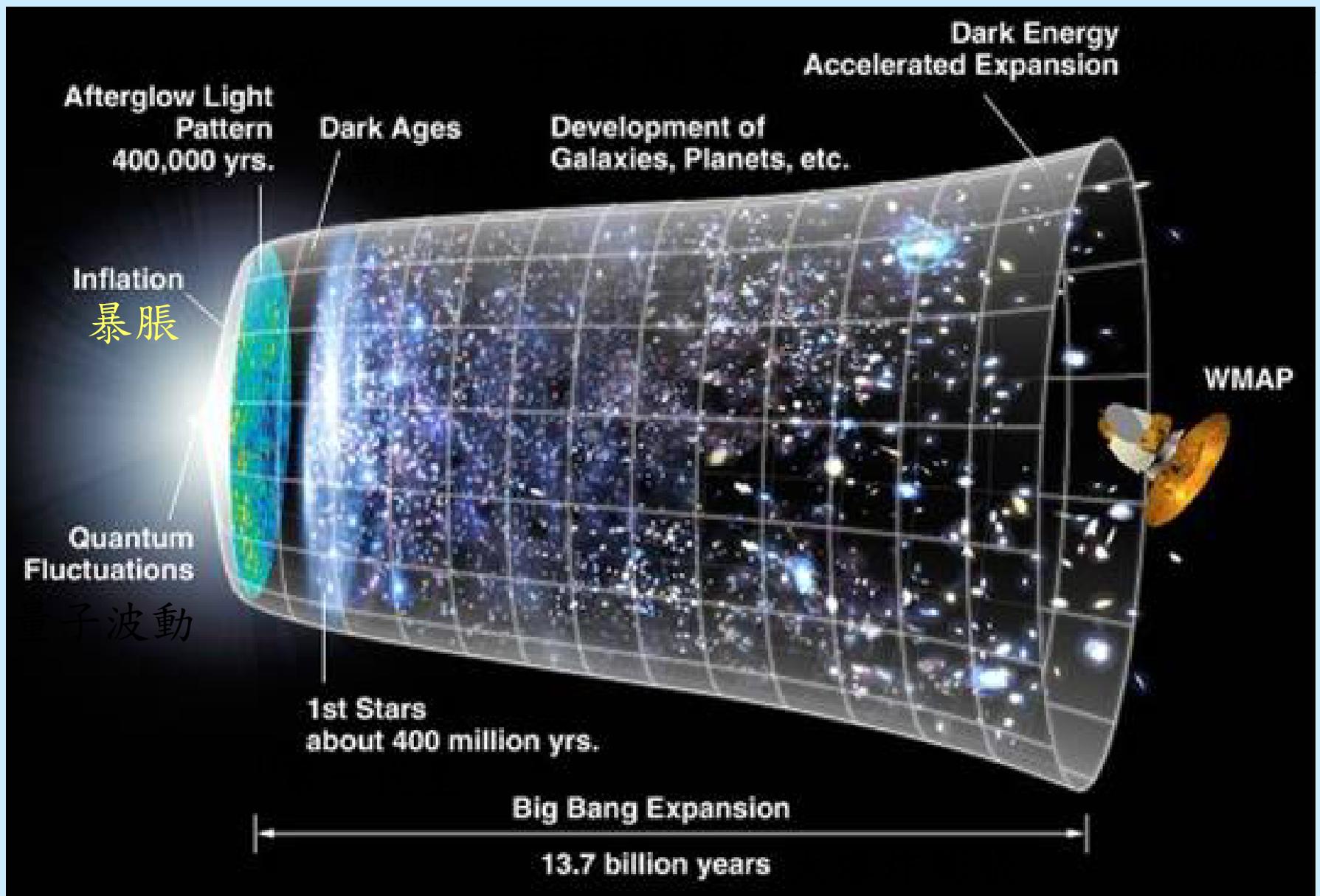
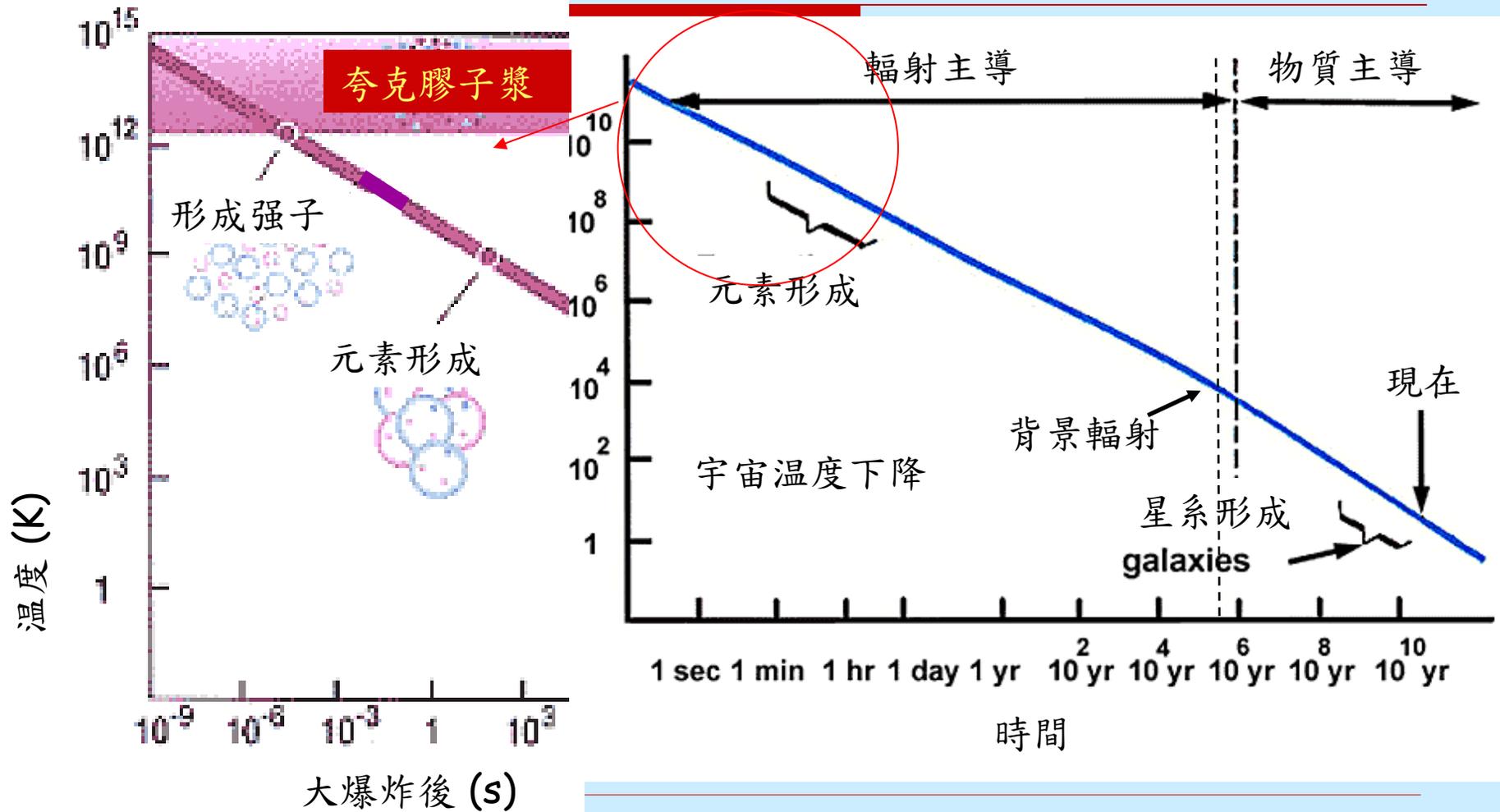
