

# 天文物理最前線 - 尋找上帝粒子

## Finding the God Particle

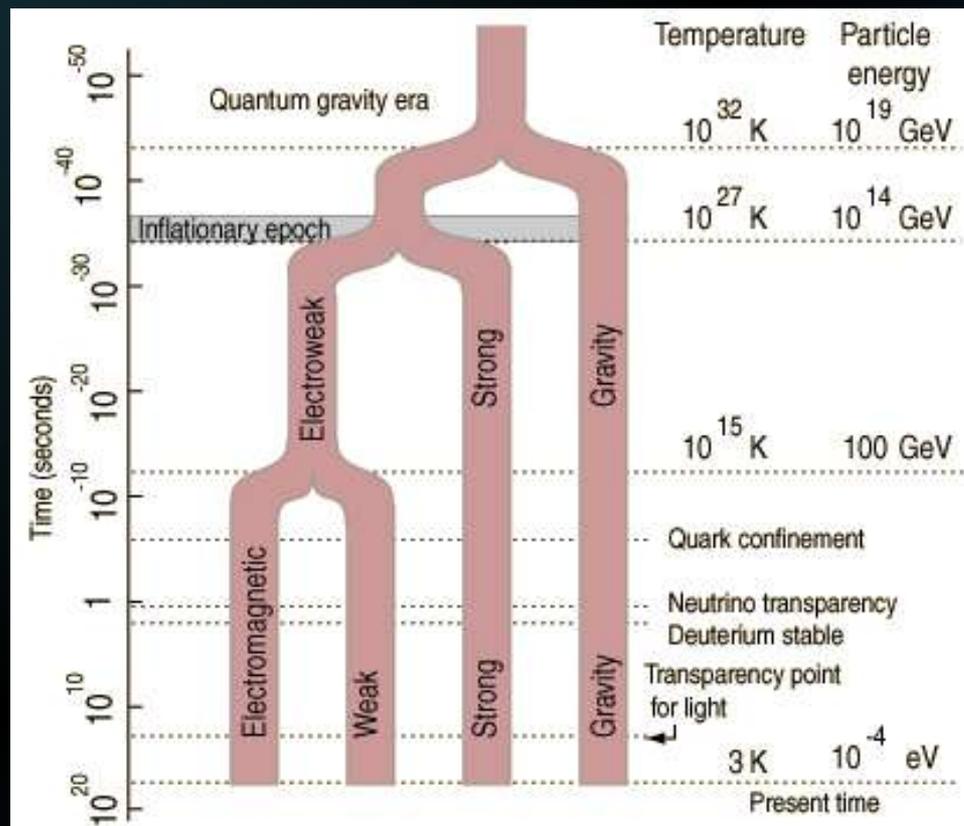
高子翔  
余海峯  
星匯點

# 內容

- 探索早期的宇宙→宇宙作用力的理解
- 希格斯玻色子在基本作用的角色
  - 四種基本作用
  - 標準粒子模型
  - 量子場論及場粒子
  - 量子場論下的基本作用
  - 現代物理的主調：對稱性
  - 規範對稱、規範場與相互作用
  - 規範粒子的理論缺陷
  - 自發性對稱破壞與希格斯機制
- 大型強子對撞器：尋找希格斯玻色子
  - 模擬宇宙大爆炸
  - 末日實驗：製造微型黑洞

# 探索早期的宇宙

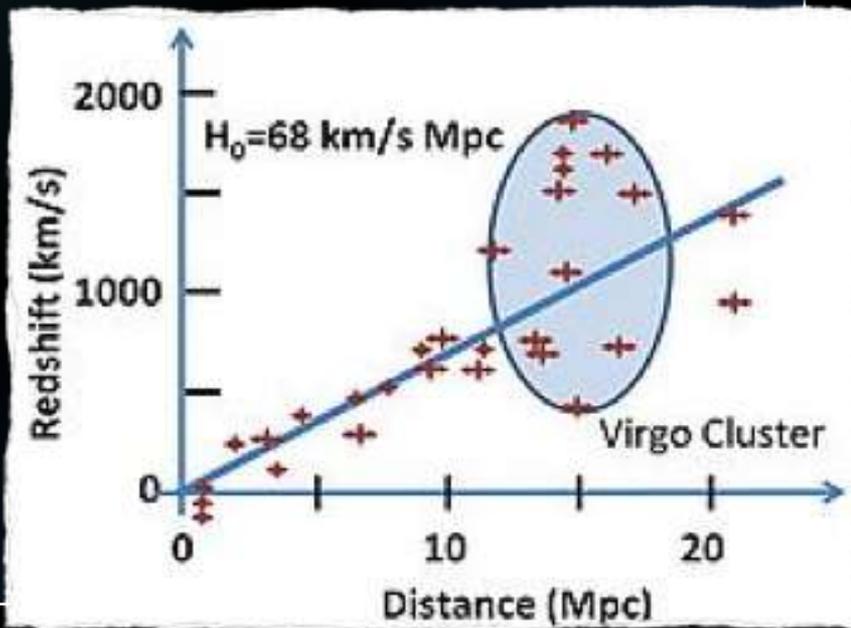
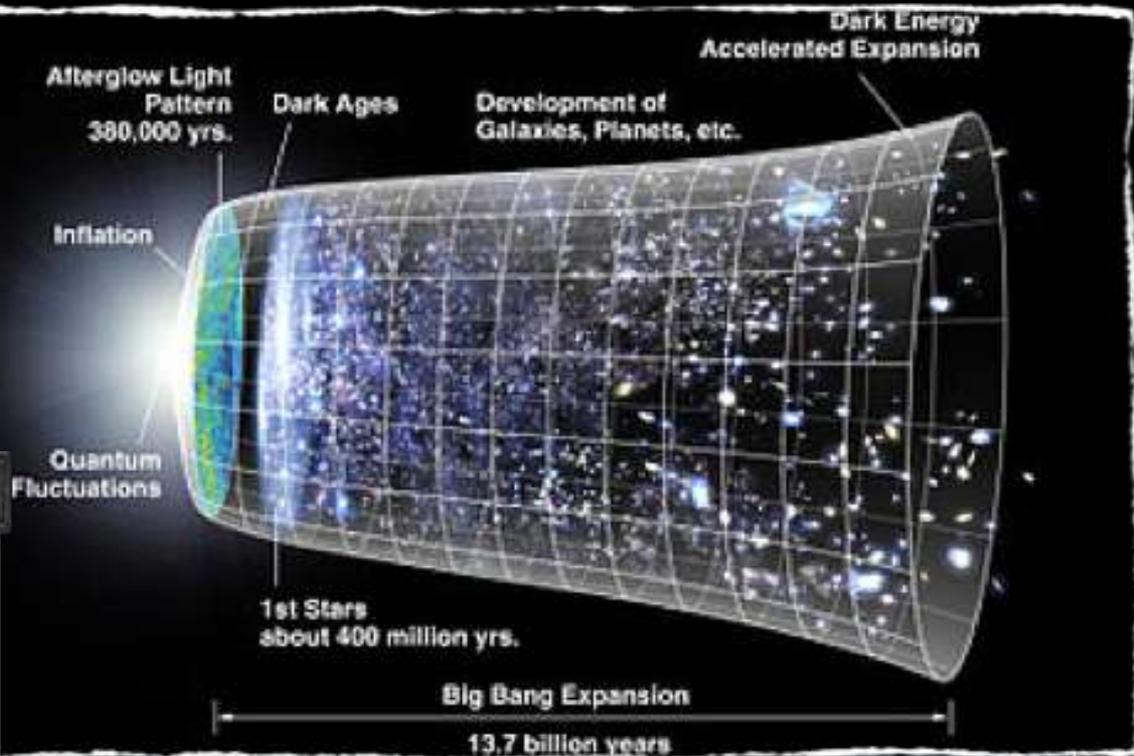
- 簡述宇宙的歷史、大爆炸
- 探索早期宇宙的理論困難
- 標準模型和基本作用力



