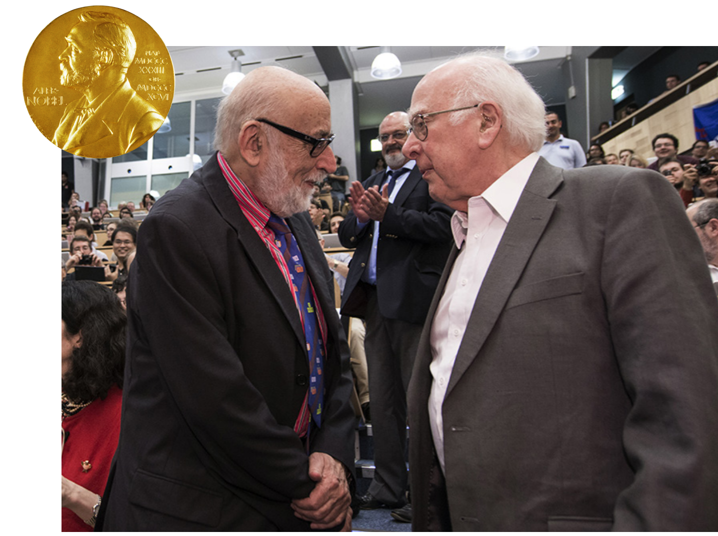
在希格斯粒子发现十周年之际
展望粒子物理的未来

王连涛
芝加哥大学

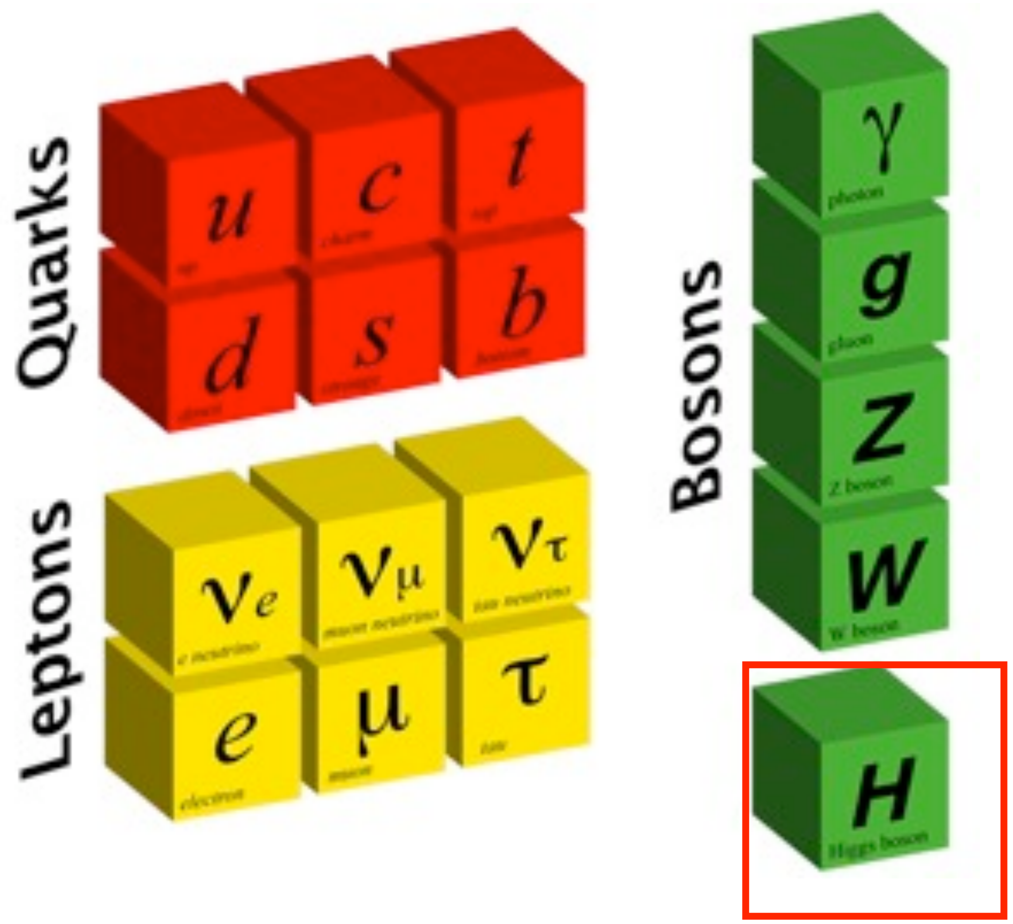
第八届中国LHC物理研讨会，十一月二十五日

希格斯粒子发现十周年

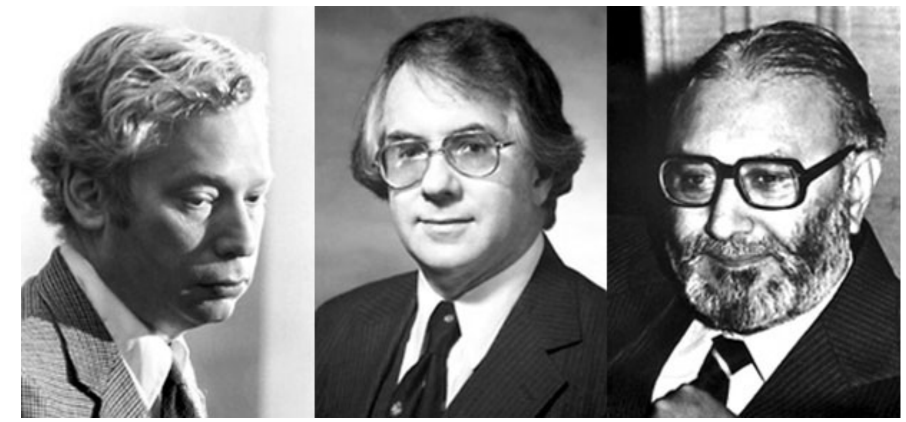


- 历史性的日子，2012年7月4日。

里程碑式的发现，完成了标准模型



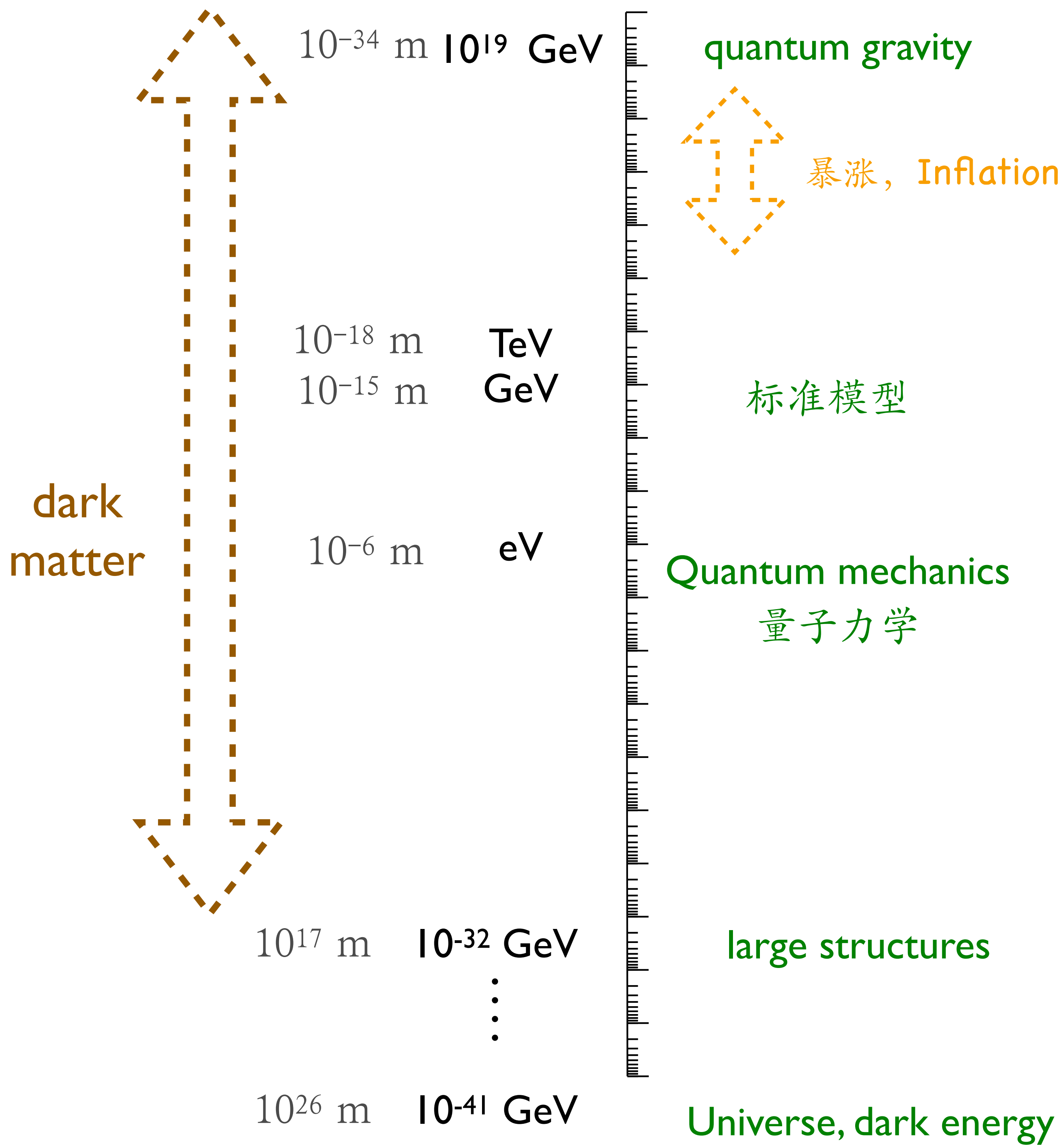
S. Weinberg S. Glashaw A. Salam



1961-1968

标准模型是最成功的科学理论
和所有的实验检验高度吻合

我们的宇宙图像

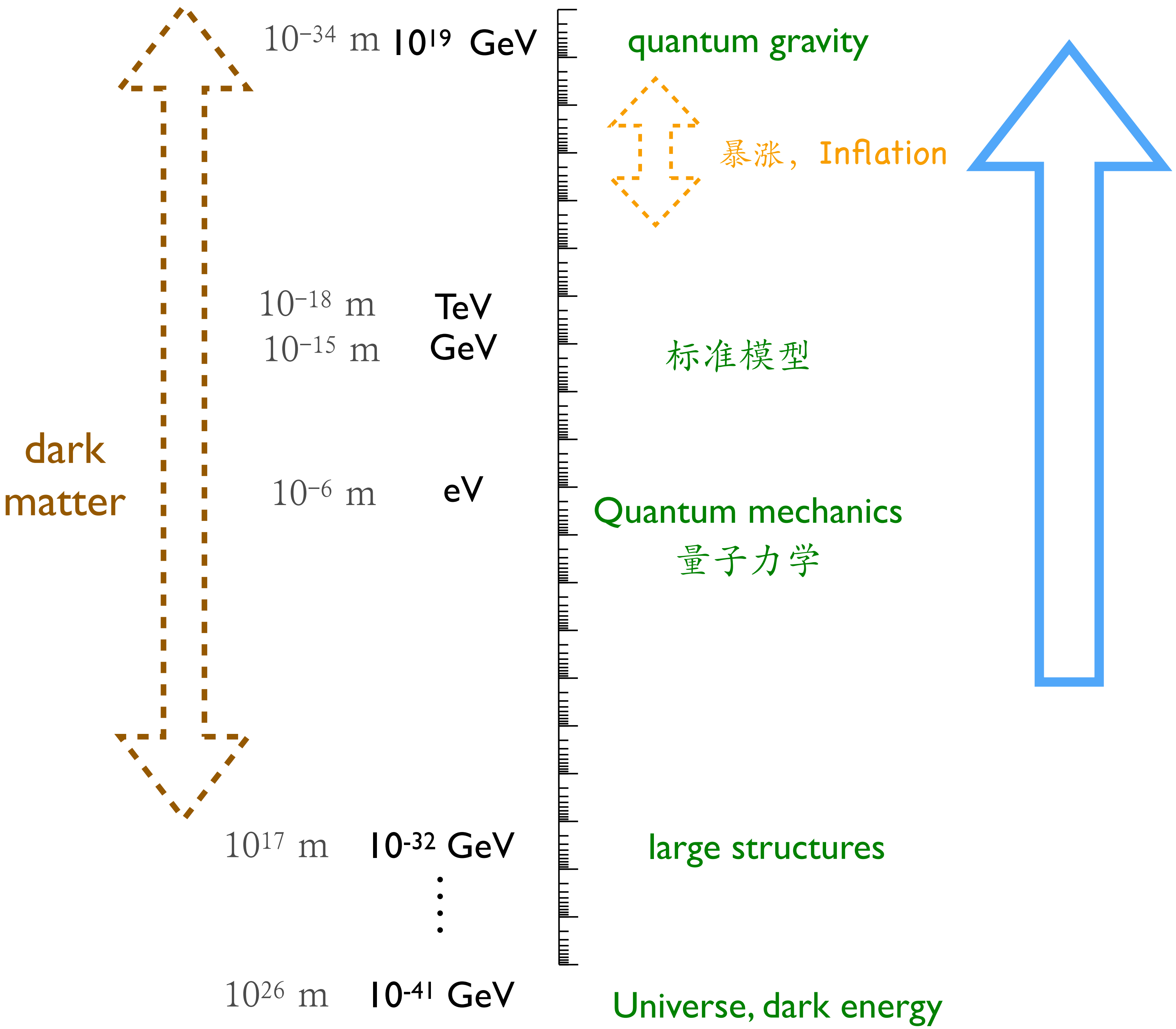


一个世纪以来物理学的伟大成就

在跨越60个数量级的尺度和能量上成功地描述自然现象

相对论+量子力学：质量$\propto$能量$\propto$长度$^{-1}$

我们的宇宙图像

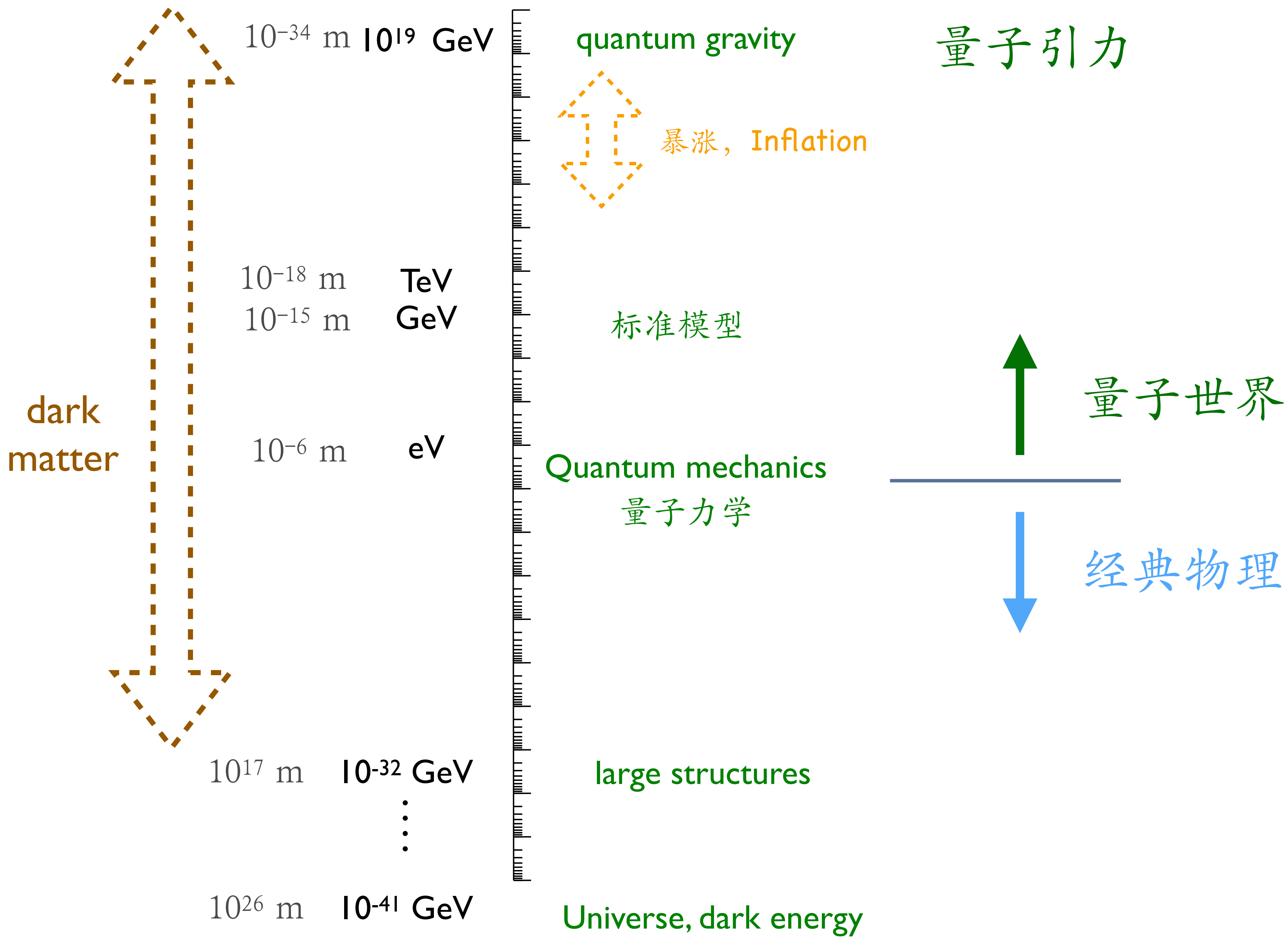


更小的微观尺度

显示出更基本的理论

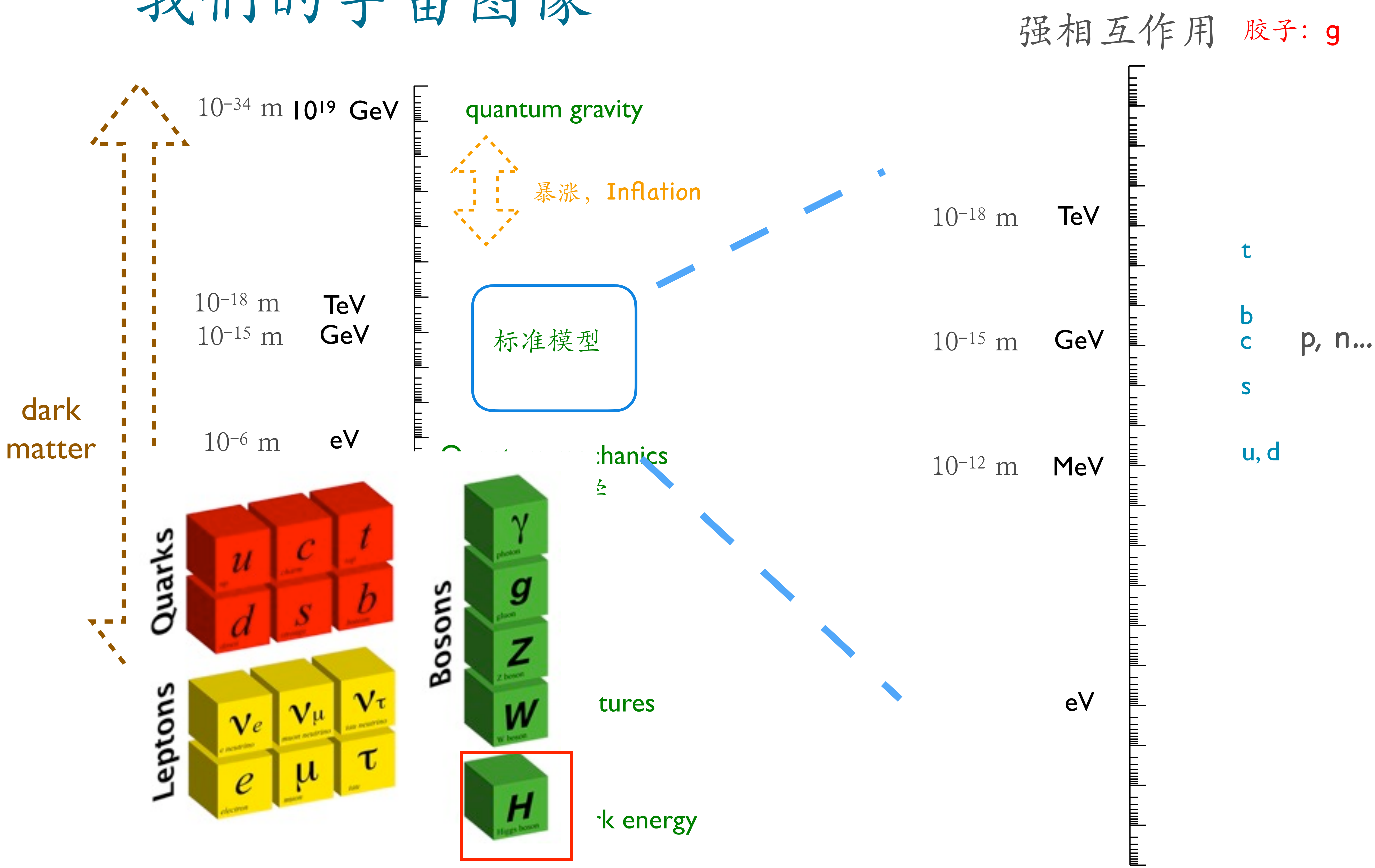
还原论的巨大成功！

我们的宇宙图像



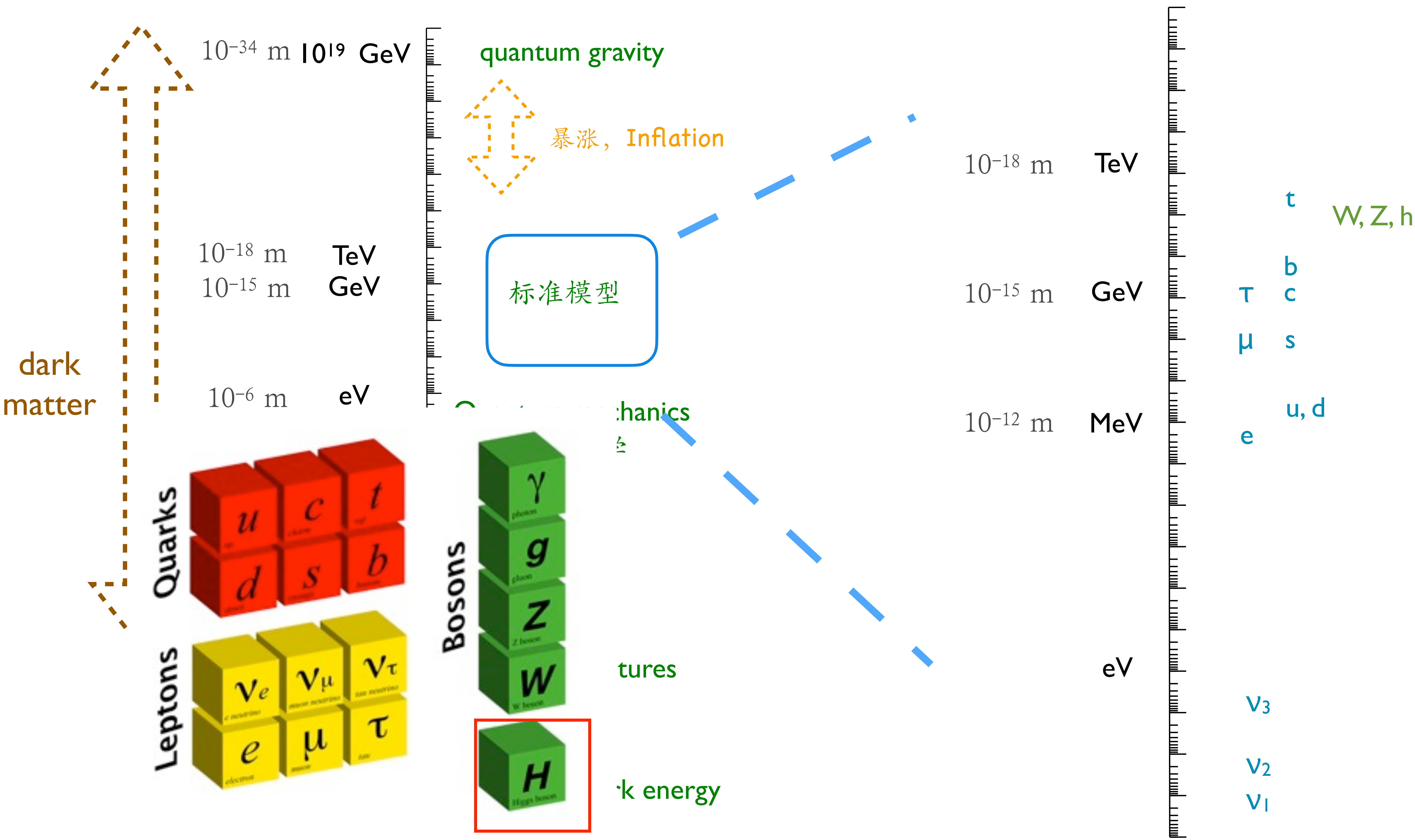
10^{-34} m 10^{19} GeV
quantum gravity
量子引力
暴涨，Inflation