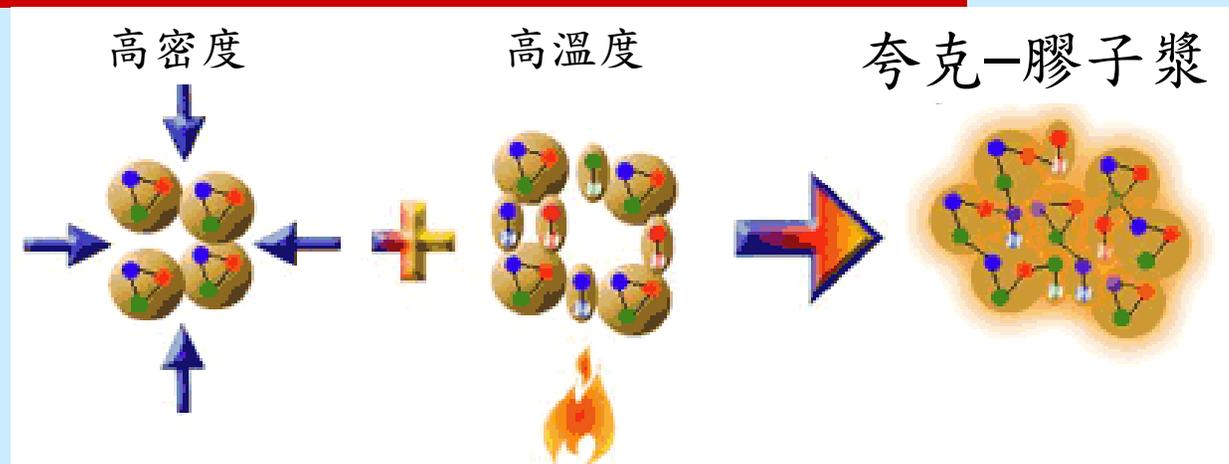