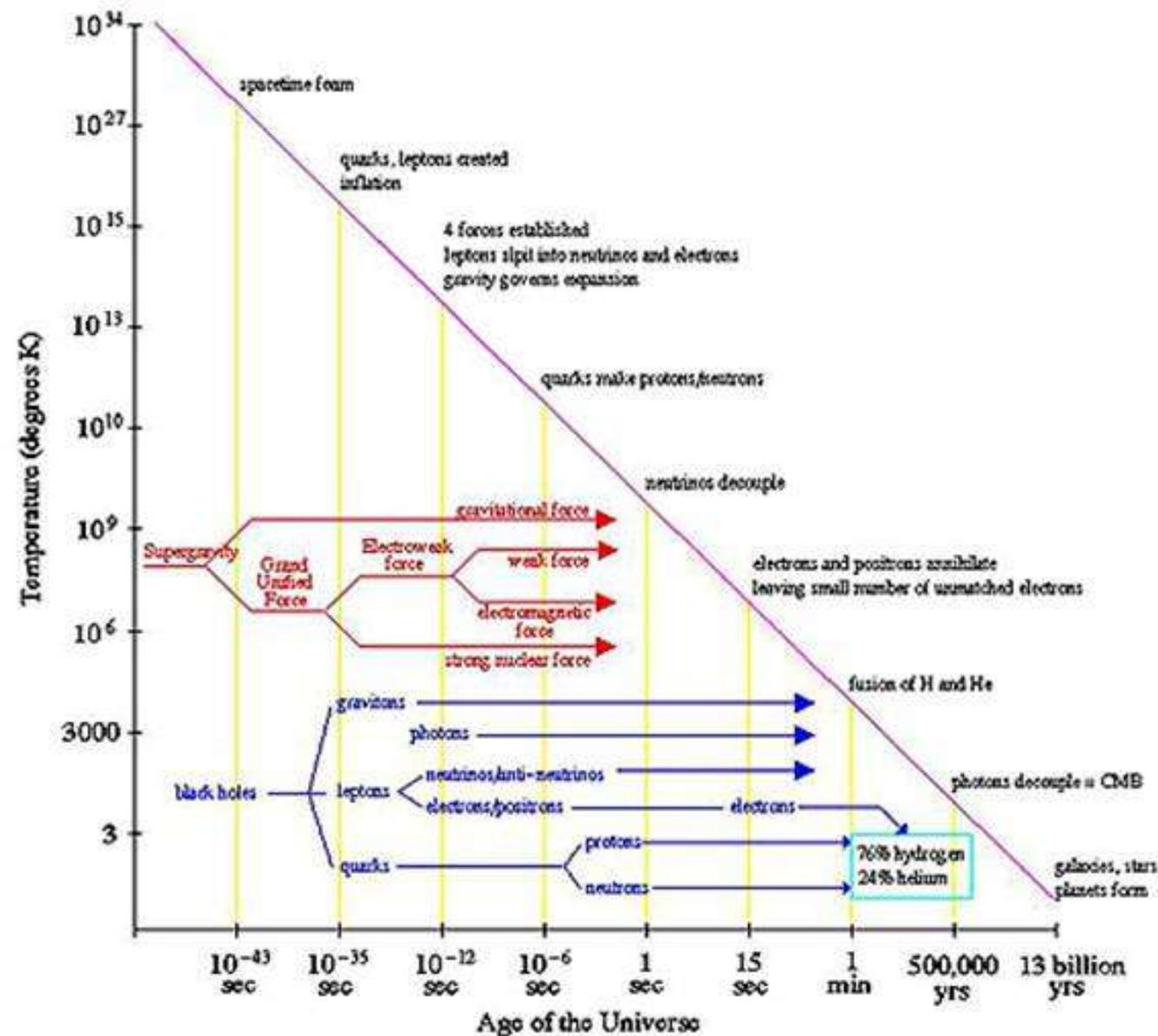
# 探索早期的宇宙



哈伯定律  
 $v = Hd$

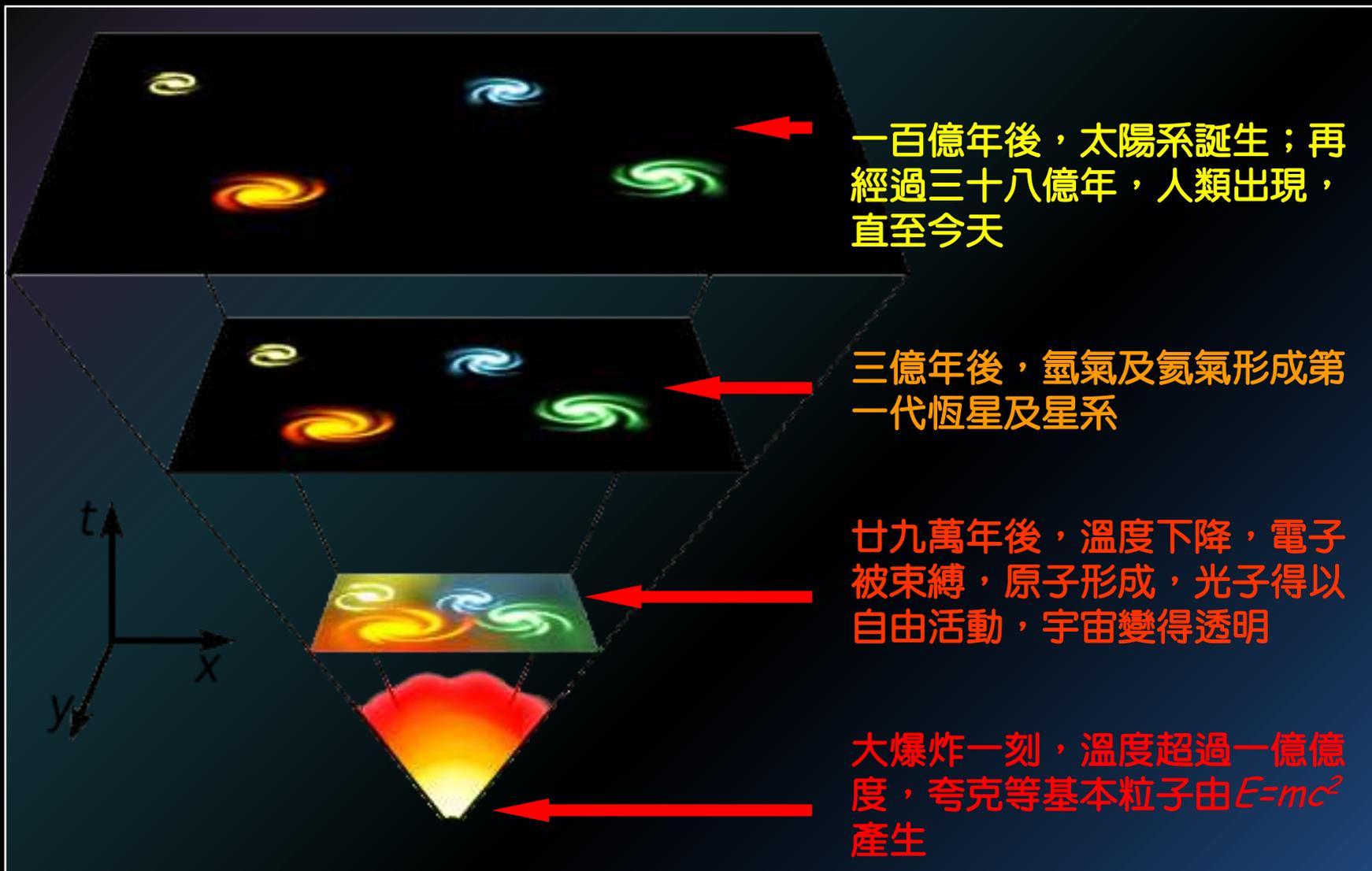


# 探索早期的宇宙



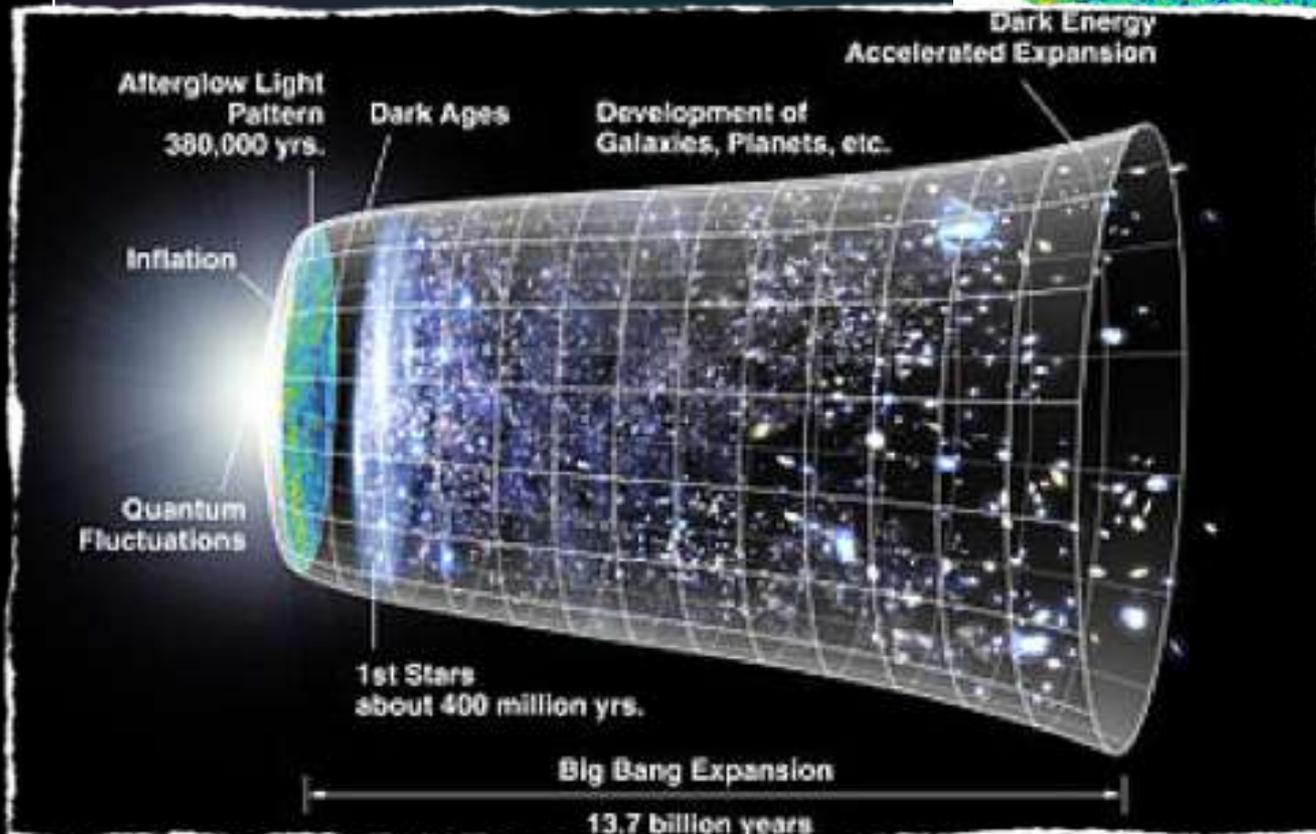