10^{-18} m TeV
10^{-15} m GeV
标准模型
量子世界
dark matter
10^{-6} m eV
Quantum mechanics
量子力学
经典物理
10^{17} m 10^{-32} GeV
large structures
10^{26} m 10^{-41} GeV
Universe, dark energy

我们的宇宙图像



强相互作用
胶子: g
10^-34 m 10^19 GeV
quantum gravity
暴涨, Inflation
10^-18 m TeV
10^-15 m GeV
标准模型
dark matter
10^-6 m eV
Quarks
u c t
d s b
Leptons
νe νμ ντ
e μ τ
Bosons
γ
g
Z
W
H
10^-18 m TeV
t
10^-15 m GeV
b
c
p, n...
s
10^-12 m MeV
u, d
eV

我们的宇宙图像



弱相互作用 W, Z
10^{-34} m 10^{19} GeV
quantum gravity
暴涨，Inflation
10^{-18} m TeV
10^{-15} m GeV
标准模型
dark matter
10^{-6} m eV
:hanics
tures
·k energy
Quarks
u c t d s b
Leptons
ν_e ν_μ ν_τ e μ τ
Bosons
γ g Z W H
10^{-18} m TeV
t
W, Z, h
b
τ c
10^{-15} m GeV
μ s
10^{-12} m MeV
u, d
e
eV
ν_3
ν_2
ν_1