Figure courtesy NASA/WMAP

宇宙簡史



夸克物質 Quark Matter



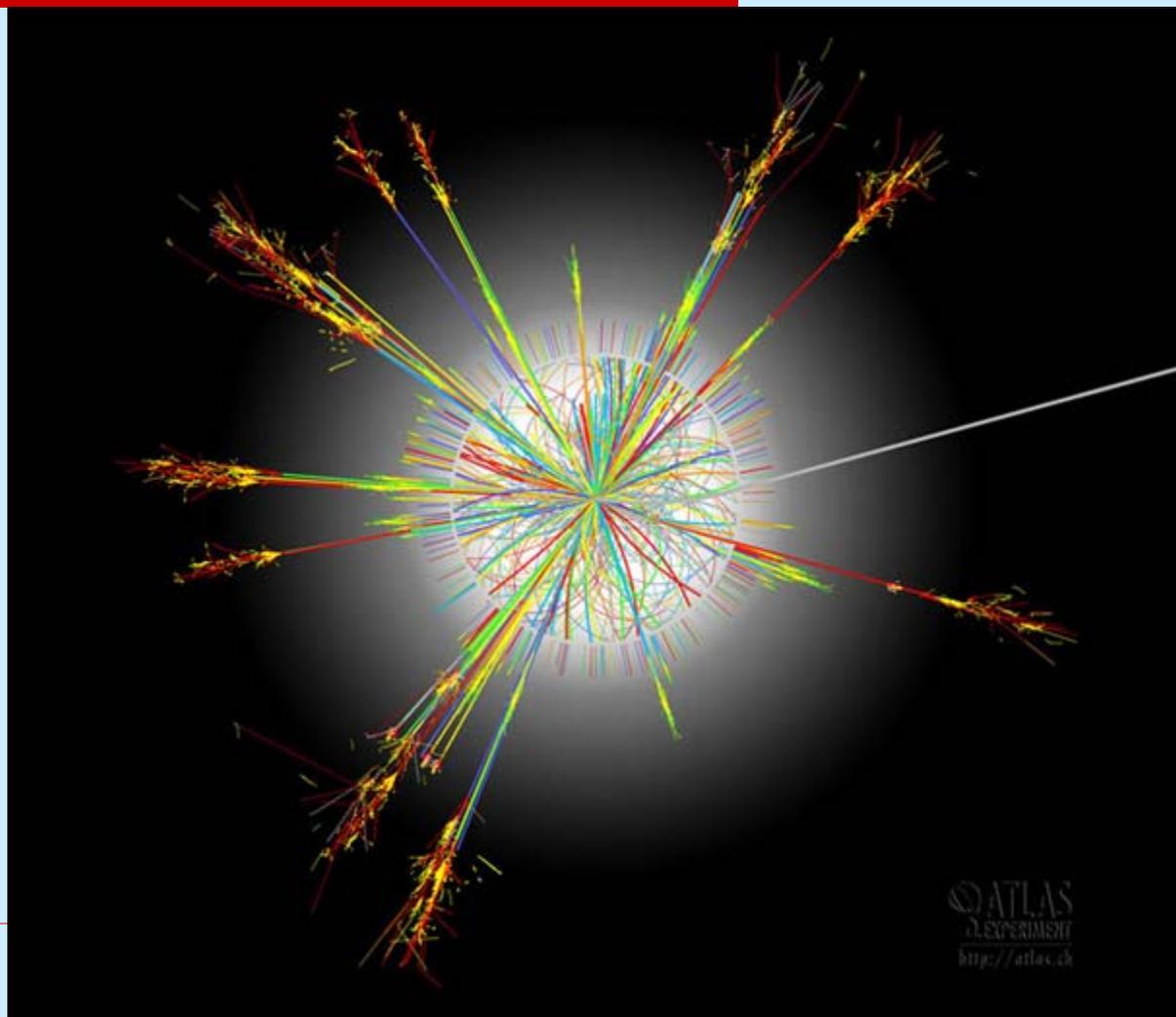
- 理論預測(漸近自由)高溫或高密度時強荷變弱
- 至高溫或高密度時可「釋放」夸克及膠子: 相變 (phase transition)
 $kT_c \sim 140 \text{ MeV}$
- 如液態水→蒸氣
 $T_c \sim 10^{12} \text{ K!}$
- 宇宙早期情況(幾萬份之一秒)