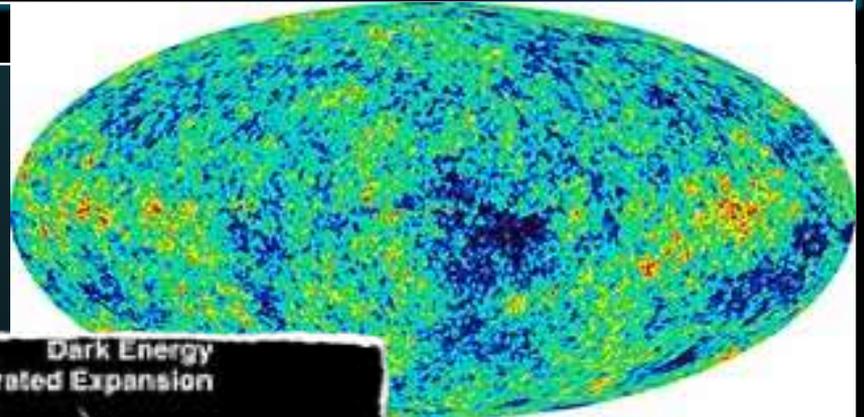
宇宙由一個極細小、極高溫的狀態下開始膨脹，至今天我們所看到的樣子，而且相信還會繼續膨脹。

# 探索早期的宇宙

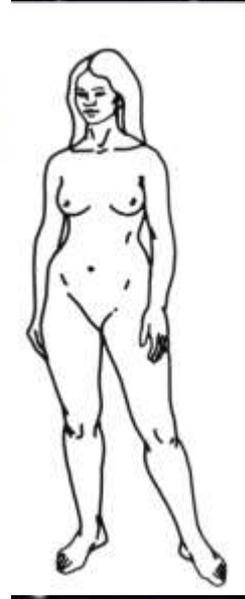
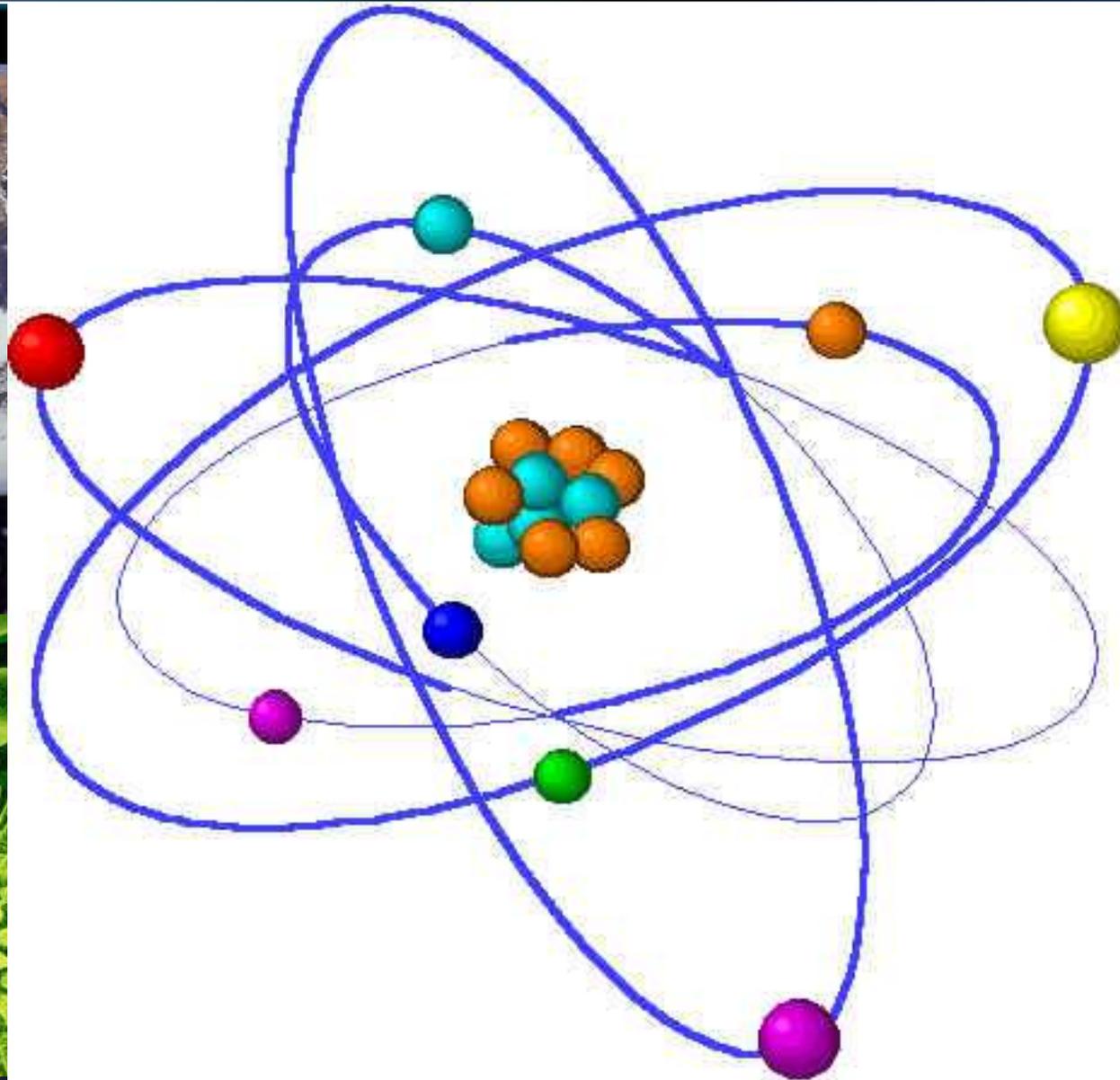