我们的宇宙图像

dark matter

10^{-34} m 10^{19} GeV

10^{-18} m TeV

10^{-15} m GeV

10^{-6} m eV

10^{17} m 10^{-32} GeV

⋮

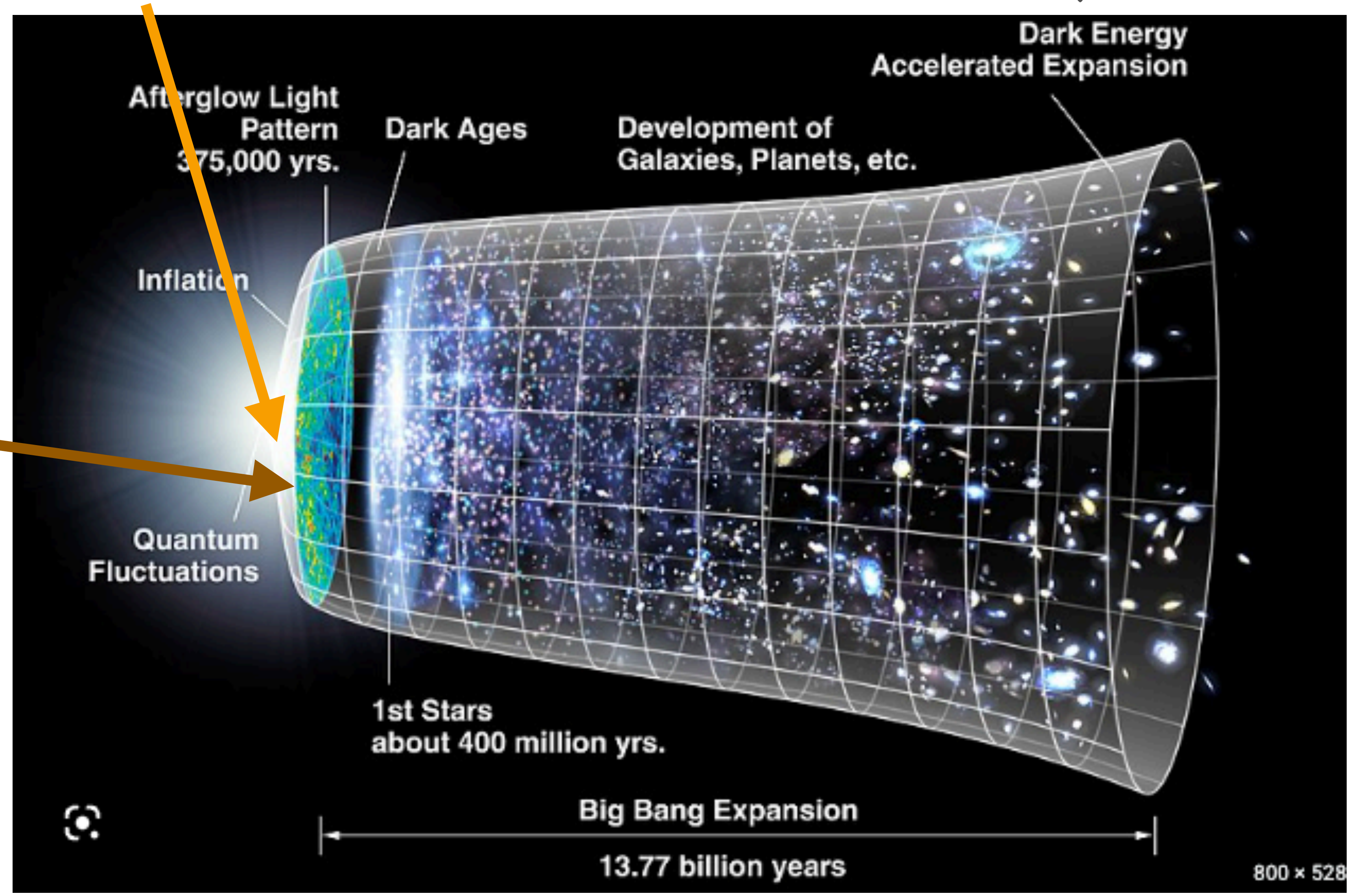
10^{26} m 10^{-41} GeV

Universe, dark energy

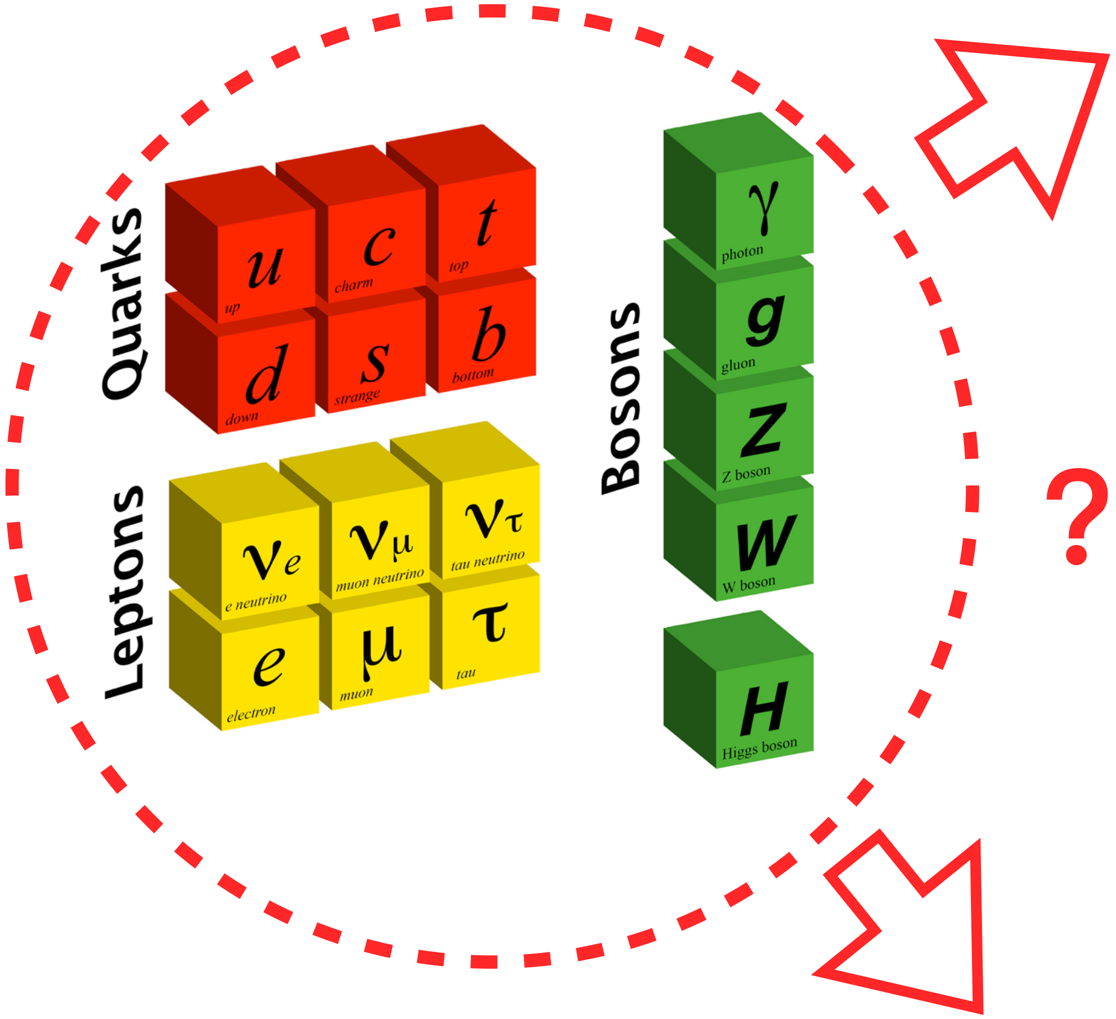
quantum gravity

暴涨，Inflation

宇宙演化

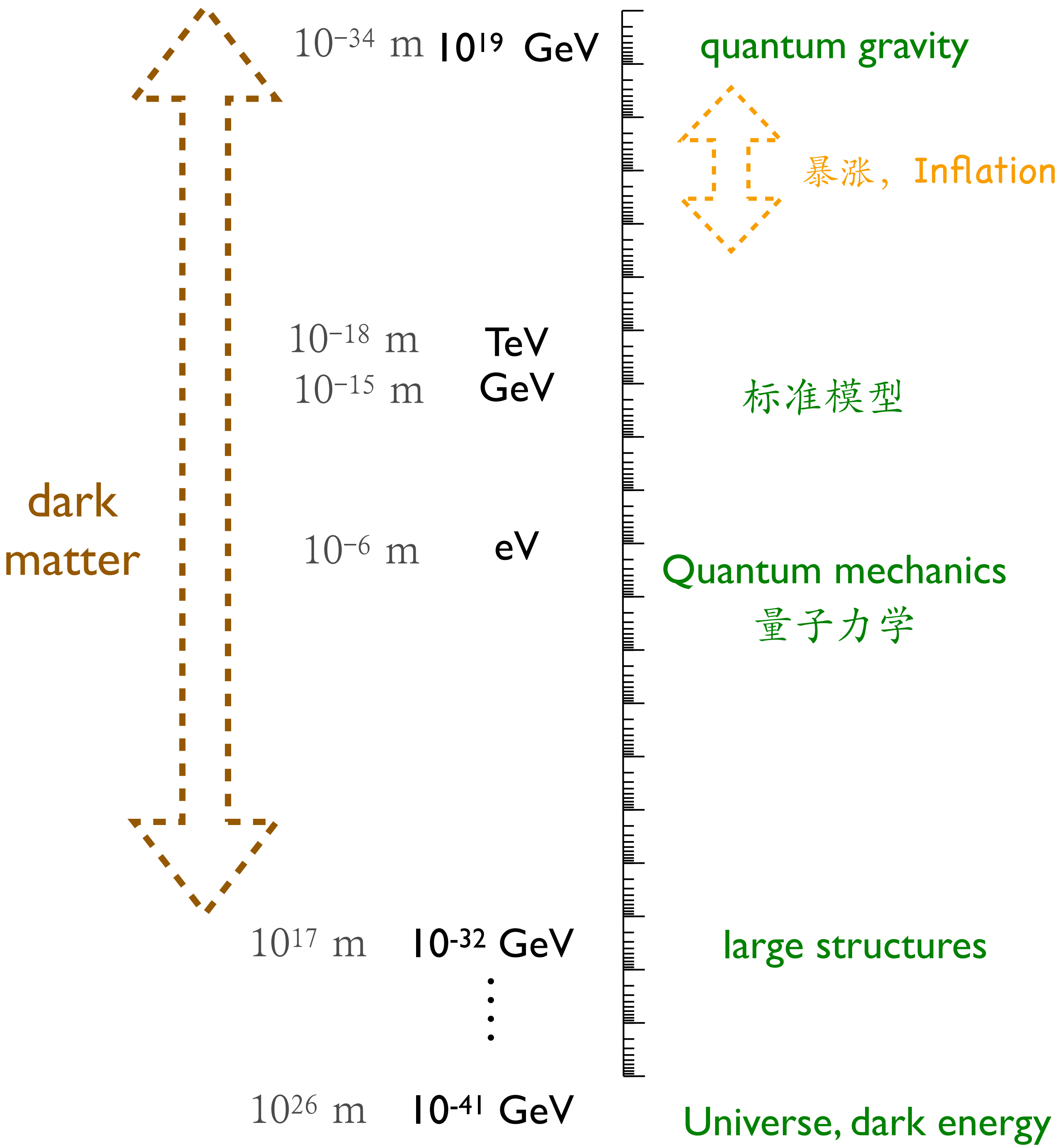


展望未来



It is difficult to make predictions, especially about the future. — N. Bohr

我们的宇宙图像



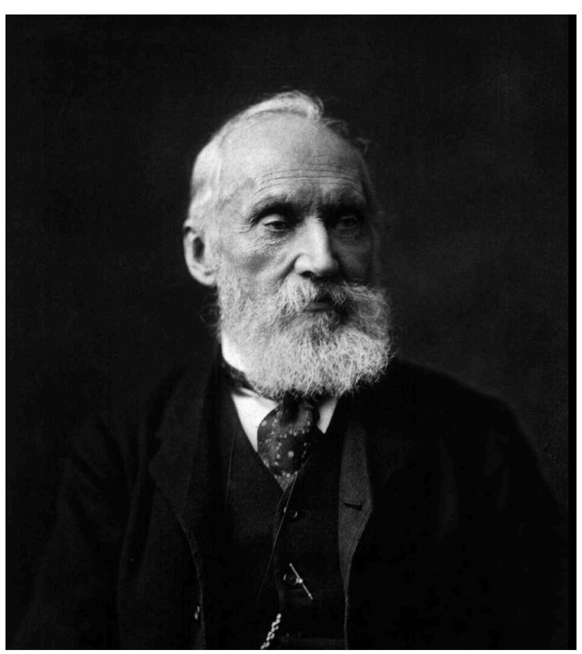
下一步在哪里?

还有什么可以做的吗?

一个多世纪以前

Albert A. Michelson, 1899

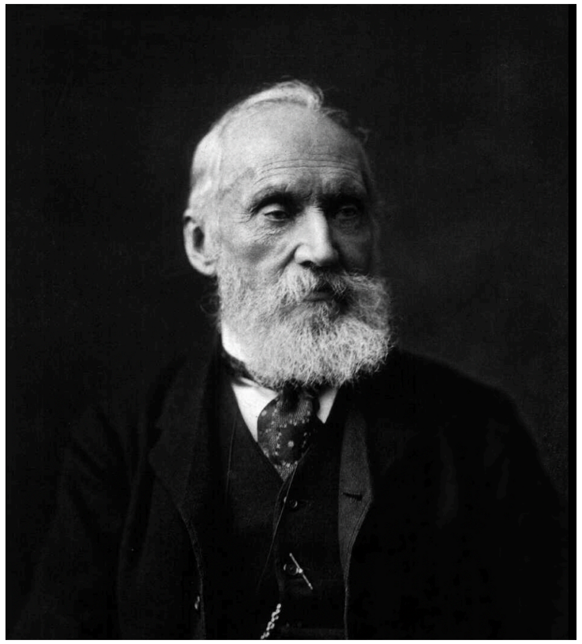
The more important fundamental laws and facts of physical science have all been discovered, and **these are now so firmly established that the possibility of their ever being supplanted in consequence of new discoveries is exceedingly remote.**



Lord Kelvin, 1900　两朵乌云

光的传播，以太 (Michelson-Morley)

Maxwell-Boltzmann 能量均分定理，低温比热



Lord Kelvin, 1900　　两朵乌云

光的传播，以太 (Michelson-Morley):

1905: Einstein 相对论

Maxwell-Boltzmann 能量均分定理，低温比热:

1900: Planck 黑体辐射公式

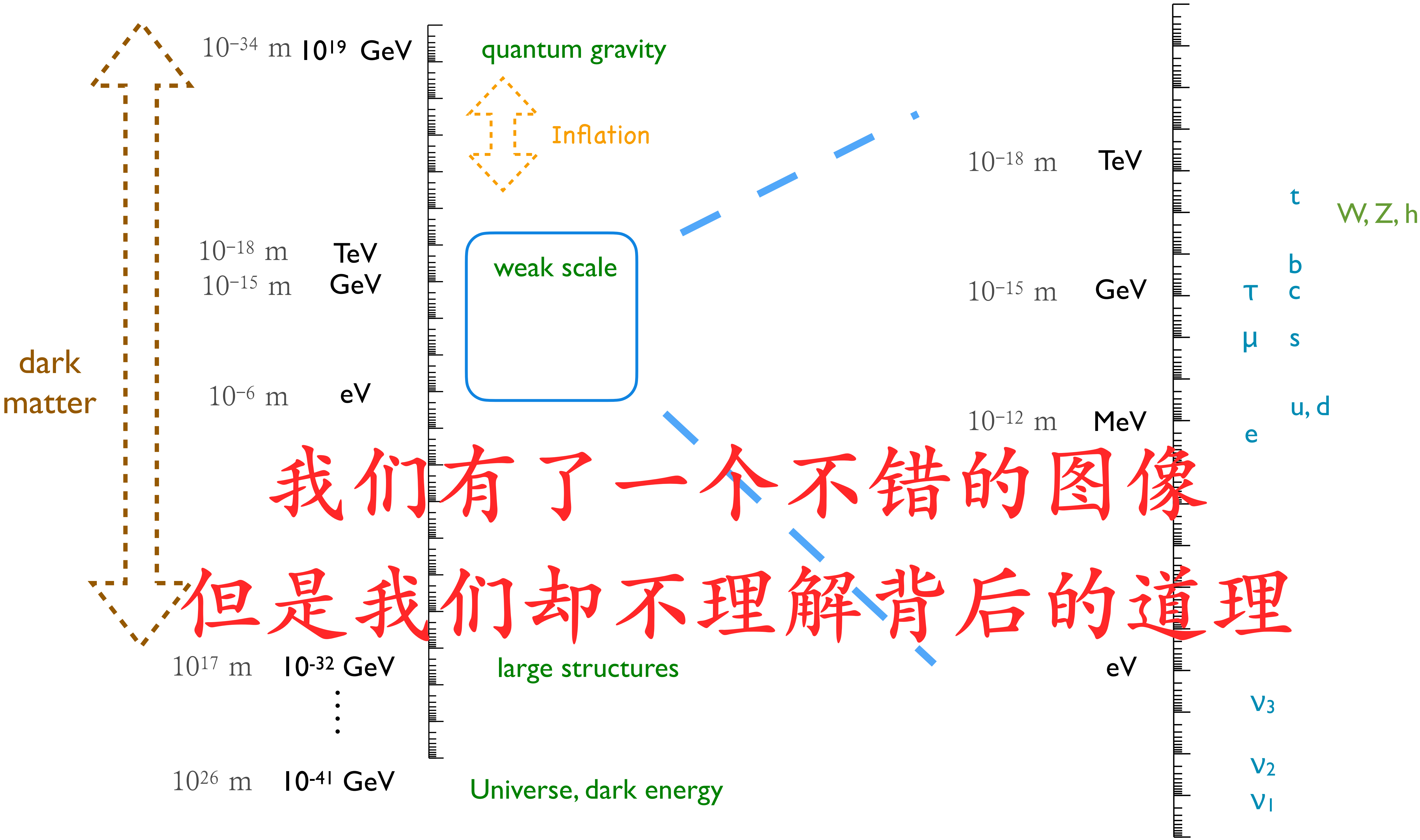
1905: Einstein 光量子理论

1913: Bohr 氢原子模型

1925-1926: Heisenberg, Schrodinger, ... 量子力学

现代物理学天空中的乌云

我们的宇宙图像



我们有了一个不错的图像

但是我们却不理解背后的道理

现代物理学天空中的乌云

- 为什么自然界会有那么多不同的尺度?
- 暗物质是什么?
- 暗能量是什么?
- 为什么宇宙中物质远远多于反物质?
- 宇宙早期的暴涨从何而来?
- 引力是不是遵守量子力学?
- 。。。

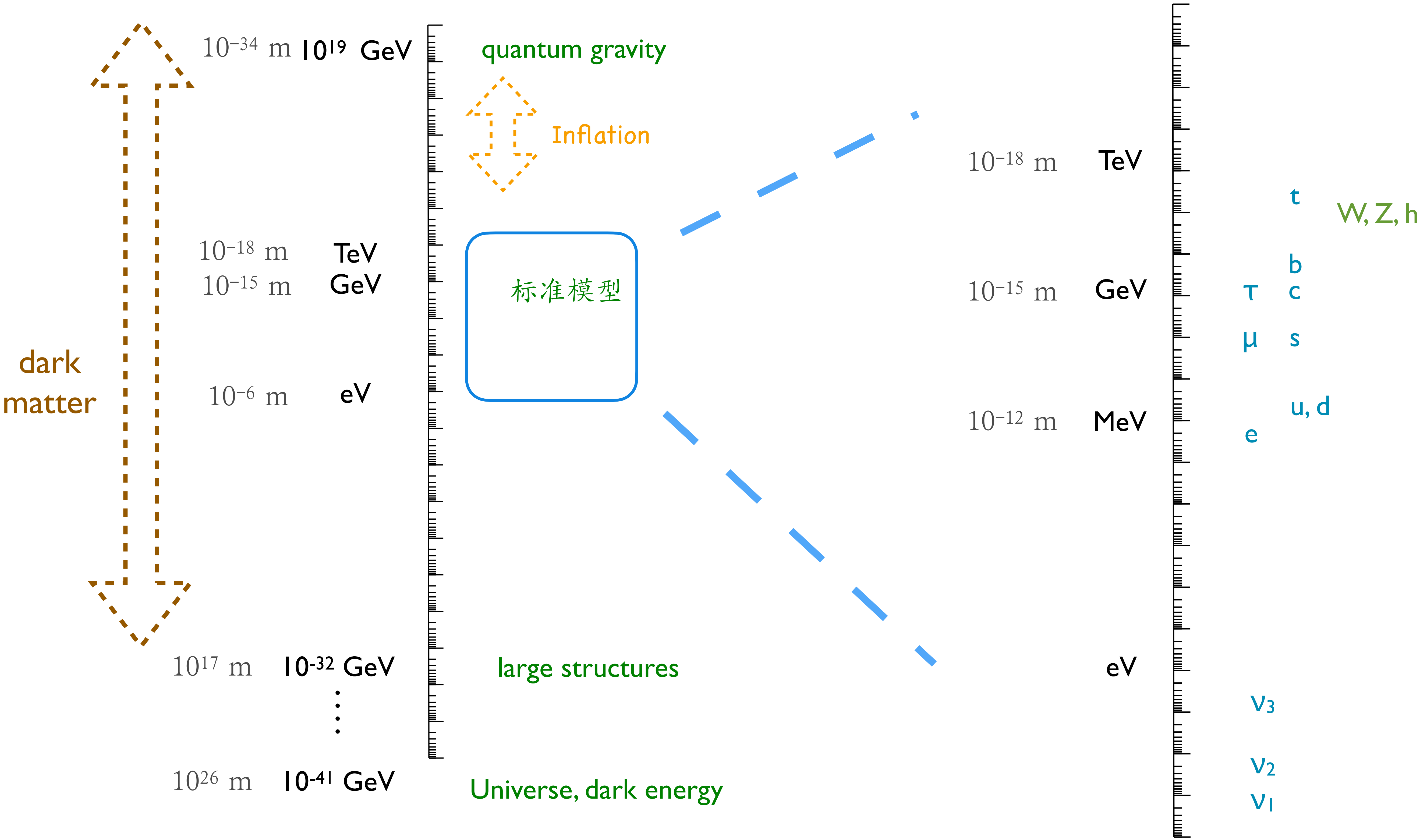
现代物理学天空中的乌云

- 为什么自然界会有那么多不同的尺度?
- 暗物质是什么?
- 暗能量是什么?
- 为什么宇宙中物质远远多于反物质?
- 宇宙早期的暴涨从何而来?
- 引力是不是遵守量子力学?
- 。。。

接下来以这俩个为例

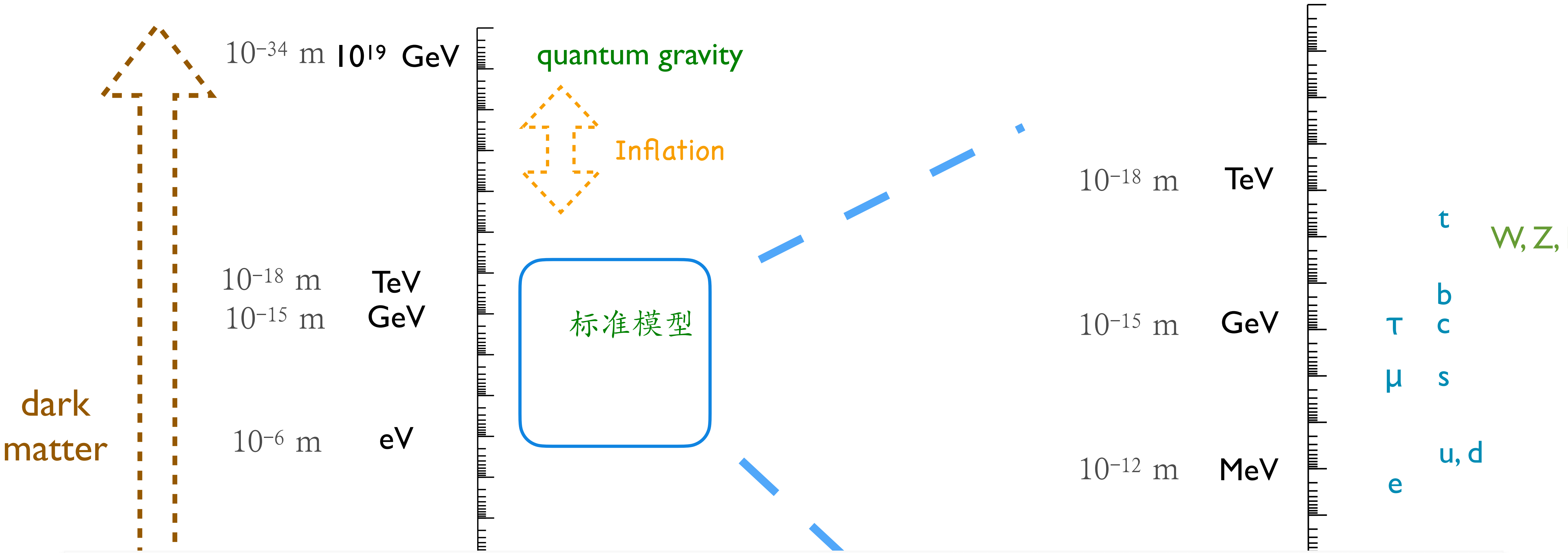
为什么自然界会有那么多不同的尺度?