Figures courtesy Brookhaven National Lab
<http://www.bnl.gov/RHIC/>

3. 微型黑洞?

製造微型黑洞?

模擬製造微型
黑洞

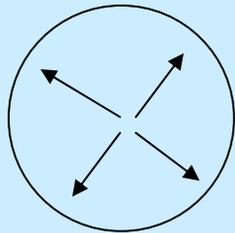


多餘維度 (extra dimensions)

為甚麼重力那麼弱？ 重力/電磁力 $\sim 10^{-38}$ 不自然，必有玄機！

膜世界理論 (Brane Model): 因宇宙有多餘空間維度，而重力可傳播至所有維度，其它力場不可以!

空間維度 $n \rightarrow F \propto 1/r^{n-1}$ 平分於半徑為 r 的「球」表面



$$F = \begin{cases} -m_1 m_2 G_o / r^{n-1} & (r < a) \\ -m_1 m_2 (\underbrace{G_o / a^{n-3}}_G) / r^2 & (r > a) \quad \text{重力弱 (G 小)} \end{cases}$$

若 $r < a$, $G \rightarrow G_o$: 重力增強!

Dimopoulos + Landsberg (2001): 若重力增大至等同電磁力，LHC 可能平均每
秒製造一個微型黑洞 ($R \sim 10^{-19}\text{m}$)!

微型黑洞 (mini blackholes)

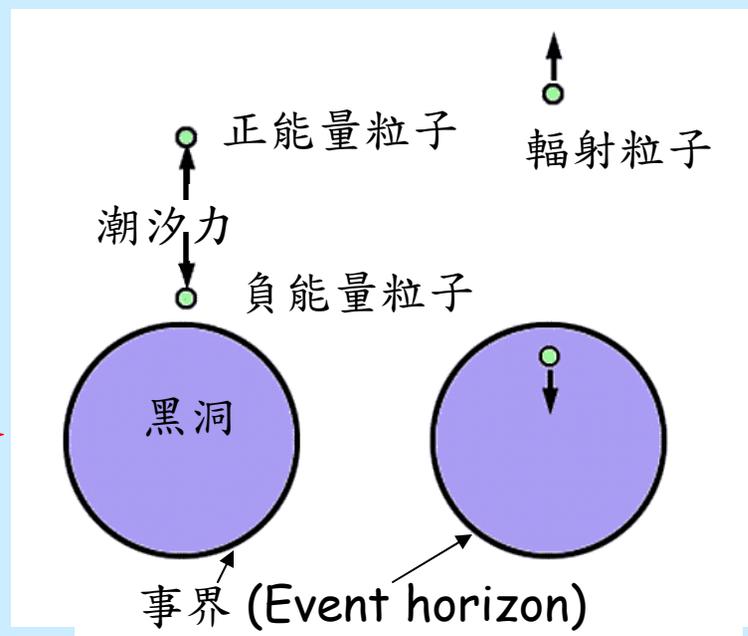
霍金輻射(Hawking Radiation): 黑洞邊緣(事界)強大潮汐力撕裂真空，製造粒子對→輻射各種粒子

微型黑洞($r \sim 10^{-19} \text{m}$): 潮汐力極大→霍金輻射非常強烈，對應輻射溫度約 $10^{11} \text{ eV} (\sim 10^{15} \text{ K})$ ，於 10^{-26} s 內把整個黑洞蒸發掉!

輻射速度 \gg 長大(吞食附近物質)速度

即使長大，到 $r > a$, G 變回很小，不再是黑洞

若能觀測，可提供重要的量子重力資料!