# 探索早期宇宙的理論困難

- 能量、溫度太高
- 光子不能逃逸
- 對四種基本力理解不足

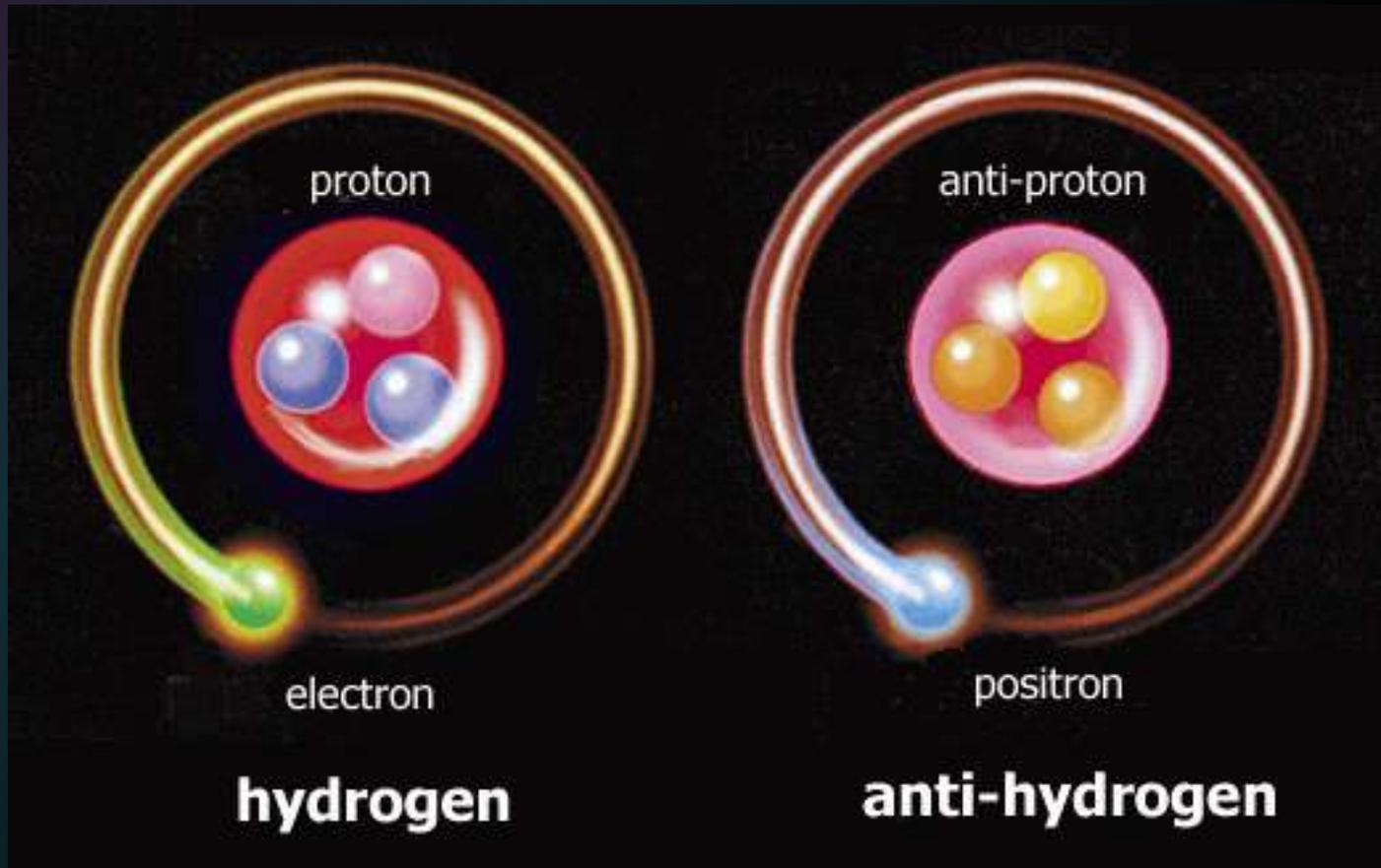


# 物質



# 物質

- 宇宙萬物皆由物質 (matter) 及反物質 (anti-matter) 組成



# 物質的誕生

$t \approx 10^{-9}$  s

$T > 10^{14}$  K

## 基本粒子的世界

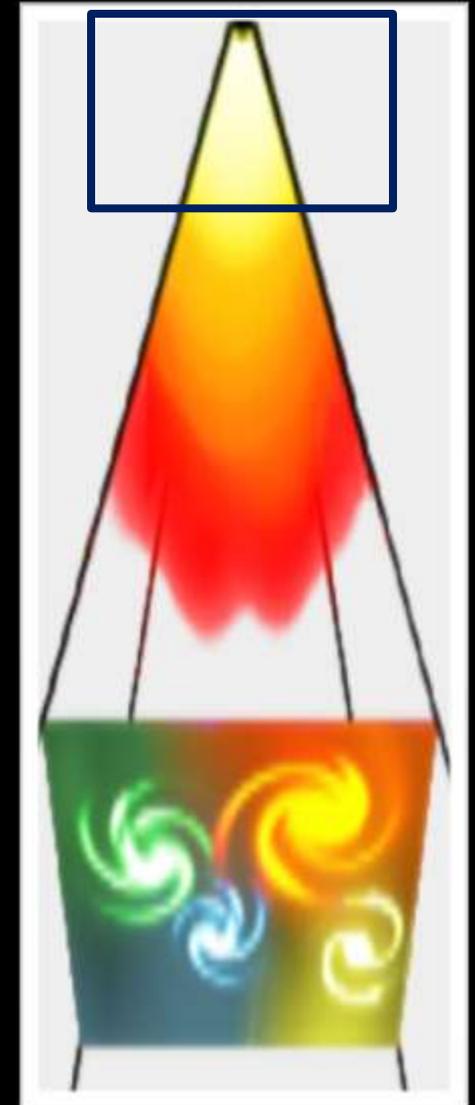
夸克 – 反夸克 Quarks – antiquarks

輕子 – 反輕子 Leptons - antileptons

中微子 – 反中微子 Neutrinos – antineutrinos



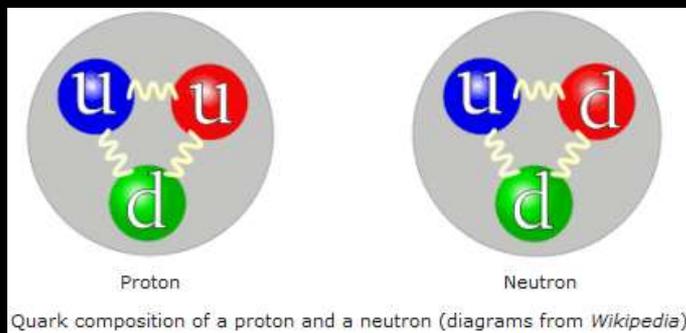
(b)



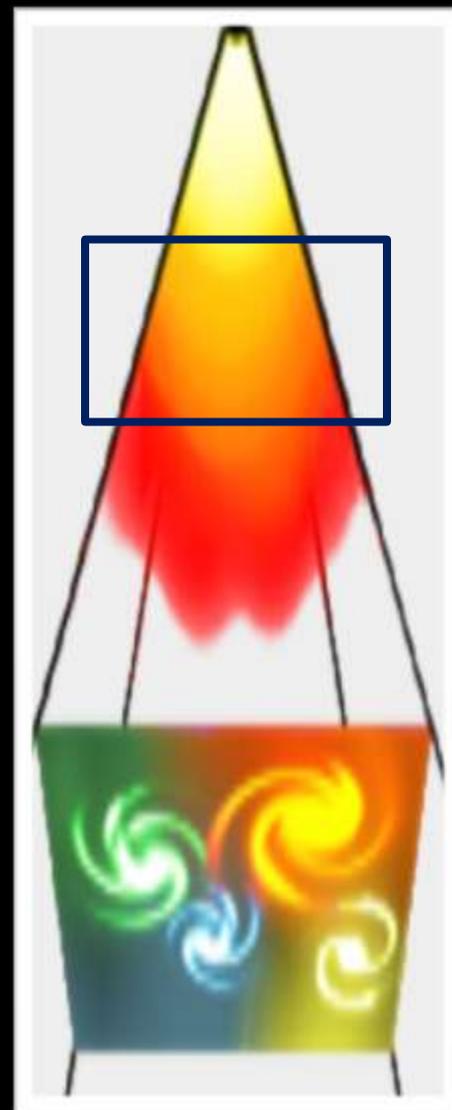
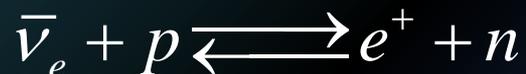
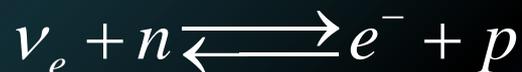
# 物質的誕生