自然界中的尺度



大不相同的尺度，丰富的结构，为什么？

自然界中的尺度



以标准模型为例：

为什么弱相互作用的能标和量子引力的能标非常不同？

或者说：为什么引力如此微弱？

为什么标准模型本身的粒子质量如此不同？

特殊的希格斯粒子

particle	spin
quark: u, d,...	1/2
lepton: e...	1/2
photon	1
W,Z	1
gluon	1
Higgs	0

h: a new kind of
elementary particle

更加不一般的是:

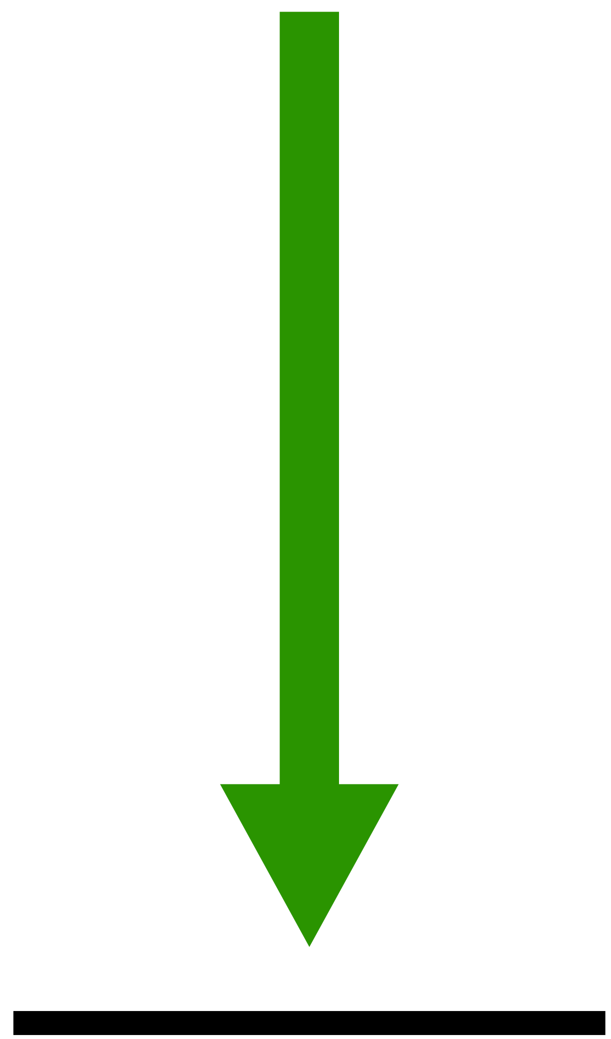
所有标准模型的基本粒子的
质量都来自于和希格斯的相互作用

希格斯的质量从何而来?

产生希格斯质量的基本理论
弦理论，大统一?
• • • • • • • •

这个基本理论在什么能量?
$M_{Planck} = 10^{19}$ GeV?

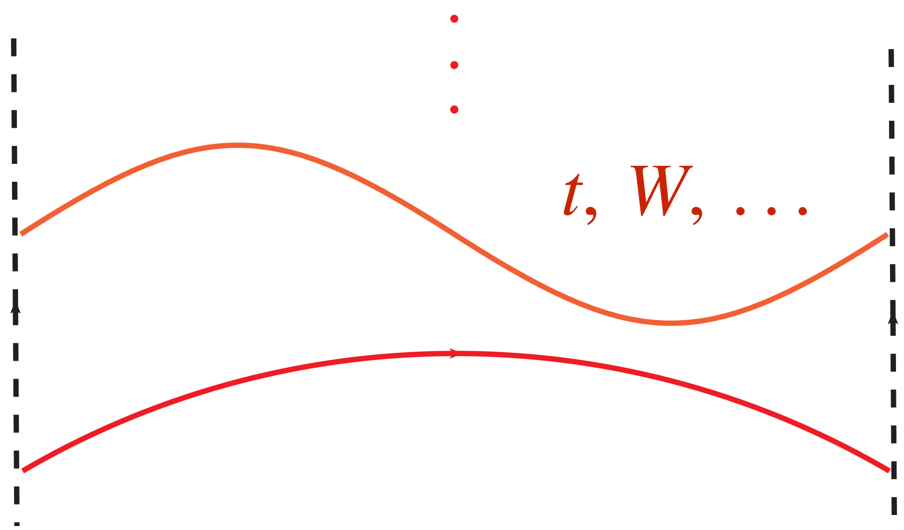
如果是这样，为什么基本理论的能标
和希格斯如此不同?



电弱能标 100 GeV.
希格斯粒子，弱相互作用传播子...

量子涨落的存在使这个图像更加令人不解

标准模型粒子的真空量子涨落⇒希格斯质量



$$\mathcal{H}_{\rm quant} = \sum_{\vec{p}} \frac{1}{2}\hbar\omega_{\vec{p}} \simeq \int^{|p|<\Lambda} \frac{d^3\vec{p}}{(2\pi)^3}\hbar\omega_{\vec{p}}$$

$$\omega_{\vec{p}} = \sqrt{\vec{p}^2 + m^2} \qquad (\hbar = 1)$$

Λ: a cut-off.

标准模型有效范围 E<Λ

标准模型中，希格斯决定了其他粒子的质量

$$m_{\rm W} = g_2 h, \quad m_{\rm top} = y_t h$$

$$H_{\rm quant} \simeq -\frac{3}{8\pi^2} y_t^2 \Lambda^2 h^2 + \frac{9}{64\pi^2} g_2^2 \Lambda^2 h^2$$

⇒ 希格斯质量： $m_h^2(\text{physical}) = m_0^2 + c\,\Lambda^2$

Fine-tuning (微调)

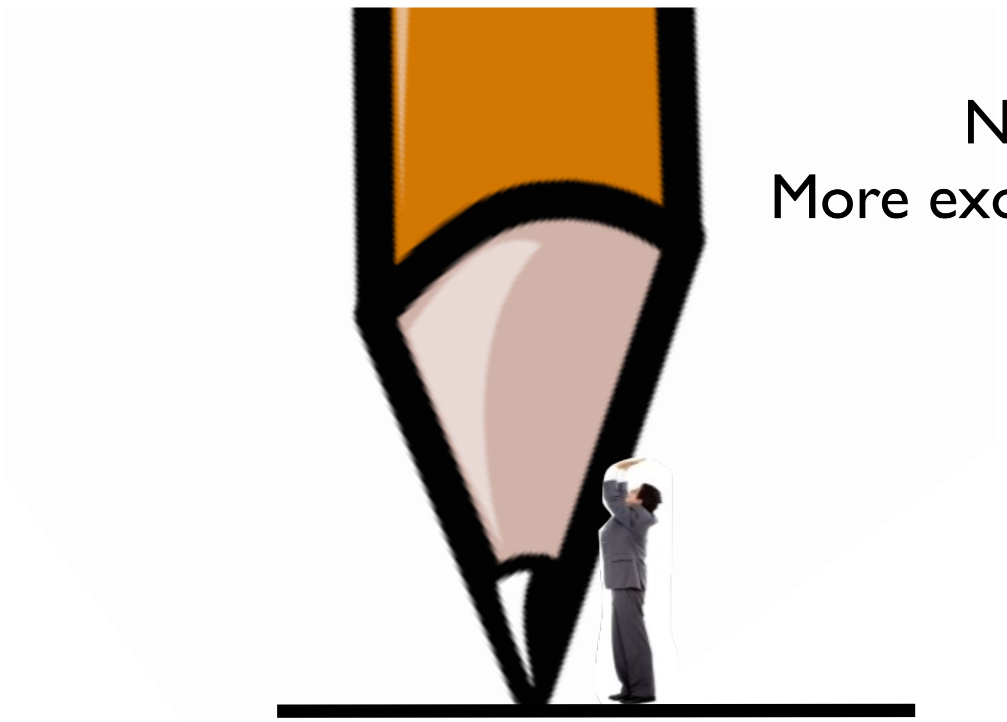
- 希格斯质量: $m_h^2(\text{physical}) = m_0^2 + c\,\Lambda^2$
  - 从数学上讲，永远可以选择m_0^2 使得 $m_h^2(\text{physical})$ 和实验相符.

- 但是，如果 $\Lambda \gg 100$ GeV 等式右边的两个贡献必须很精确的抵消.
  - e.g. $\Lambda \approx M_{Pl} = 10^{19}$ GeV, 或者说标准模型在量子引力能标一下都是有效的
  - $\Rightarrow$ cancellation as precise as 10^{-32}

这样的精确相消有问题吗？

- 数学上讲没有问题。

  $m_h^2(\text{physical}) = m_0^2 + c\,\Lambda^2$. 总可以有解。但是，



No rope?
More exotic possibilities

于此类似，我们在寻找对希格斯质量$O(10^{-32})$微调问题的解释

Another fine-tuning problem

最简单的解释，标准模型有效范围不大

解释希格斯质量的基本理论
就在离标准模型不远的能量

TeV=10^3 GeV new physics.
Many models, ideas.

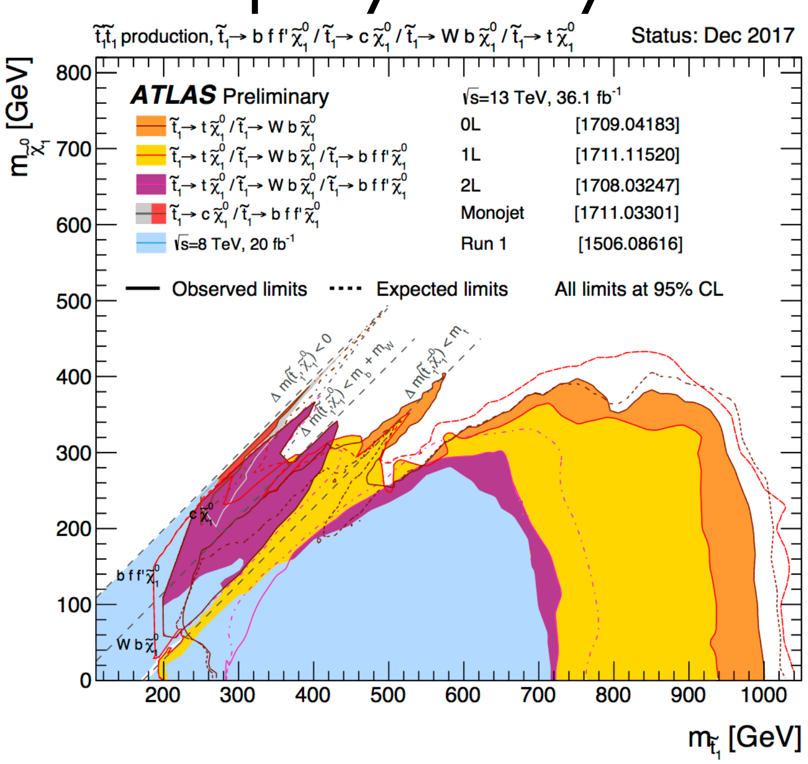
标准模型, 100 GeV.
m_h , m_W ...

目前还没有找到超出标准模型的新物理

大型强子对撞机 (LHC)

质子质子对撞机，E_{CM}=14 TeV

Supersymmetry



current limit: $m_{\mathrm{T}} \sim 1$ TeV

一个疑难：

我们从量子理论基本原理出发，得出新物理应该在TeV左右。

也许我们应该更耐心一点？

还是走错了方向？

解释希格斯质量的基本理论
就在离标准模型不远的能量

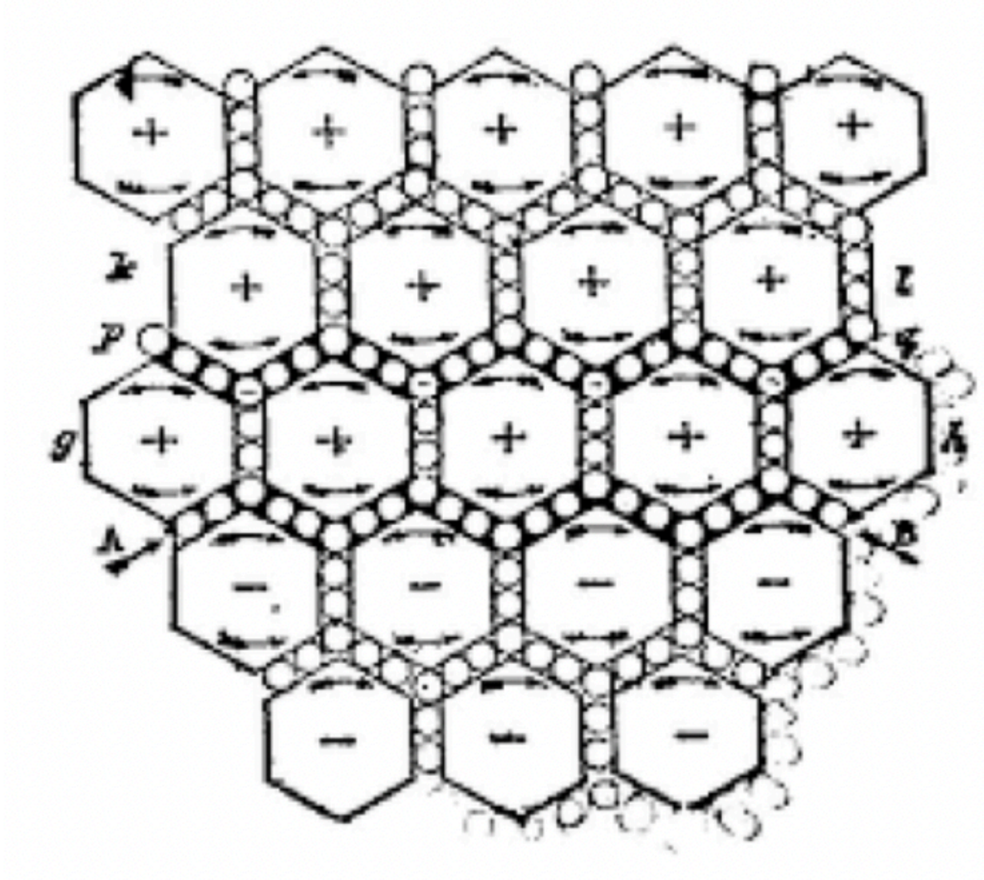
. . . .

TeV=10^3 GeV 新物理
Many models, ideas.

标准模型, 100 GeV.
m_h , m_W ...

一个世纪前：以太理论

James C. Maxwell

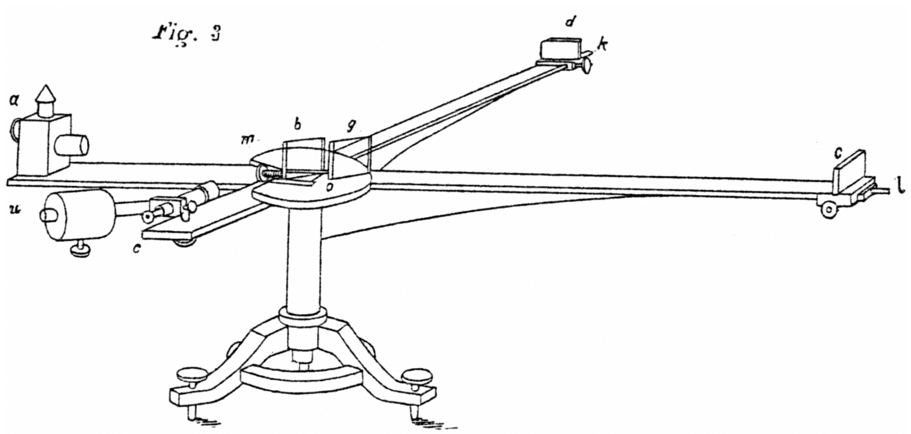


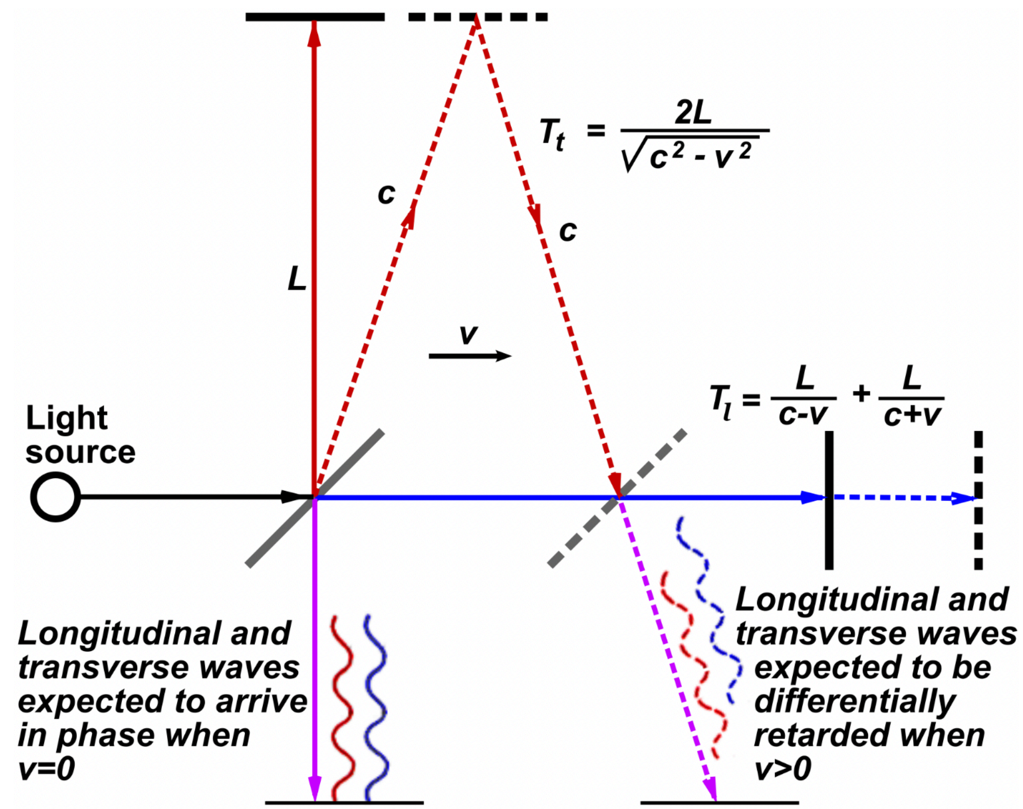
以太机械模型

- 当时的理论：光的传播必须有介质，以太

寻找以太的效应

Michelson-Morley, 1887





…the same laws of electrodynamics and optics will be valid for all frames of reference for which the equations of mechanics hold good…light is always propagated in empty space with a definite velocity c which is independent of the state of motion of the emitting body…