<http://cerncourier.com/cws/article/cern/29199>

<http://www.aip.org/pnu/2008/split/871-1.html>

宇宙射線 (cosmic rays)

- 太空來的亞原子粒子 (subatomic particles):
質子 (protons), 電子, 原子核 (atomic nuclei), 光子 (photons)...
- 能量範圍極廣, 高達 $>10^{20}$ eV, ~一億倍LHC最高能量

最高紀錄: 3×10^{20} eV

微型黑洞?





更吹落，
黑洞如
雨

當今物理學一些重要及基本的問題

- 基本粒子的質量從何而來？為甚麼分別那麼大？
 - 可否釋放自由夸克(quarks)與膠子(gluons)？
 - 基本力場是否統一？統一力場的形式為何？
 - 宇宙大爆炸(Big Bang)開始時的物理狀況如何？
 - 重力場(gravity)極大扭曲時空的後果？
 - 時空(space-time)有否未知的維度(dimensions)？
 - ...
-

在香港中文大學的相關研究

- 中微子實驗
- 宇宙射線實驗
- 宇宙學理論研究

大亞灣 Daya Bay

2+2(+2) 反應堆: 11.6 (17.4) GW_{th}

高功率，高山 = 中微子實驗理想地點

每秒產生 10^{21} 反中微子! 阻隔大部份宇宙射線



<http://dayawane.ihep.ac.cn/twiki/bin/view/Public/>

香港仔隧道實驗室



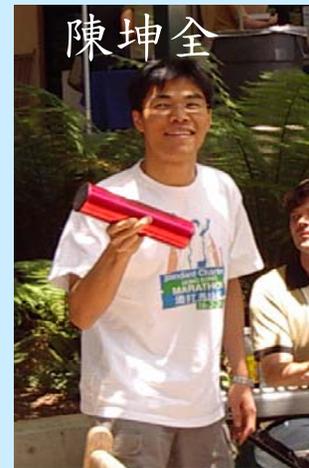
<http://theta13.phy.cuhk.edu.hk/>

參加研究的本科生 (2006-8):

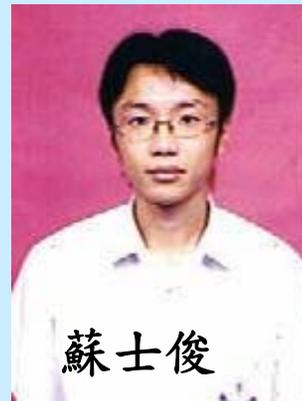
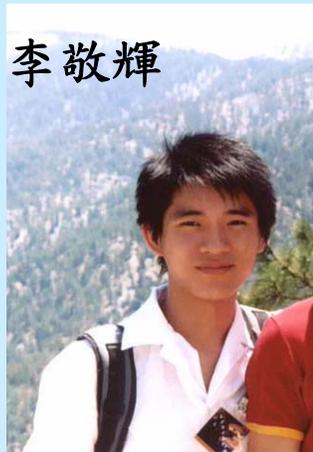
Alex Chan 陳韋丞, Michael Chan 陳德豪, Kong Chan 陳江, Yat Long Chan 陳逸朗, Ka Wing Cheng 鄭家榮, Stephen Cheung 張志誠, Nyuko Choi 蔡潔恩, Kim Wan Chow 周劍雲, Hoi Kit Cheung 張凱傑, Rex Chung 鍾行孜, Hok Kin Fung 馮學堅, Johnny Ho 何家偉, Tak Ngai Ho 何德藝, Pak Tsun Law 羅百浚, Ching Yee Leung 梁靜儀, George Leung 梁家瑋, Flora Wong 黃芷菁, Alex Wong 黃子文, Tze Shun Tsoi 蔡子淳, Jackie Wong 黃冠棋, King Keung Wu 胡景強



從宇宙學數據規範基本粒子理論



Brane model
Extra dimensions
Neutrino
astrophysics/cosmology
Dark matter
dark energy



末日實驗? - LHC高能質子對撞實驗 Proton Collisions at LHC - the Doom-day Experiment?

朱明中 (Chu Ming-Chung)
〔香港中文大學物理系教授〕
mcchu@phy.cuhk.edu.hk

26/9/2008

<http://www.youtube.com/watch?v=WvEK5uZXpZU&feature=related>

<http://www.sciam.com/article.cfm?id=the-discovery-machine-hadron-collider>