$$t \approx 10^{-4} \text{ s} \quad T \approx 10^{14} \text{ K}$$

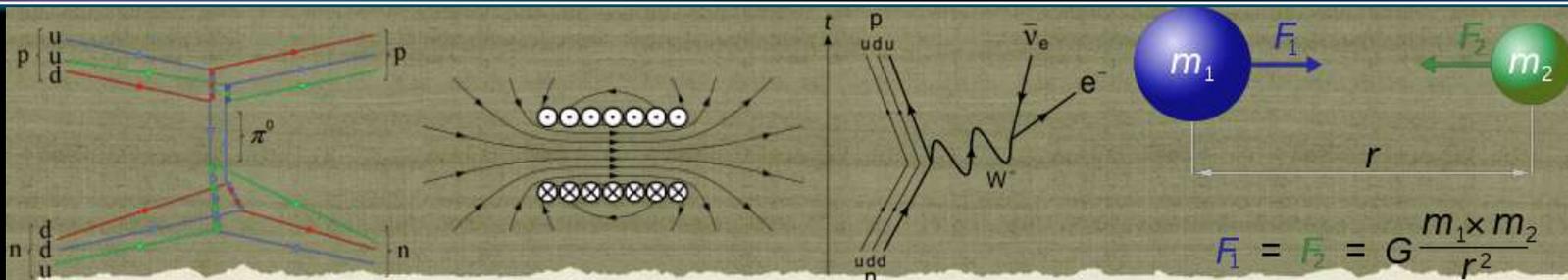
夸克與反夸克湮滅生成質子  
(proton)與中子(neutron)



質子 $p$ 與中子 $n$ 通過中微子反應相互轉換



# 四種基本作用力



四種基本力

兩個基本物理學說

強核力 (Strong nuclear force)

電磁力 (Electromagnetic force)

弱核力 (Weak nuclear force)

重力 (Gravitational force)

量子力學

相對論

# 標準模型 (Standard Model)

## Forces

**Strong**

Gluons (8)



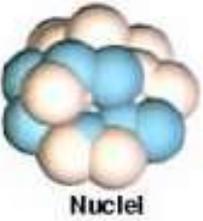
Quarks



Mesons  
Baryons



Nuclei

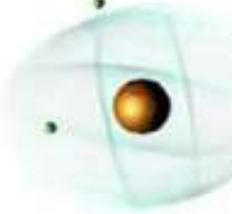


**Electromagnetic**

Photon



Atoms  
Light  
Chemistry  
Electronics



**Gravitational**

Graviton ?

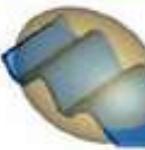


Solar system  
Galaxies  
Black holes



**Weak**

Bosons (W,Z)



Neutron decay  
Beta radioactivity  
Neutrino Interactions  
Burning of the sun



## The standard model

### Elementary particles

Quarks	<b>u</b> up	<b>c</b> charm	<b>t</b> top	<b><math>\gamma</math></b> photon	Force carriers
	<b>d</b> down	<b>s</b> strange	<b>b</b> bottom	<b>Z</b> Z boson	
Leptons	<b><math>\nu_e</math></b> electron neutrino	<b><math>\nu_\mu</math></b> muon neutrino	<b><math>\nu_\tau</math></b> tau neutrino	<b><math>W^+</math></b> $W^+$ boson	
	<b>e</b> electron	<b><math>\mu</math></b> muon	<b><math>\tau</math></b> tau	<b><math>W^-</math></b> $W^-$ boson	
	<b>Higgs*</b> boson			<b>g</b> gluon	

Source: AAAS

\*Yet to be confirmed

The particle drawings are simple artistic representations

# 大型強子對撞器(Large Hadron Collider, LHC)

- 2008年落成
- 建造費：90億美元
- 質子加速至  
 $99.999999\%c$  ( $7 TeV$ )
- 2500物理學家  
37國家  
169所大學參與
- 每秒數據 = 100,000CD

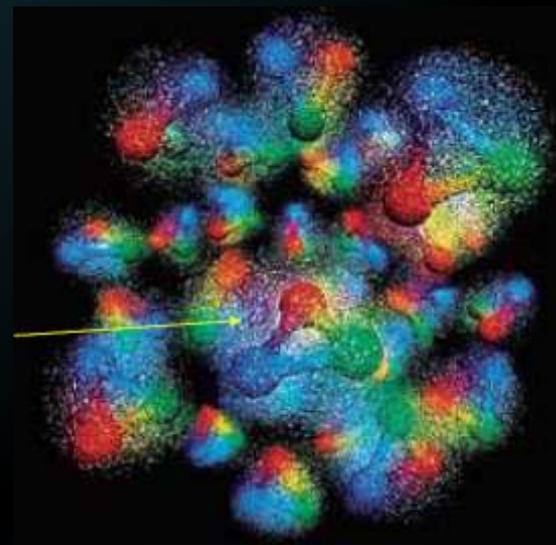
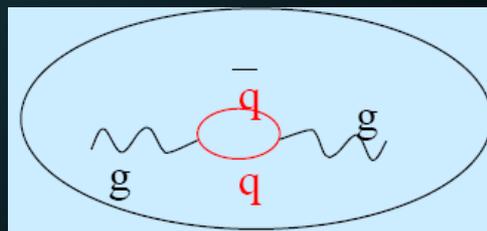
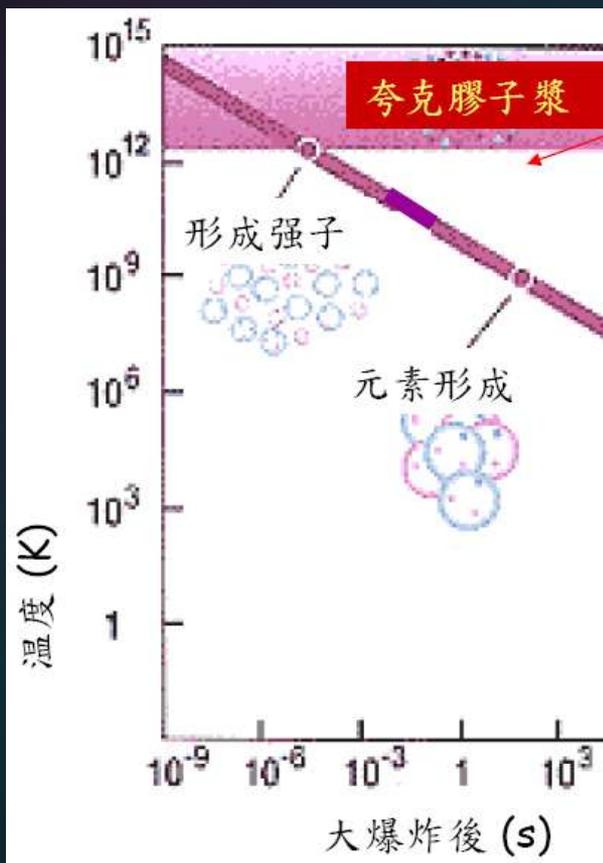


# 大型強子對撞器(Large Hadron Collider, LHC)

- 主要實驗目的：  
驗證基本力場理論 –  
    尋找希格斯粒子(Higgs particle)  
    基本作用 = 規範場？  
    基本作用是否統一？
- 其他研究：  
    「模擬宇宙大爆炸」  
    夸克物質  
    微型黑洞  
    尋找多餘空間維度(extra dimensions)  
    超對稱粒子(supersymmetric partners)

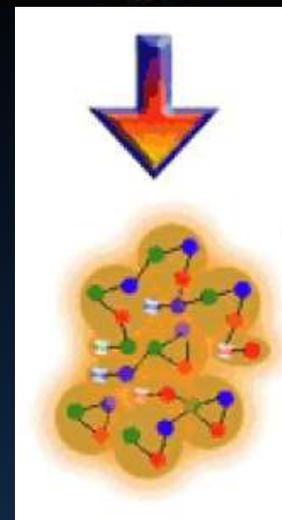
# 模擬宇宙大爆炸？

- 模擬宇宙生成初期的能量級



理論預測高溫時：

束縛夸克→夸克膠子漿



# 尋找多餘空間維度

- 為何重力這麼弱？ 重力/電磁力  $\sim 10^{-38}$
- 膜理論(Brane model)：宇宙有多餘空間維度，分薄重力
- 多餘維度在很細小的尺度內
- 若重力增大至與電磁力相若，LHC可能每秒製造一個微型黑洞。
- 末日實驗！