我们的下一步

希格斯质量问题

理论

实验

更好的模型？
multiverse+人择原理？
量子理论失效？
。。。

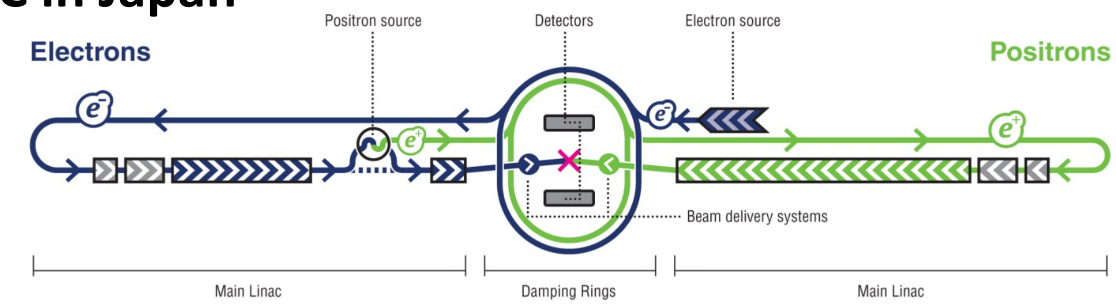
更深入地研究希格斯粒子

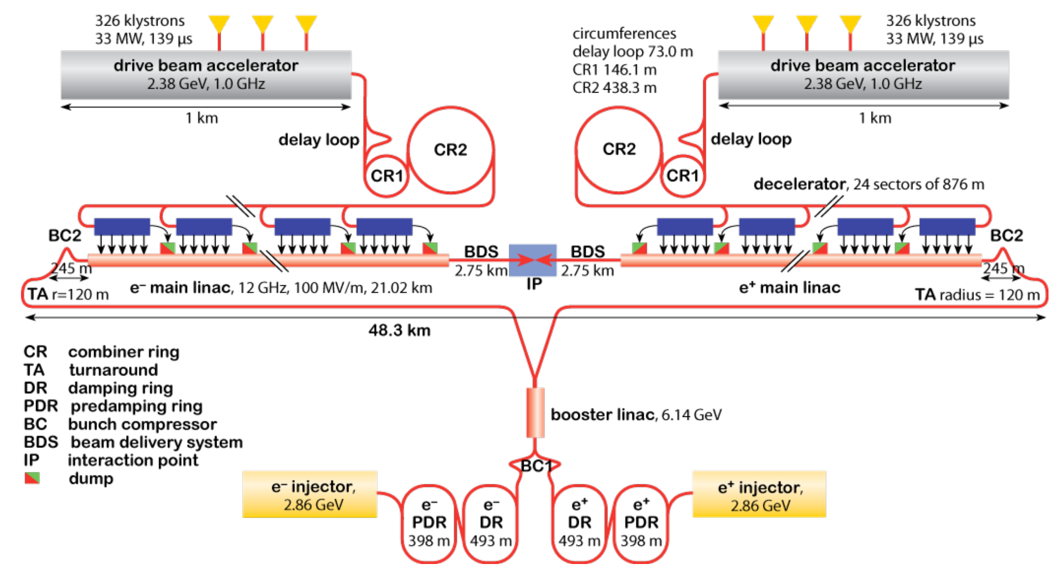
解释希格斯质量必须和希格斯有相互作用
必然能从希格斯性质中看出端倪

未来的实验

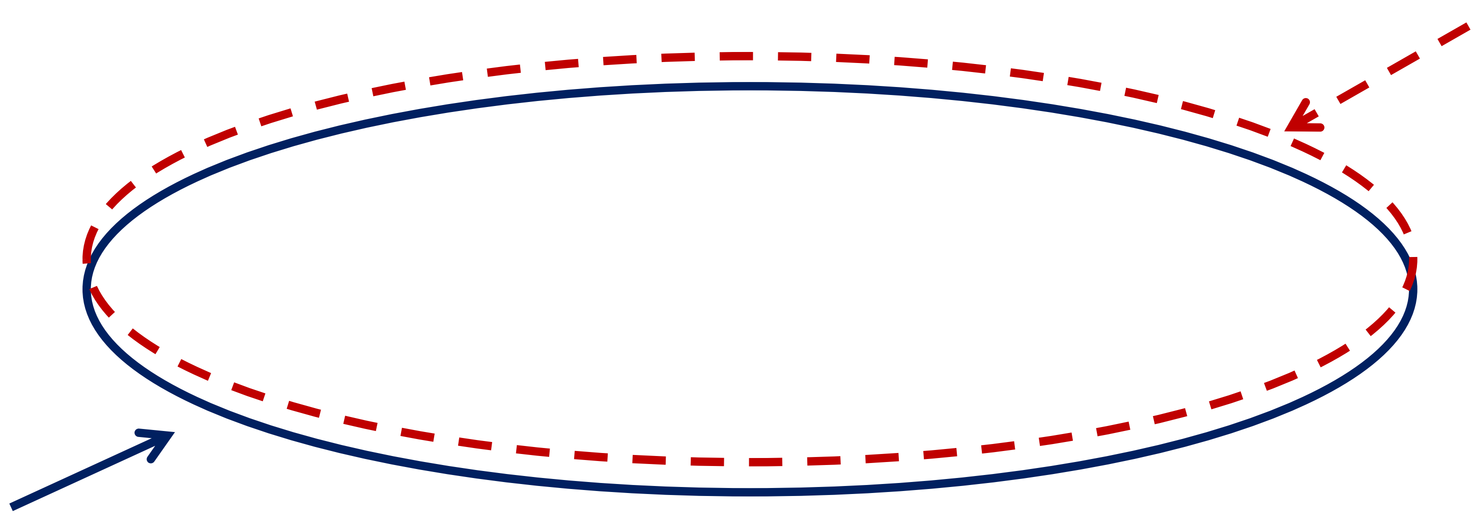
– Future colliders.

ILC in Japan





Circular. “Scale up” LEP+LHC



pp collider

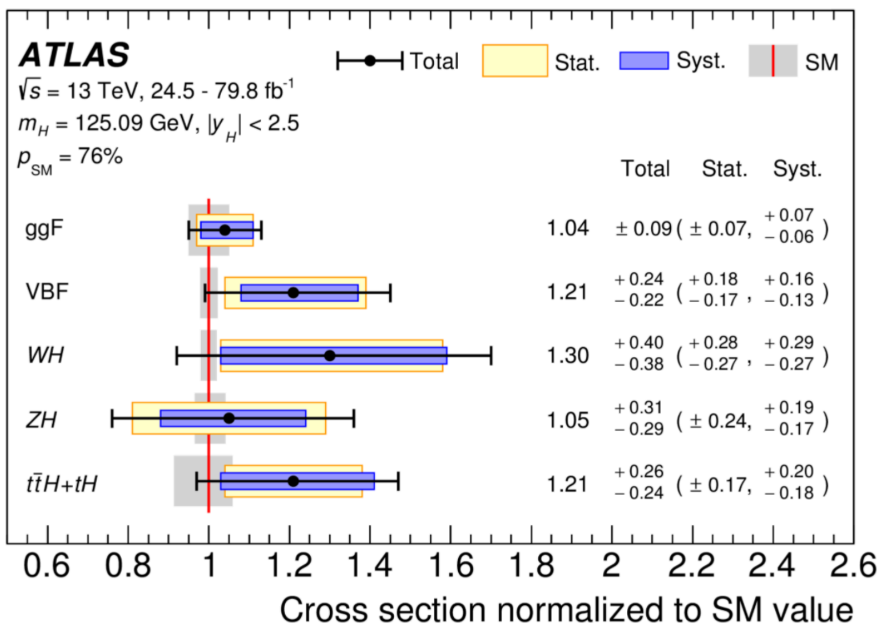
FCC-hh, SPPC

e⁻e⁺ Higgs Factory

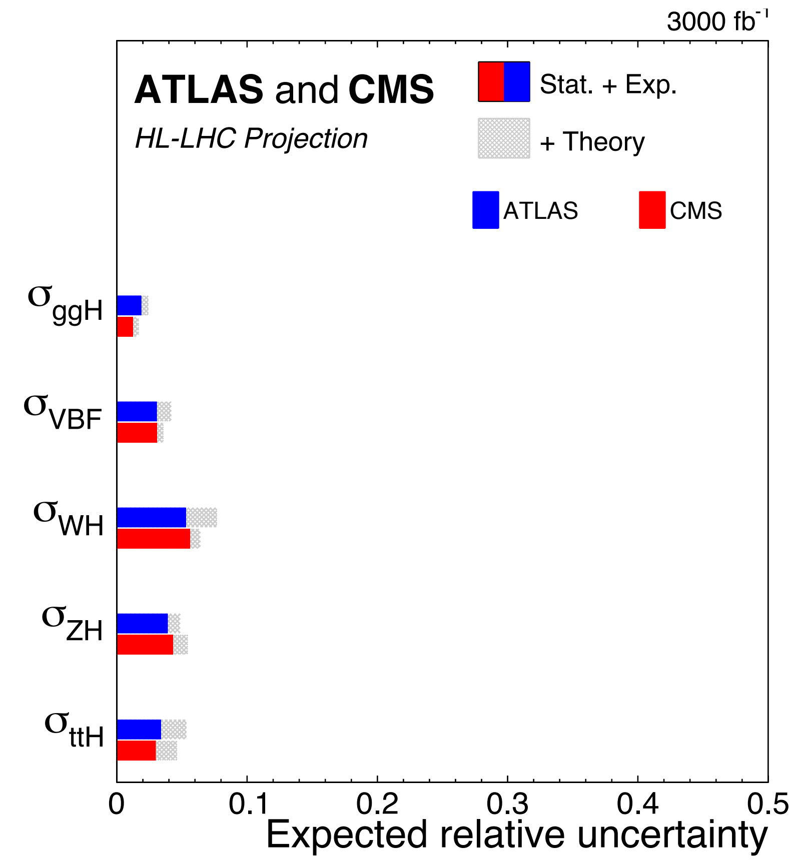
FCC-ee, CEPC

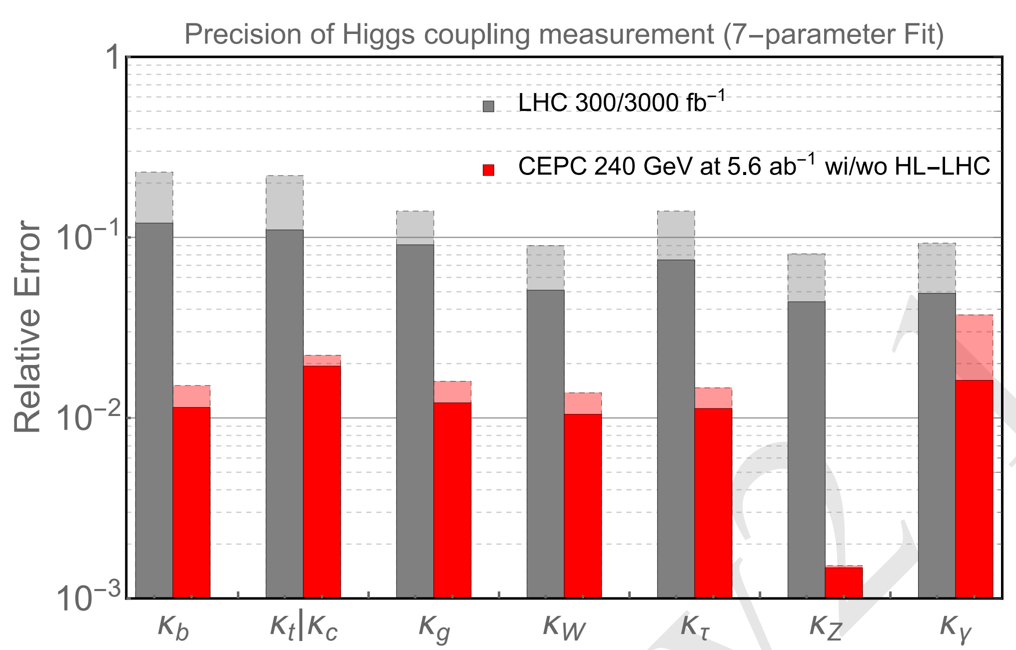
不断提高希格斯测量的精度

Current precision: 10(s)%



A few percent, end of the LHC

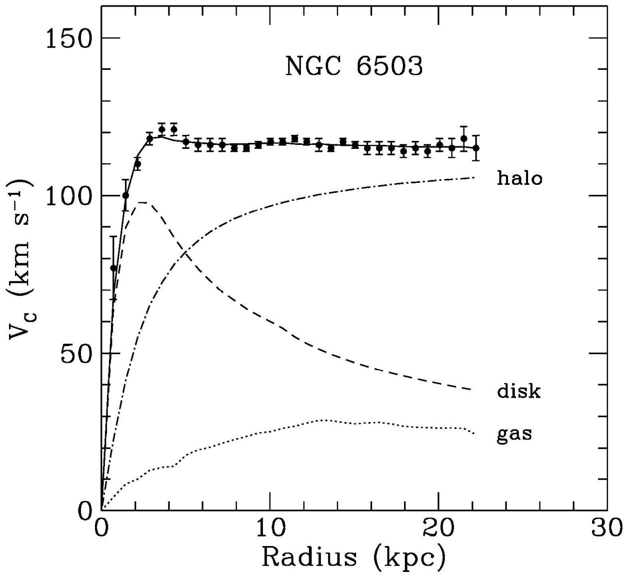


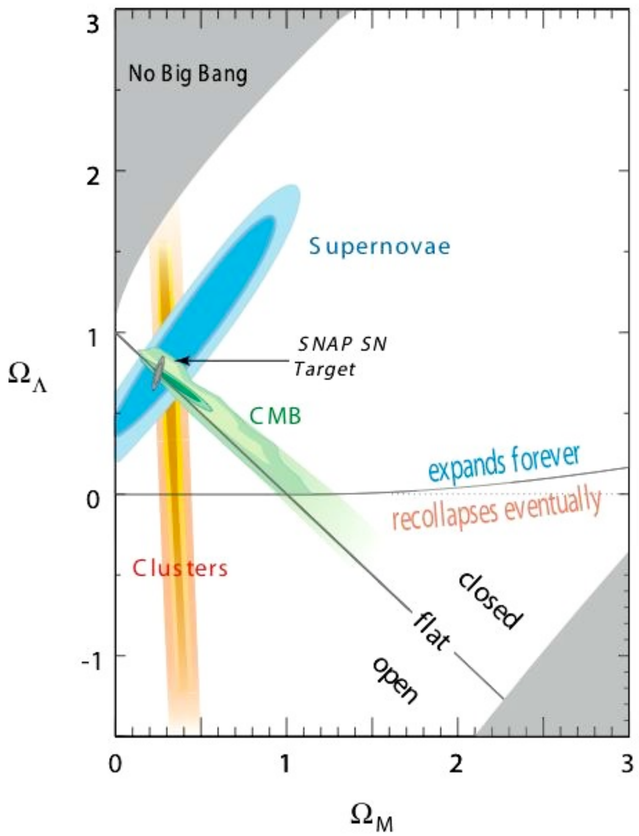


10^{-3} at $e^+ e^-$ Higgs factories 1902.00134

暗物质

大量天文观测确认暗物质的存在





但是，我们对暗物质知之甚少！

我们知道

- 暗物质是稳定的
  - 即便暗物质最终会衰变，它的寿命应该远大于宇宙的年龄$\approx 10^{17}$ sec.

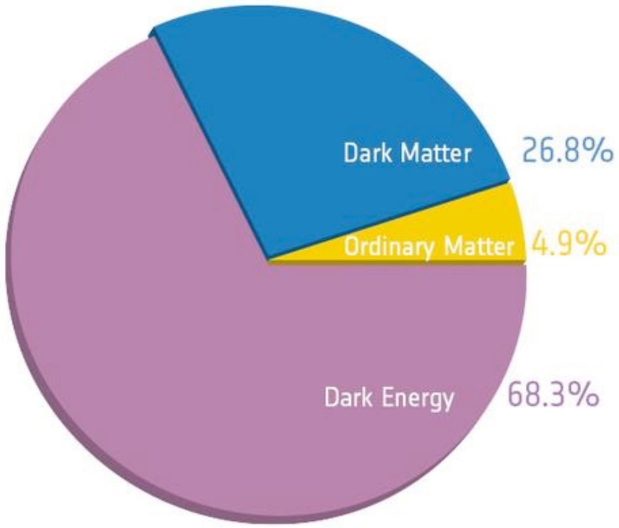
我们知道

- 暗物质是稳定的
  - 即便暗物质最终会衰变，它的寿命应该远大于宇宙的年龄≈ 10^{17} sec.