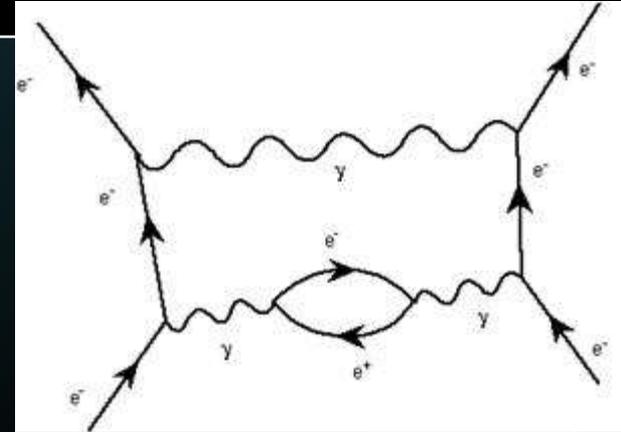


# 由量子場論至希格斯機制

- 希格斯玻色子在基本作用的角色
  - 四種基本作用
  - 標準粒子模型
  - 量子場論及場粒子
  - 量子場論下的基本作用
  - 現代物理的主調：對稱性
  - 規範對稱、規範場與相互作用
  - 規範粒子的理論缺陷
  - 自發性對稱破壞與希格斯機制

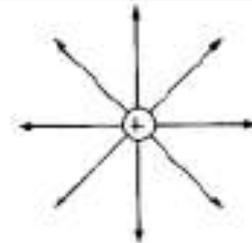
# 量子場論 Quantum Field Theory, QFT

- 現代粒子物理的基礎語言
- 結合 量子力學 與 相對論的物理描述
  - 量子力學→小尺度系統
  - 相對論→高能量系統
- 場(field)的量化描述  
→場粒子(field particle) = 場的激發態(excited state)
- 描述物理世界中的基本作用力
- 首個成功的量子場論：  
量子電動力學(Quantum Electrodynamics, QED)
- 計算基本粒子的性質、相互作用等等

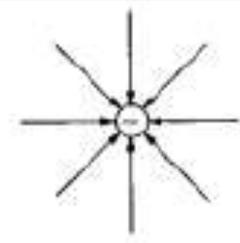


# 量子場論

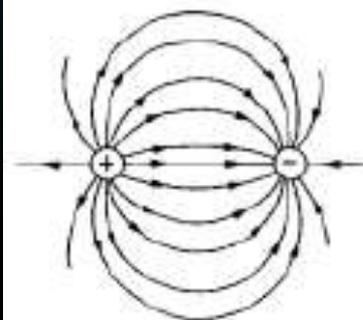
- 場 (field)
  - 基本作用力在空間(時空)的運作  
e.g. 重力場、電磁場



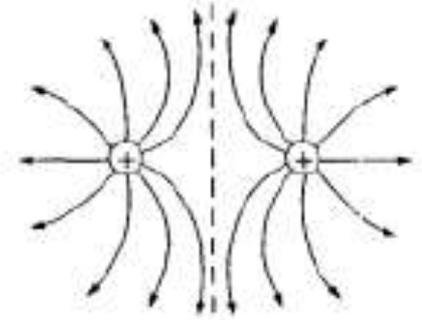
(a) Positive charge



(b) Negative charge



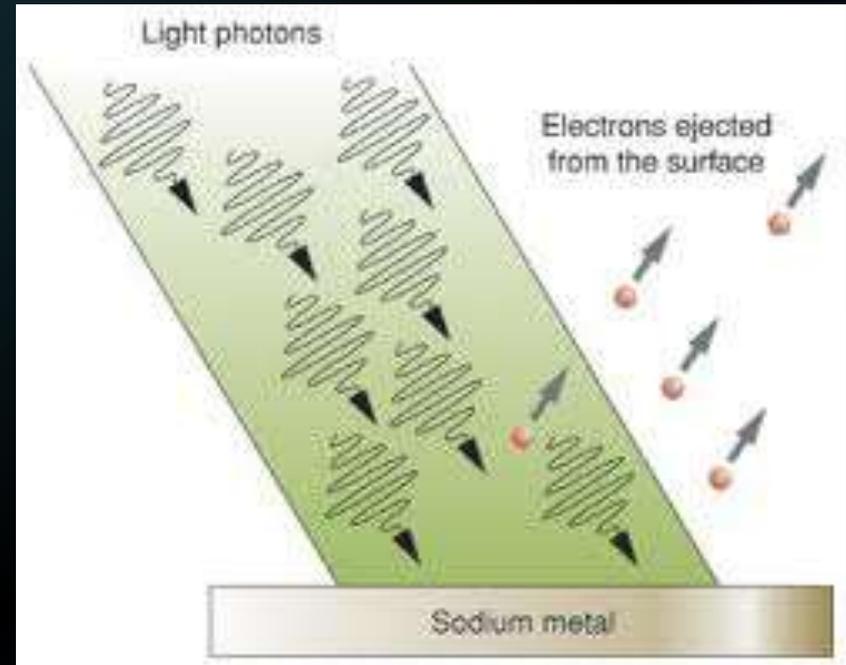
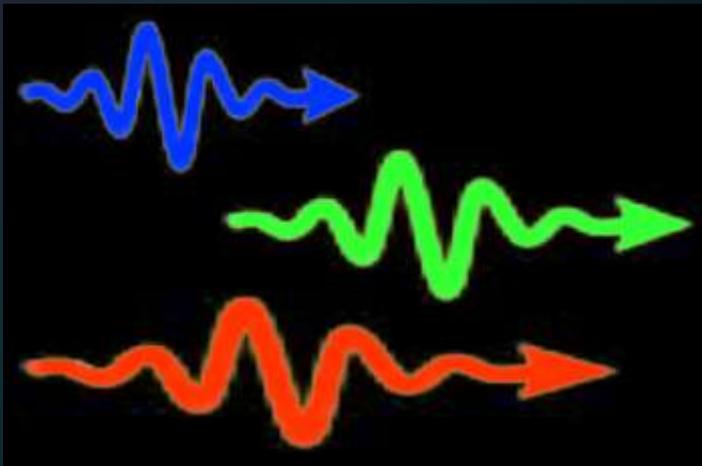
(c) Positive and negative charge



(d) Positive and positive charge

# 量子場論

- 場的量子化 (field quantization) → 場粒子 (field particle)
- 電磁場的量子化 → 光子(photon)



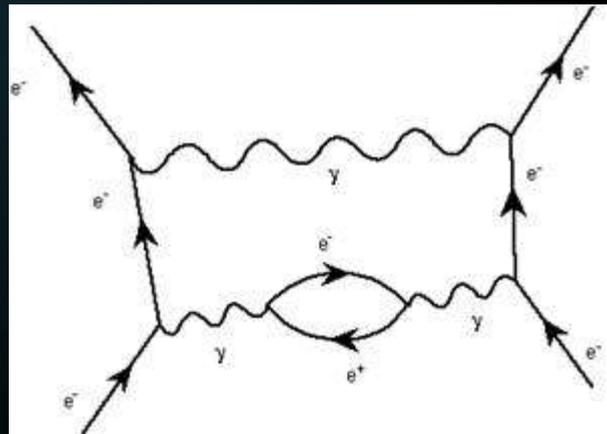
# 量子場論下的基本作用

- 量子電動力學
  - 首個完全結合量子力學與相對論的理論



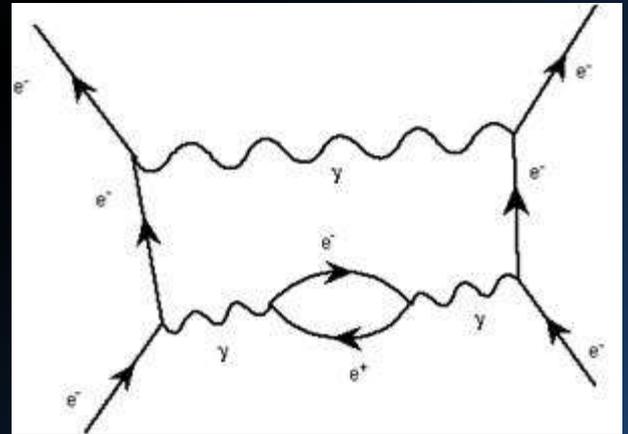
- 準確描述光與物質的相互作用
- $g$ -因子(電子) :  $(g/2)$   
1.00115965221(實驗) vs 1.00115965246(QED)

- 帶電粒子交換光子相互作用



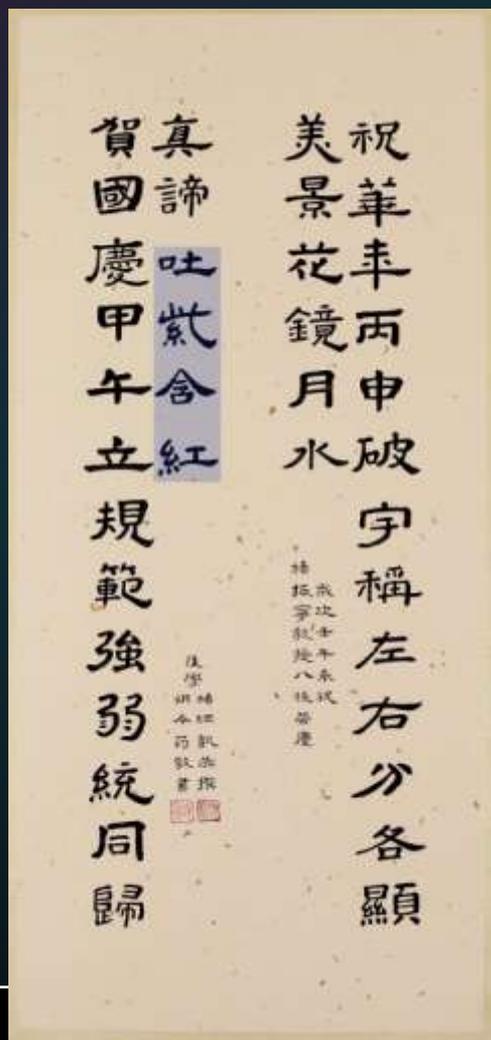
# 量子場論下的基本作用

- 強作用 (strong interaction)
  - 電荷(electric charge)→色荷(colour charge)
  - 量子電動力學→量子色動力學(QCD)
  - 描述夸克之間的相互作用
- 帶色荷粒子交換膠子(gluon)相互作用
- 量子場論下的基本作用
  - 相關粒子交換規範粒子 (gauge boson)相互作用
  - →規範對稱(gauge symmetry)



# 楊振寧教授

賀楊振寧教授八秩華誕



# 物理世界的對稱性

- Q: 如何理解經典物理中的守恒定律？  
能量守恒、動量守恒、角動量守恒
- A: 經典對稱與Noether定理

諾特定理Noether's Theorem(1915)：

對任何基於作用量(action)的物理定律，  
若系統存在連續對稱(continuous symmetry)，  
則必存在對應的守恒定律。

Emmy Noether

被希爾伯特、愛因斯坦稱為  
數學史上最重要的女性。

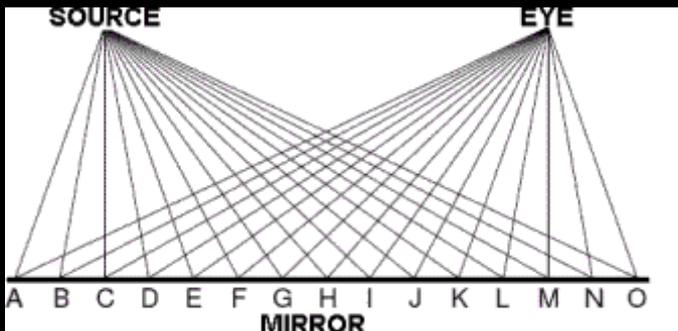


# 以作用量描述的物理定律(光學)

- 光的反射與折射
  - 反射定律：入射角 = 反射角
  - 折射定律： $\sin(\text{入射角})$  正比於  $\sin(\text{反射角})$

費馬最短時間原理Fermat's principle of least time(1662)：

在可供選擇的**路徑**中，  
光選擇最短**時間**的路徑前往目的地。



作用量



Pierre de Fermat

一道謎題，為數學家帶來四百年苦惱。

# 以作用量描述的物理定律(力學)

- 經典力學
  - 牛頓定律：力→加速度

最小作用原理Principle of least action：

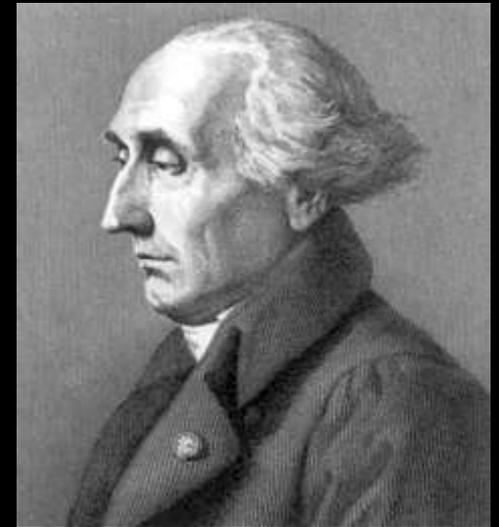
在可供選擇的運動中，  
物體選擇最小作用量的運動。

作用量  
Action

$$S = \int L dt$$

拉格朗日量  
Lagrangian

$$L = T - V$$



Joseph Louis Lagrange

不同的作用量→不同的物理定律

一式Lagrangian，為物理學生帶來三年苦惱。

# 物理世界的對稱性

Q: 何謂對稱？

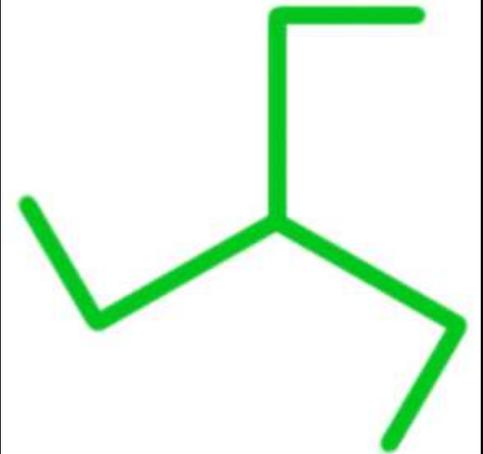
A: 經過變換而保持不變

物理系統的連續對稱：

- 平移對稱(Translational)
- 旋轉對稱(Rotational)
- 時間對稱(Temporal)



Symmetry



# 物理世界的對稱性

- Q: 如何理解經典物理中的守恒定律？  
能量守恒、動量守恒、角動量守恒
- A: 經典對稱與Noether定理

諾特定理Noether's Theorem(1915)：

對任何基於作用量(action)的物理定律，  
若系統存在連續對稱(continuous symmetry)，  
則必存在對應的守恒定律。

- 平移對稱(Translational) → 動量守恒
- 旋轉對稱(Rotational) → 角動量守恒
- 時間對稱(Temporal) → 能量守恒

# 規範對稱(gauge symmetry)

- 物理量的內在結構：  
物理系統中不能被量度的量

- 例子(滑雪)：

斜坡(高度差)產生下滑

我們只能感受下滑，而不能感受高度！

- 改變高度(變換)而不改變產生的斜坡(對稱)



阿爾卑斯山  
還是  
北海道？

# 規範對稱(gauge symmetry)

- 類比：  
貨品的價值沒有絕對意義，只有相對意義  
例如：蘋果 = \$3 可樂 = \$6  
  
3和6沒有絕對意義，重點是2個蘋果 = 1支可樂
- 變換：全省所有物品價值  $\times 10$  (包括你銀包裏的銀紙)
- 規範對稱1(全局對稱)：全國所有物品價值  $\times 10$
- 規範對稱2(局域對稱)：  
每個省份價值各乘以不同數值  
但必需適當調整不同省貨幣之間的匯率