- 暗物质必须是"暗"的，不能吸收或发射光子。
  - 也就是说，不能带电荷

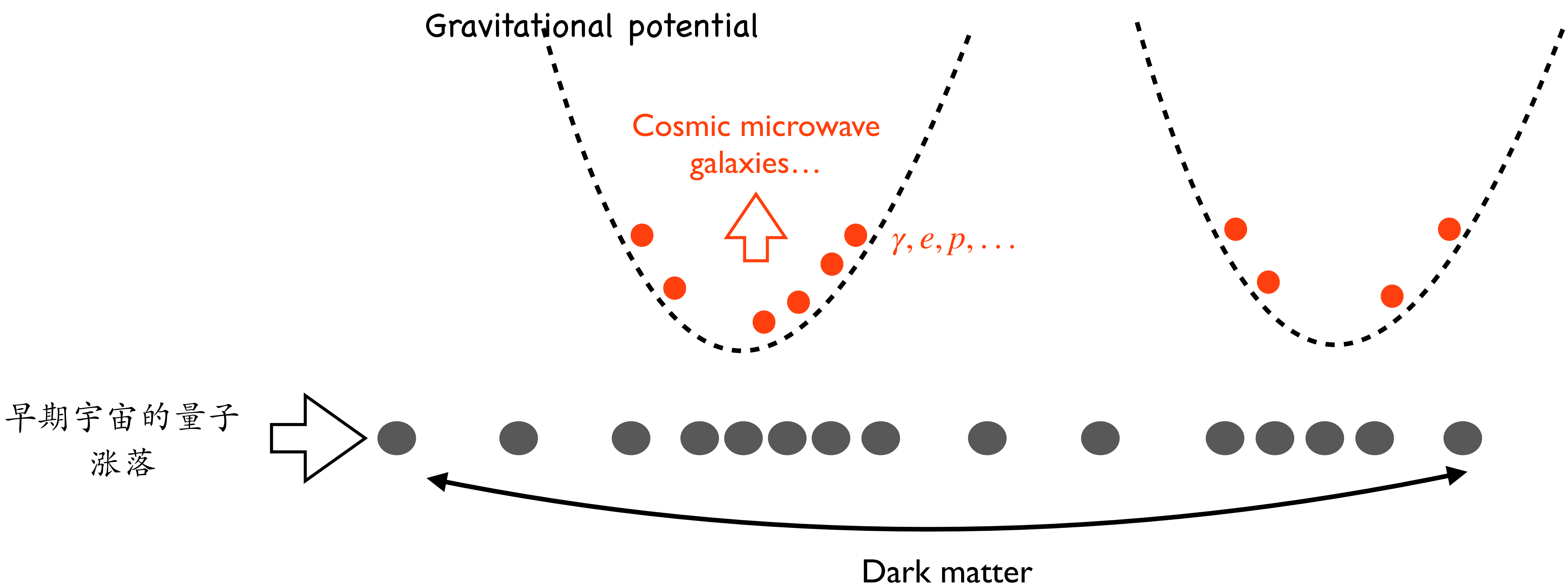
我们知道

- 暗物质是稳定的
  - 即便暗物质最终会衰变，它的寿命应该远大于宇宙的年龄≈ 10^{17} sec.
- 暗物质必须是"暗"的，不能吸收或发射光子。
  - 也就是说，不能带电荷
- 我们知道宇宙中有多少暗物质。



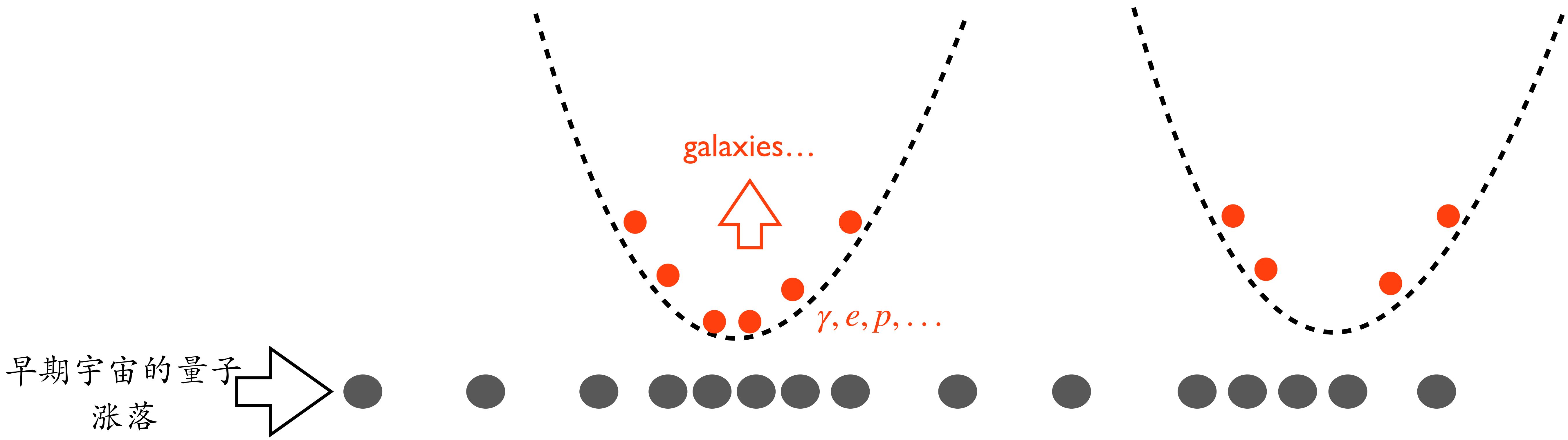
我们知道

- 暗物质是宇宙中大尺度结构的种子



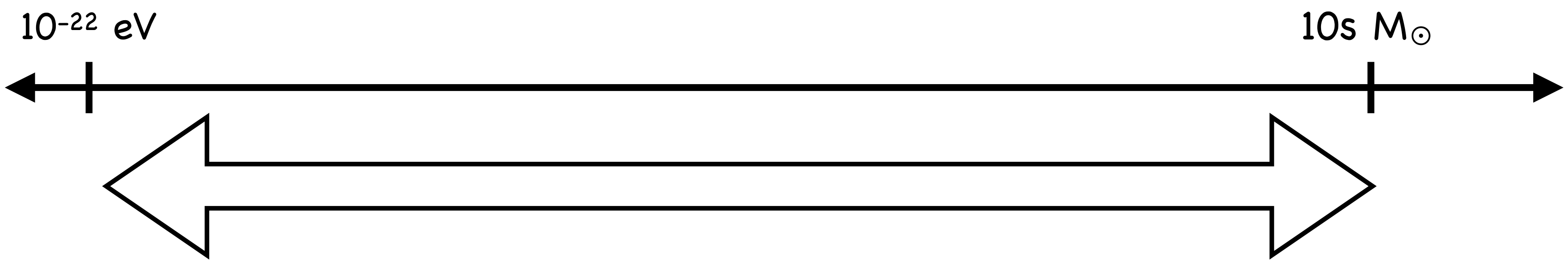
暗物质必须是"primordial"，必须在早期宇宙产生

我们知道



- "Collisionless". 除了引力之外，暗物质没有其它长程相互作用.
- Cold. 暗物质在早期宇宙必须只非相对论，动能 ≪ 质量

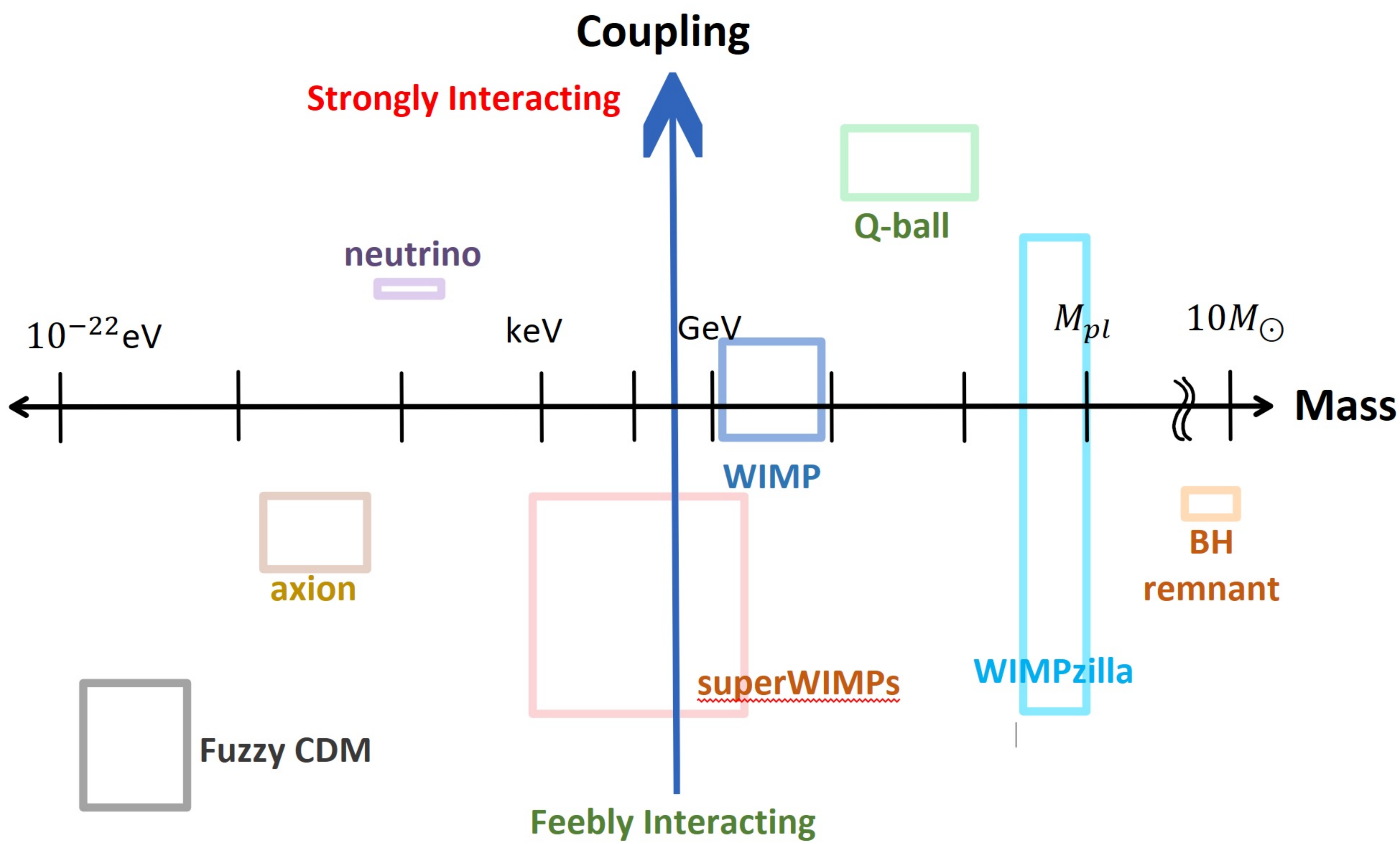
暗物质的质量范围



> 80 个数量级!

What else can we say?

除了知道它存在，其它知之甚少！

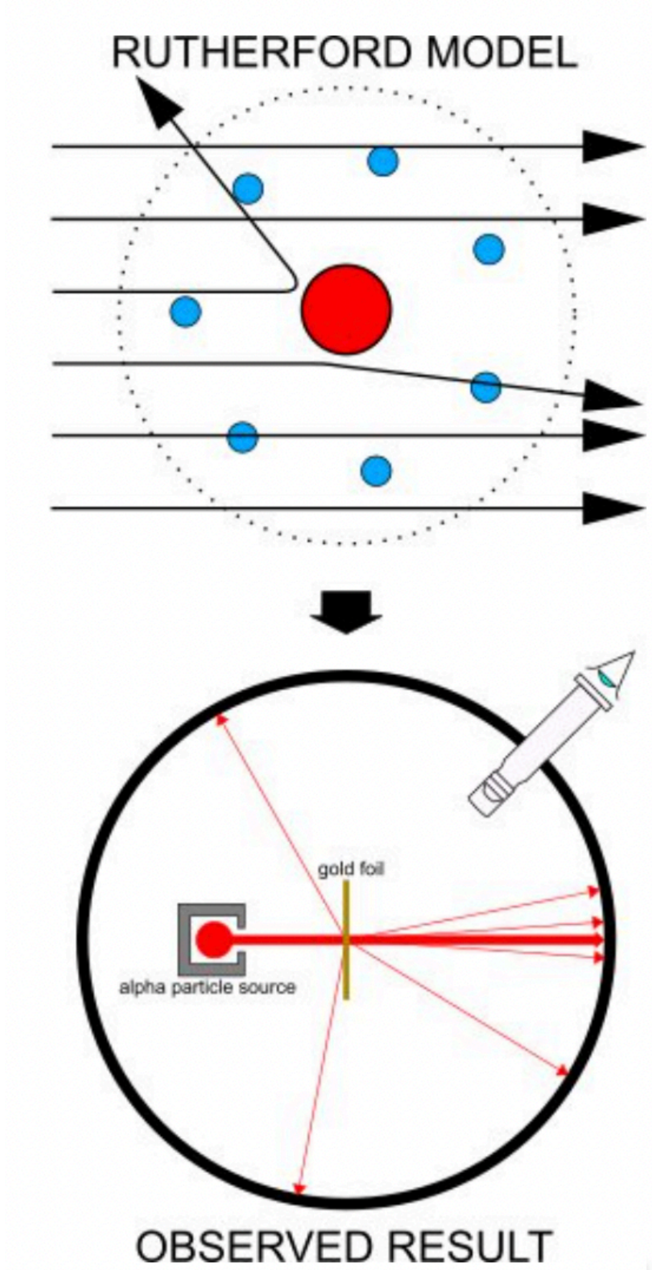


有不少猜想和模型。 下一步怎么走？

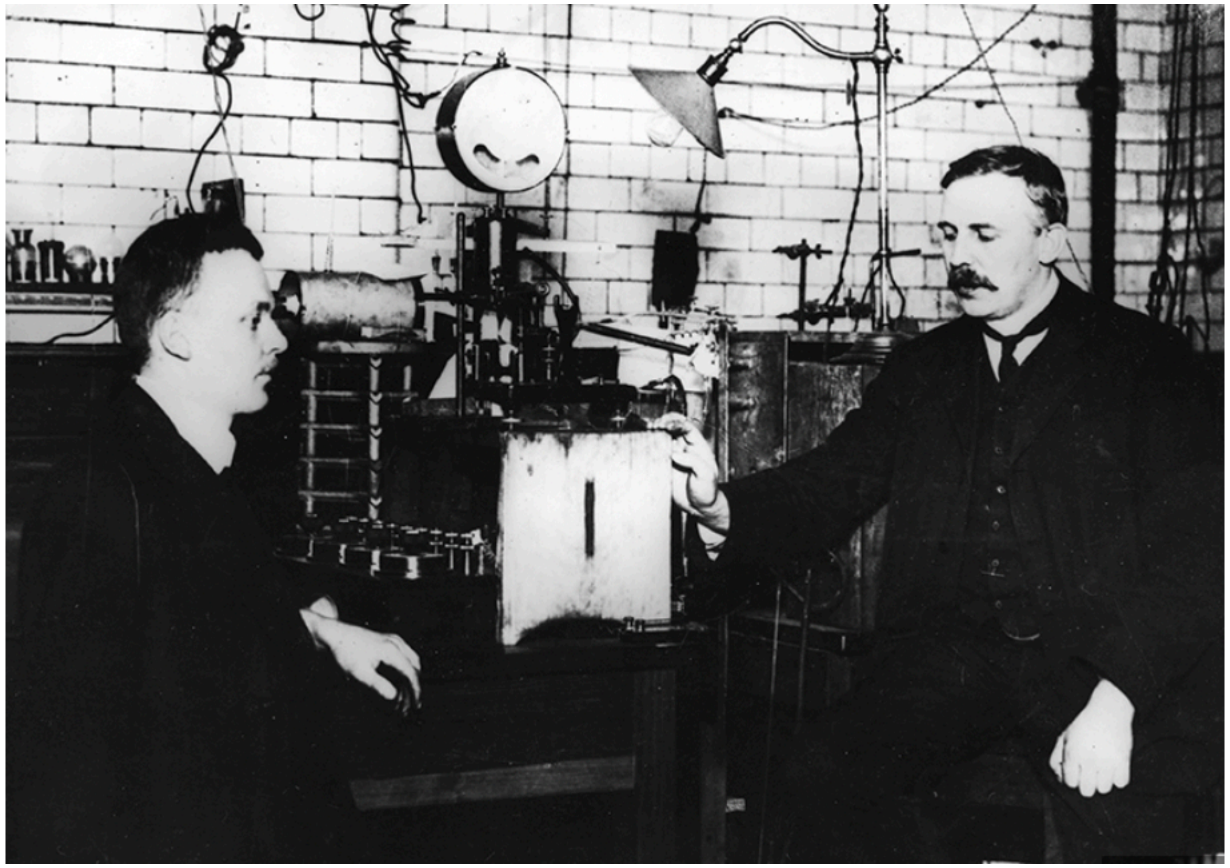
19世纪末：原子是什么？

- 大量的实验证据和理论发展，原子论已经基本为主流所接受。(Avogadro, Dalton, Faraday, Maxwell, Boltzmann...)
- 当时也有大量的原子模型
    - Unbreakable (Maxwell)
    - Pair 模型 （Jeans）
    - vortex (涡流) (Kelvin)
    - 布丁 (J. J. Thomson)
    - ...

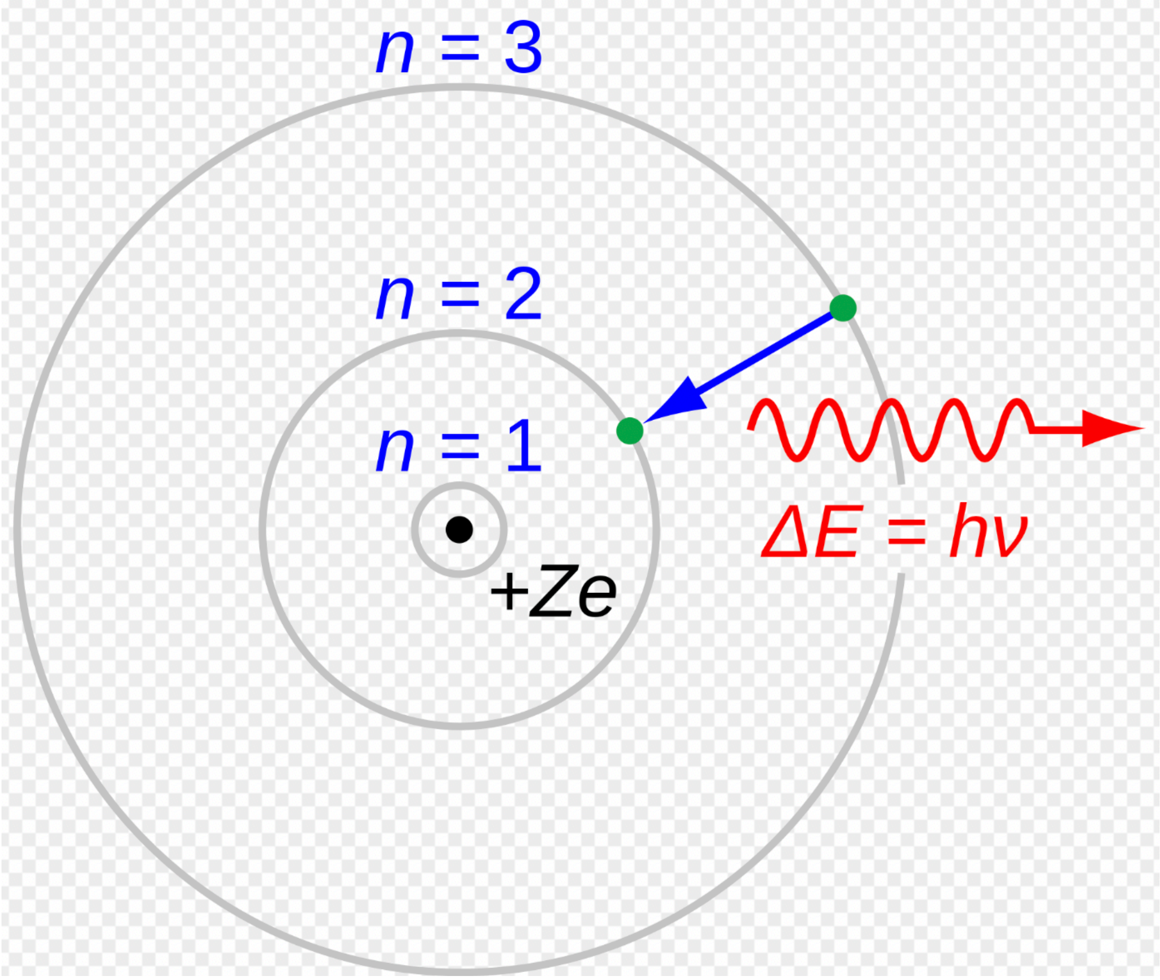
新实验⇒原子模型



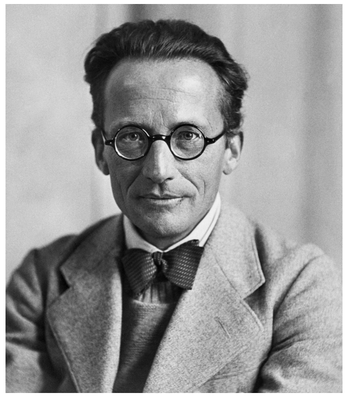
Rutherford-Geiger-Marsden, 1911



原子结构⇒量子力学



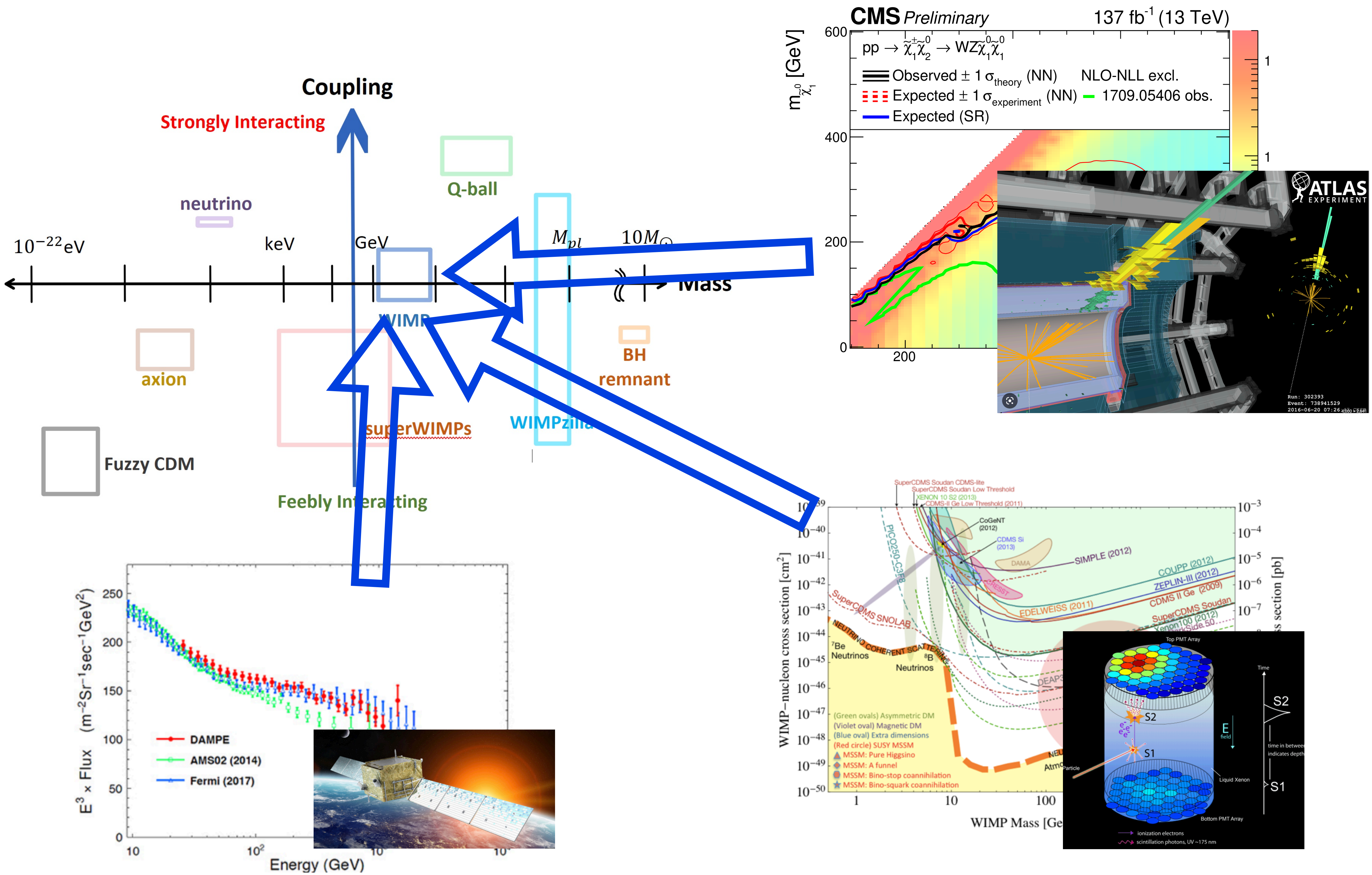
Erwin Schrodinger (1926)



Werner Heisenberg (1925)

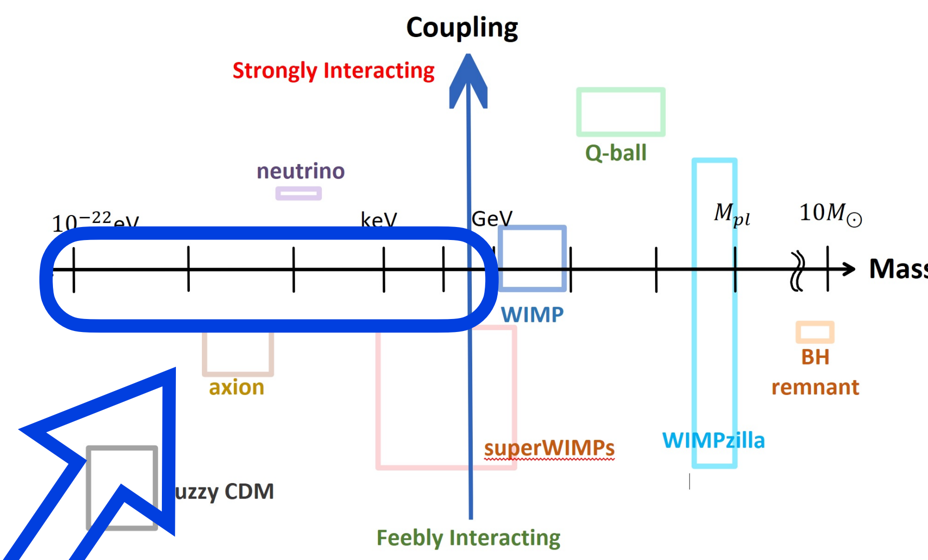
$$-\frac{\hbar^2}{2m}\frac{\partial^2\psi(x,t)}{\partial x^2}+\mathcal{V}(x,t)\psi(x,t)=i\hbar\frac{\partial\psi(x,t)}{\partial t},$$

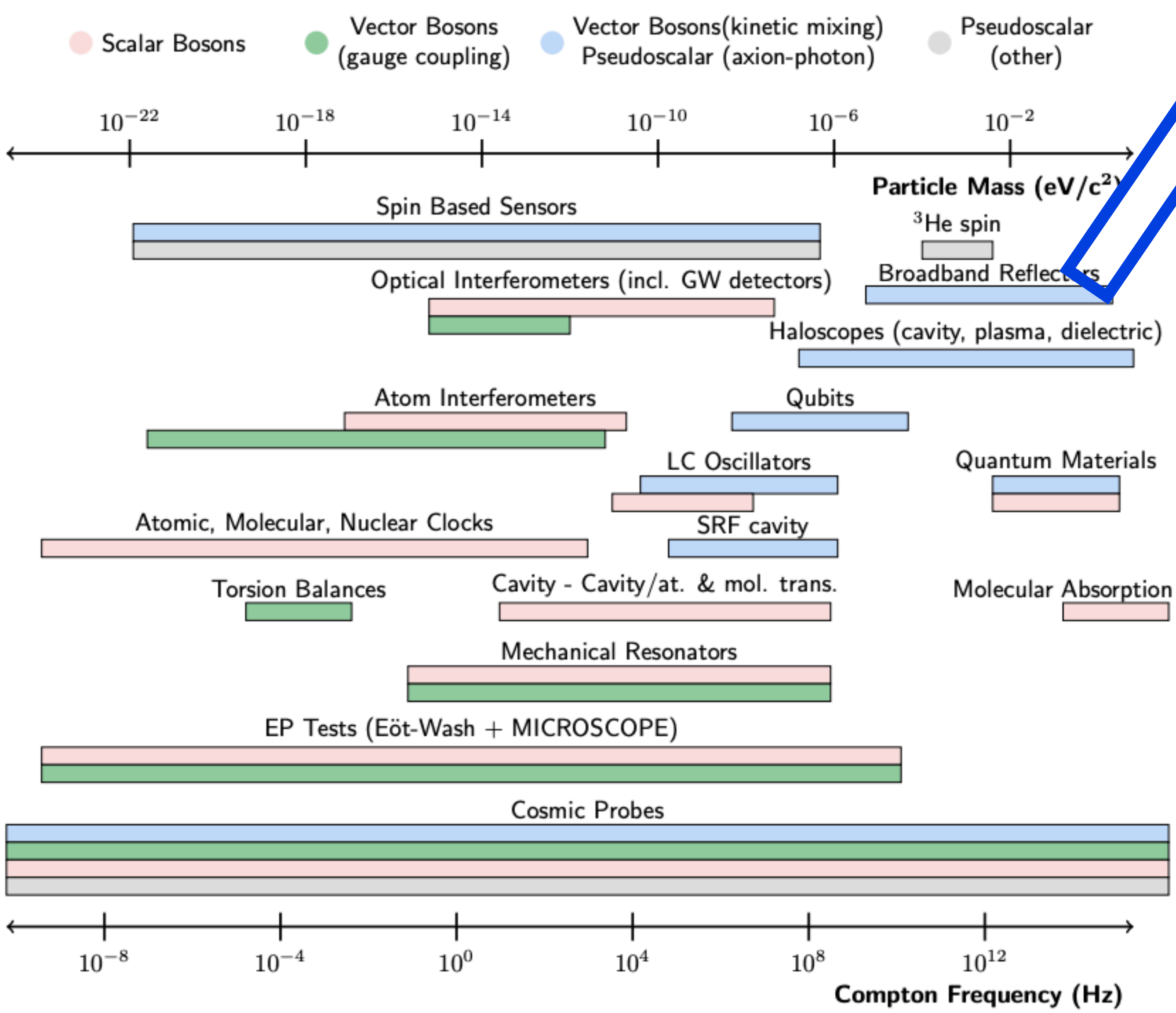
暗物质探测 (WIMP)



Coupling
Strongly Interacting
Q-ball
neutrino
10^{-22}eV
keV
GeV
M_{pl}
$10M_{\odot}$
Mass
WIMP
axion
BH
remnant
superWIMPs
WIMPzilla
Fuzzy CDM
Feebly Interacting
CMS Preliminary
137 fb^{-1} (13 TeV)
$pp \to \tilde{\chi}_1^{\pm}\tilde{\chi}_2^0 \to WZ\tilde{\chi}_1^0\tilde{\chi}_1^0$
Observed ± 1 σ_{theory} (NN)
NLO-NLL excl.
Expected ± 1 $\sigma_{experiment}$ (NN)
1709.05406 obs.
Expected (SR)
$m_{\tilde{\chi}_1^0}$ [GeV]
ATLAS EXPERIMENT
DAMPE
AMS02 (2014)
Fermi (2017)
$E^3 \times$ Flux ($m^{-2}Sr^{-1}sec^{-1}GeV^2$)
Energy (GeV)
WIMP–nucleon cross section [cm^2]
WIMP Mass
SuperCDMS SNOLAB
NEUTRINO COHERENT SCATTERING
^{7}Be Neutrinos
^{8}B Neutrinos
SIMPLE (2012)
COUPP (2012)
ZEPLIN-III (2012)
CDMS II Ge (2009)
EDELWEISS (2011)
SuperCDMS Soudan
Xenon100 (2012)
CoGeNT (2012)
DAMA
S2
S1
Liquid Xenon