規範場！

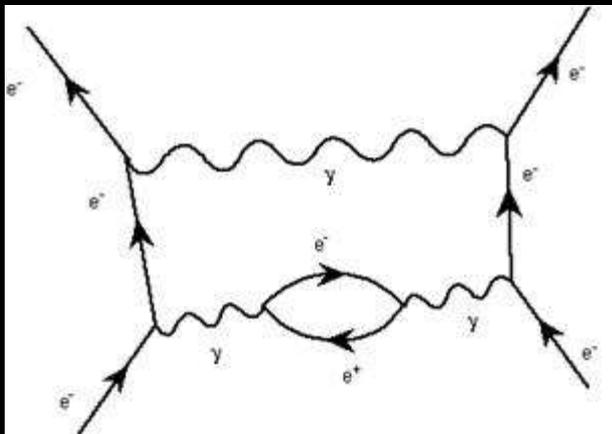


# 量子場論的規範變換

量子場(物品價值)

局域規範對稱

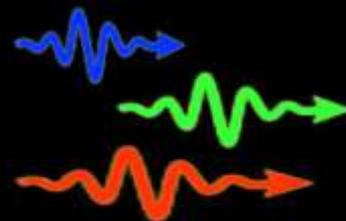
規範場(匯率)



量子場(描述電子)

局域U(1)規範對稱

規範場(電磁勢)



量子電磁作用(QED)

# 規範場(gauge field)與規範玻色子(gauge boson)

- U(1)規範對稱：

電磁作用：交換光子(規範玻色子)以傳遞力

- SU(3)規範對稱：

強作用：交換膠子(規範玻色子)以傳遞力

- SU(2)規範對稱：

弱作用：交換W及Z(規範玻色子)以傳遞力

## 規範玻色子的理論缺陷

- 在量子場論中，  
規範對稱要求規範玻色子的質量必需為0！
- 規範玻色子(電磁)：光子
- 規範玻色子(強作用)：膠子
- 規範玻色子(弱作用)：W及Z 質量不為0！

# 自發性對稱破壞(Spontaneous symmetry breaking)

- 電磁作用 和 弱作用似乎是很不同的現象(不對稱)
- 會否在很高能量時，兩者統一？
- 類比：

水分子呈V狀結構

但在極高溫度時，所有化學鍵被拆開

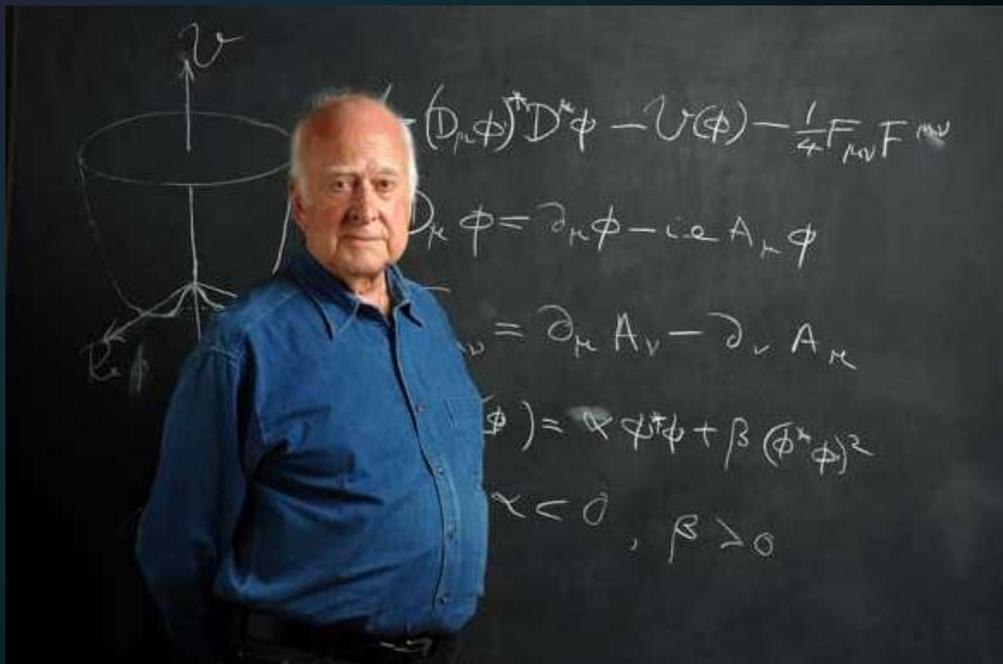
剩下氧和氫原子



↑  
自發性對稱破壞

# 希格斯機制

- 解釋如何通過破壞局域規範對稱，讓沒有質量的規範玻色子(W, Z)轉成有質量的粒子
- 此機制同時引進一種新的場 – 希格斯場

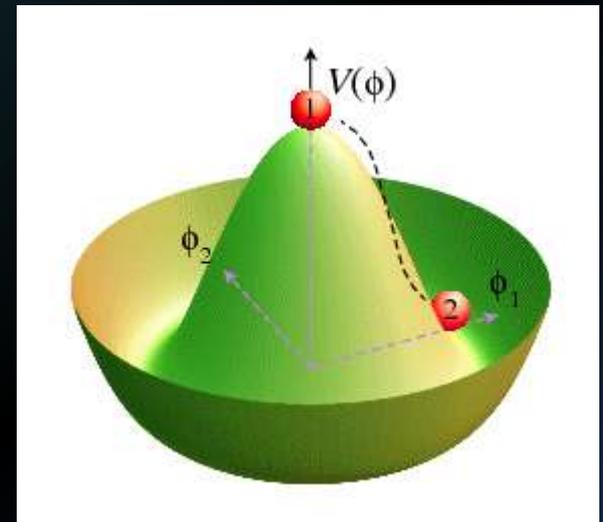
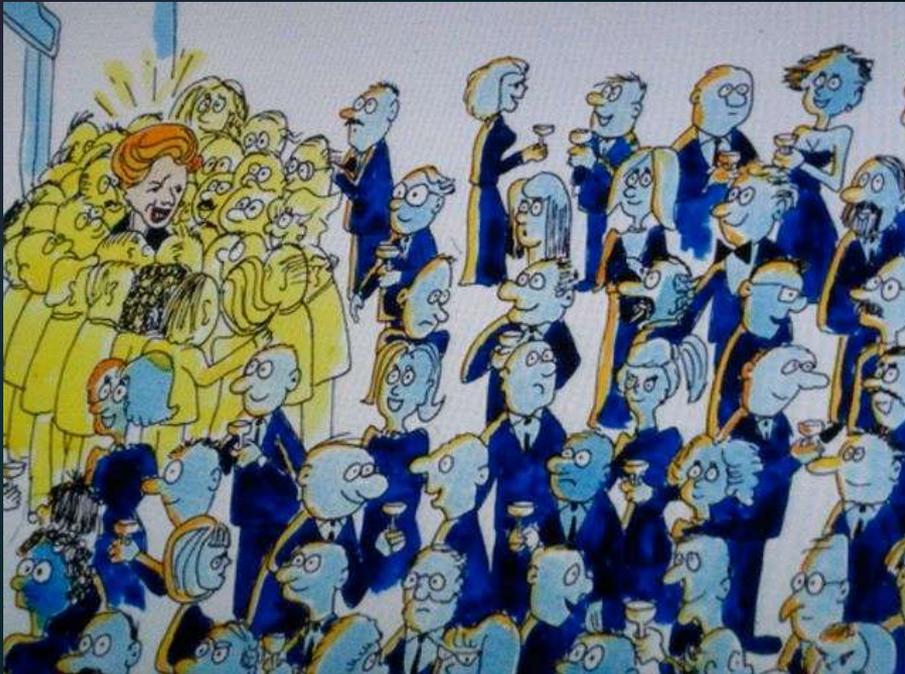


Peter Higgs



# 希格斯機制

- 1→2：對稱性破壞
- 規範場與希格斯場「混合」並獲得質量



# 標準模型

## MATTER



*Quarks*



*Leptons*

## FORCE



*Gauge Bosons*



*Higgs Boson?*

THE STANDARD MODEL OF  
PARTICLES AND FORCES

IS THIS ALL THAT EXISTS?

# LHC的目前成果

- 10/9/2008：首束質子成功穿越隧道
- 19/9/2008：電路故障，6噸液態氦洩漏，大型磁鐵損壞



# LHC的目前成果

- 20/11/2009 : LHC重新啟動
- 23/11/2009 : 首次質子碰撞記錄
- 30/3/2010 : 兩束3.5TeV粒子束成功撞擊，史上最高能量撞擊記錄
- 2011 - 2013 : 3.5TeV撞擊，不同實驗
- 2014 - : 更高能量撞擊

星匯點網頁

<http://starrix.org/>

討論區

<http://bbs.starrix.org/>