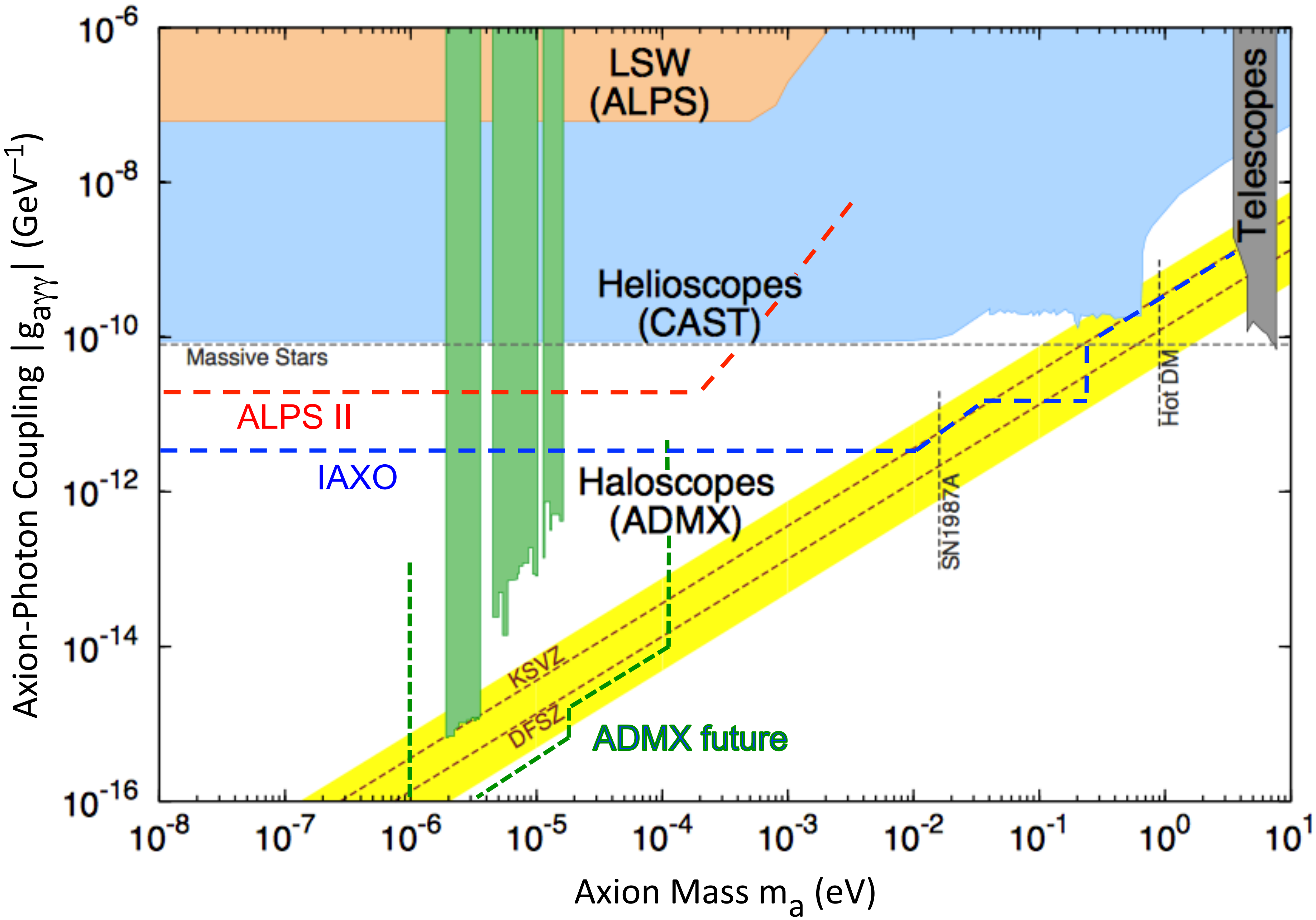
暗物质探测





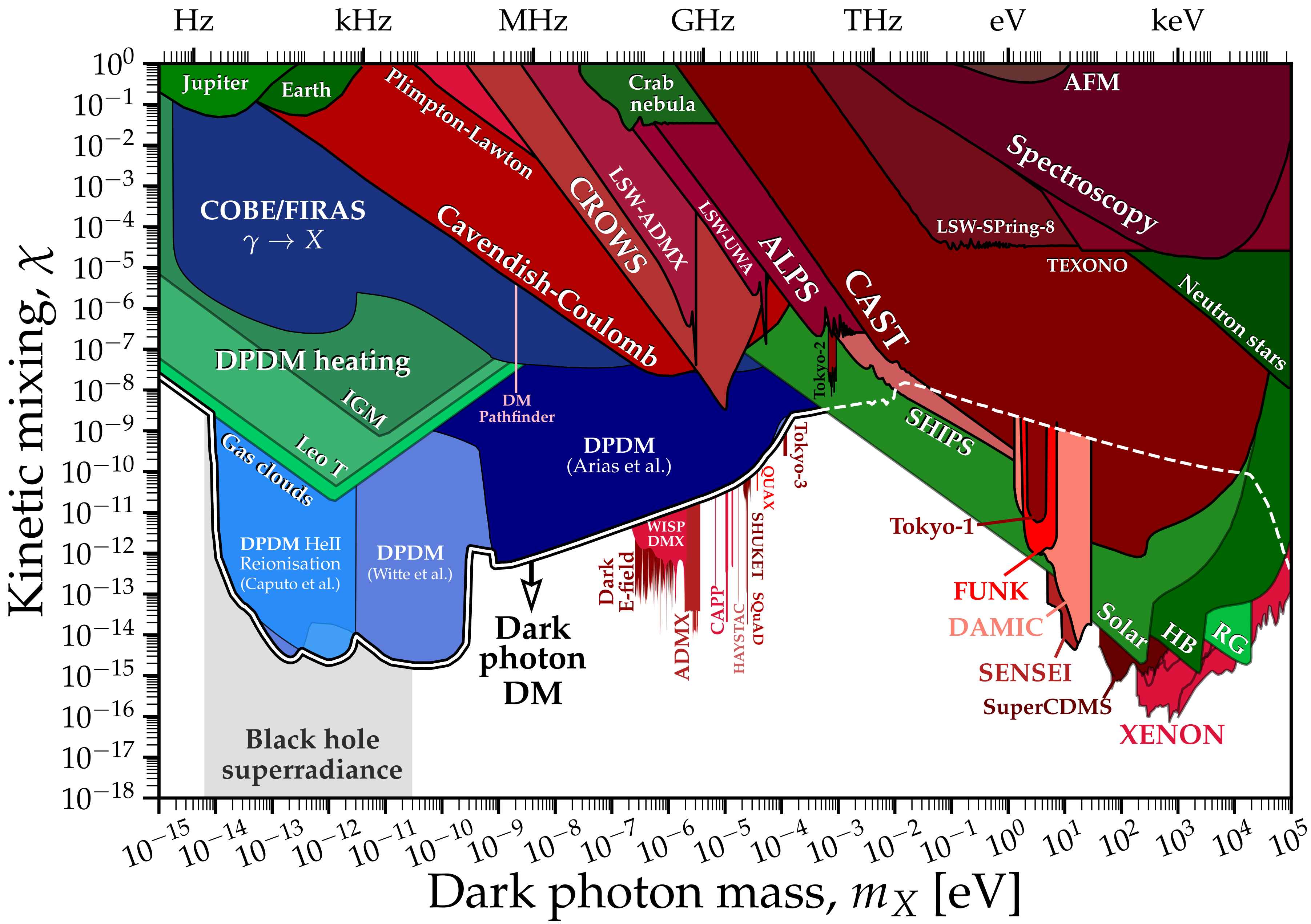
八仙过海，各显神通

暗物质探测：轴子



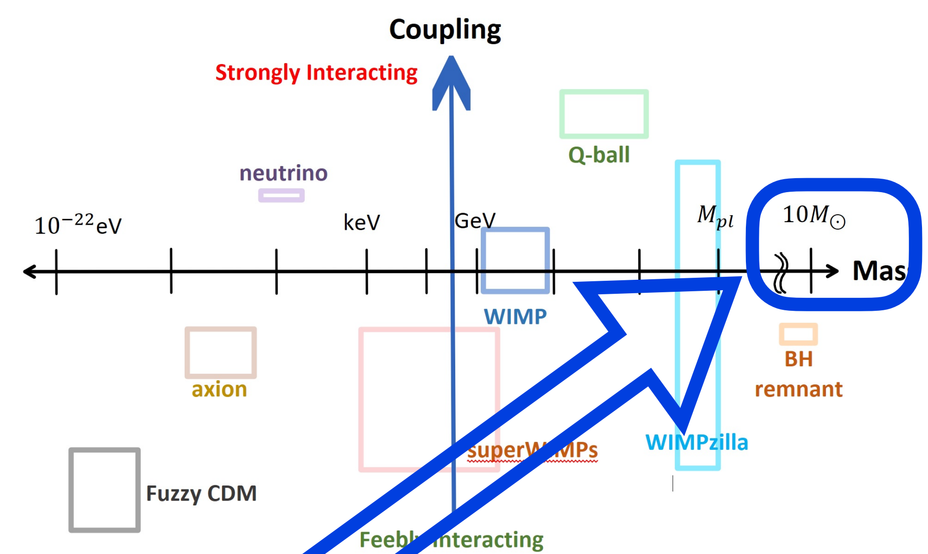
LSW
(ALPS)
Helioscopes
(CAST)
Telescopes
Massive Stars
ALPS II
IAXO
Haloscopes
(ADMX)
ADMX future
KSVZ
DFSZ
SN1987A
Hot DM
Axion-Photon Coupling $|g_{a\gamma\gamma}|$ (GeV^{-1})
Axion Mass m_a (eV)
10^{-6}
10^{-8}
10^{-10}
10^{-12}
10^{-14}
10^{-16}
10^{-8}
10^{-7}
10^{-6}
10^{-5}
10^{-4}
10^{-3}
10^{-2}
10^{-1}
10^{0}
10^{1}

暗物质探测：暗光子

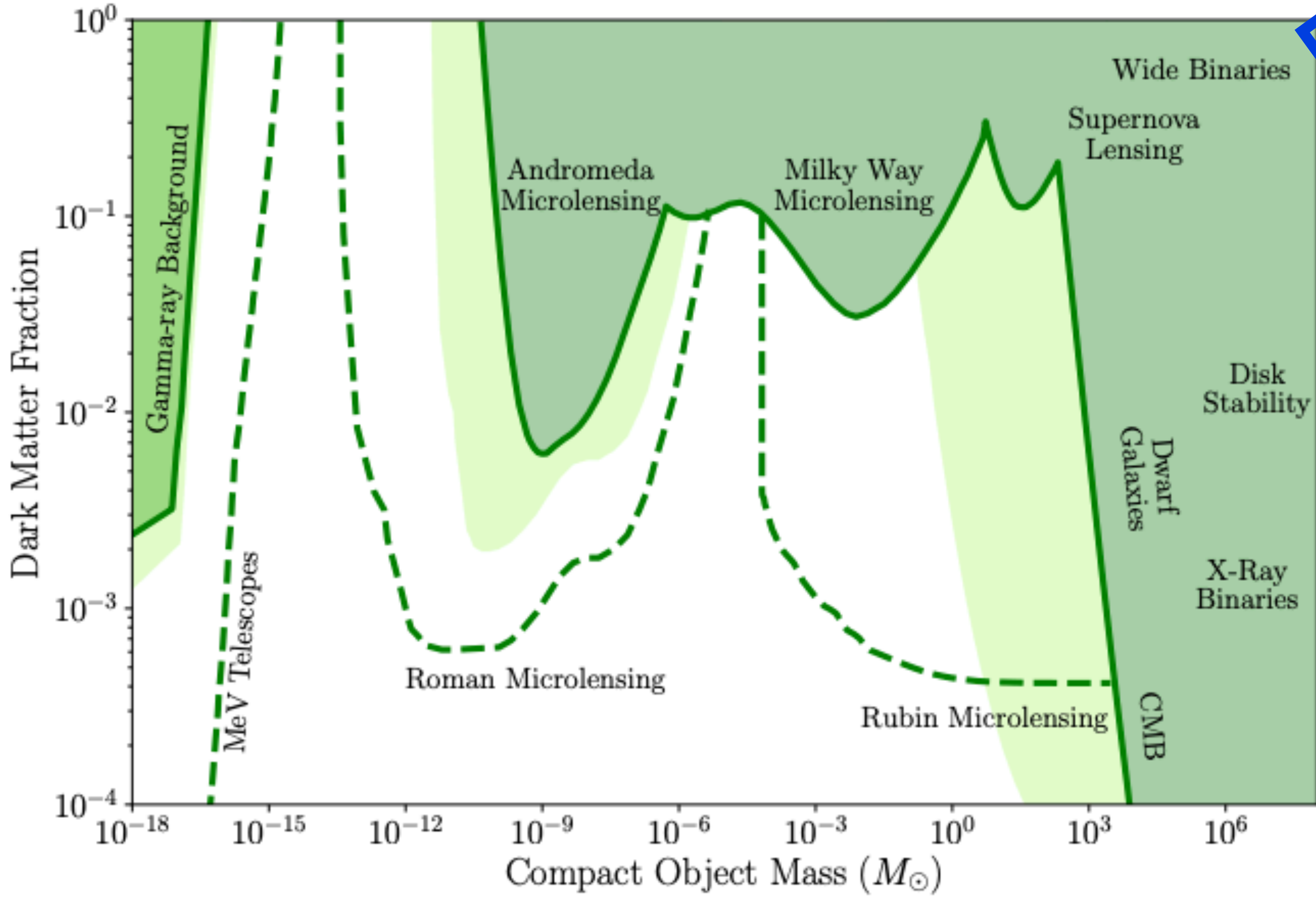


Hz
kHz
MHz
GHz
THz
eV
keV
Jupiter
Earth
Plimpton-Lawton
Crab nebula
AFM
Spectroscopy
COBE/FIRAS
$\gamma \to X$
Cavendish-Coulomb
CROWS
LSW-ADMX
LSW-UWA
ALPS
CAST
LSW-SPring-8
TEXONO
Neutron stars
DPDM heating
IGM
Leo T
Gas clouds
DM Pathfinder
DPDM (Arias et al.)
Tokyo-2
Tokyo-3
SHIPS
Tokyo-1
FUNK
DAMIC
SENSEI
SuperCDMS
XENON
Solar
HB
RG
DPDM HeII Reionisation (Caputo et al.)
DPDM (Witte et al.)
Dark photon DM
WISP DMX
Dark E-field
ADMX
CAPP
HAYSTAC
SHUKET
SQuAD
QUAX
Black hole superradiance
Kinetic mixing, χ
Dark photon mass, m_X [eV]

暗物质探测

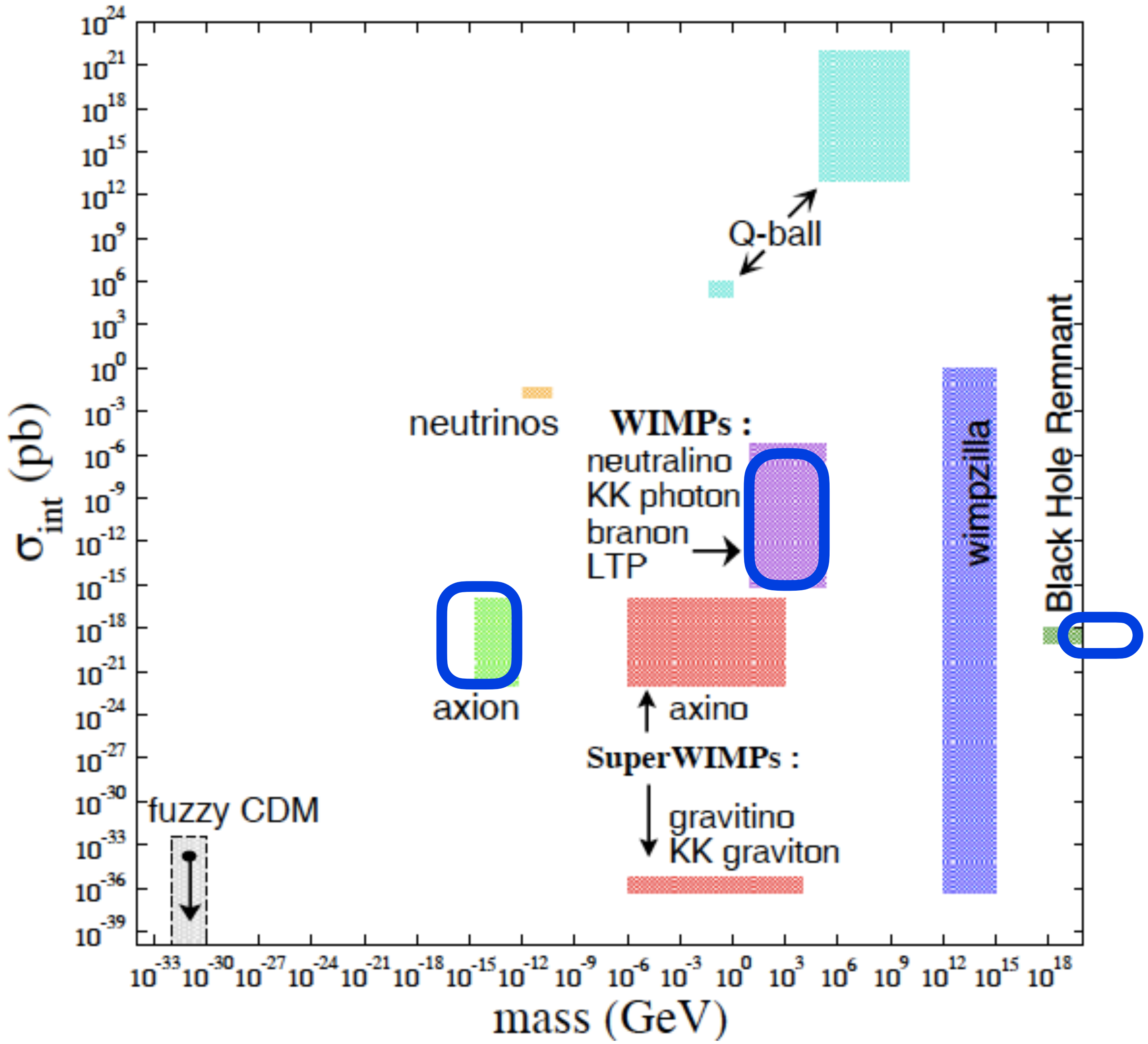


Coupling
Strongly Interacting
Q-ball
neutrino
10^{-22}eV
keV
GeV
M_{pl}
$10M_\odot$
WIMP
axion
BH
remnant
WIMPzilla
Fuzzy CDM



10^0
10^{-1}
10^{-2}
10^{-3}
10^{-4}
Dark Matter Fraction
Gamma-ray Background
MeV Telescopes
Andromeda Microlensing
Milky Way Microlensing
Supernova Lensing
Wide Binaries
Disk Stability
Dwarf Galaxies
X-Ray Binaries
CMB
Roman Microlensing
Rubin Microlensing
10^{-18}
10^{-15}
10^{-12}
10^{-9}
10^{-6}
10^{-3}
10^{0}
10^{3}
10^{6}
Compact Object Mass ($M_\odot$)

暗物质探测



还有大量的空白，任重道远！

路在何方？

- 进一步的实验结果会给出更多的信息，指明方向。
  - 类似一个多世纪前，量子力学的前夜。
- 我们已经有了需要的数据，需要一个新的视角。
  - 就像相对论诞生前夜，Michelson-Morley实验没有找到以太。
- 还是两者兼有？

路在何方？

- 当然，我们不知道下一个突破会从哪里来。
- 但是，和一个多世纪前类似，我们面临着一系列需要解决的问题。
- 我们也有一系列的实验和理论上探索的方向。
- 未来大有可期！

A lot to look forward to...