如何观测微观世界

张云龙

近代物理系，粒子物理与原子核物理

近代物理进展讲座

11/17/2026

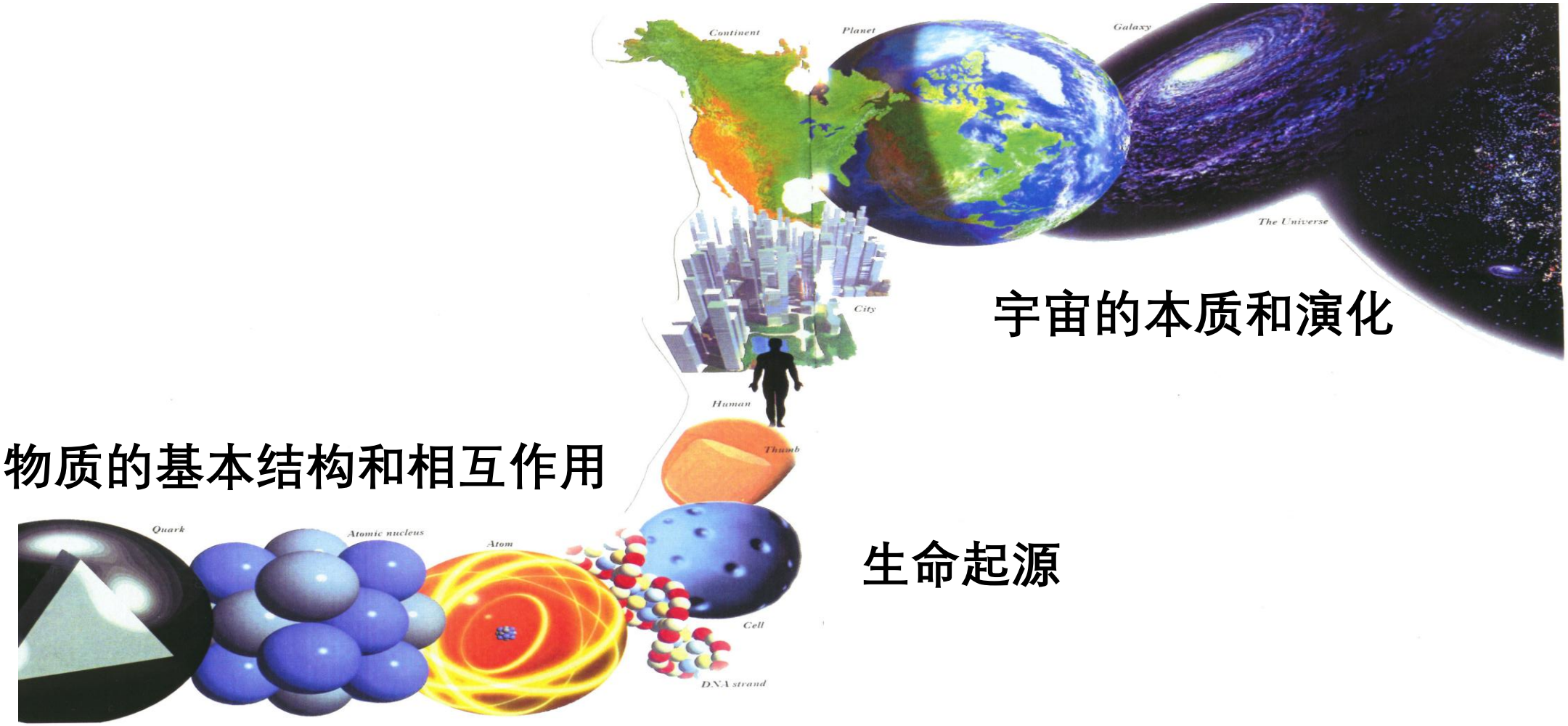


提纲

- 粒子物理实验
- 粒子与物质作用
- 几种基本的粒子探测技术
  - 闪烁探测器
  - 气体探测器
  - 半导体探测器
  - 量热器



从无穷大到无穷小

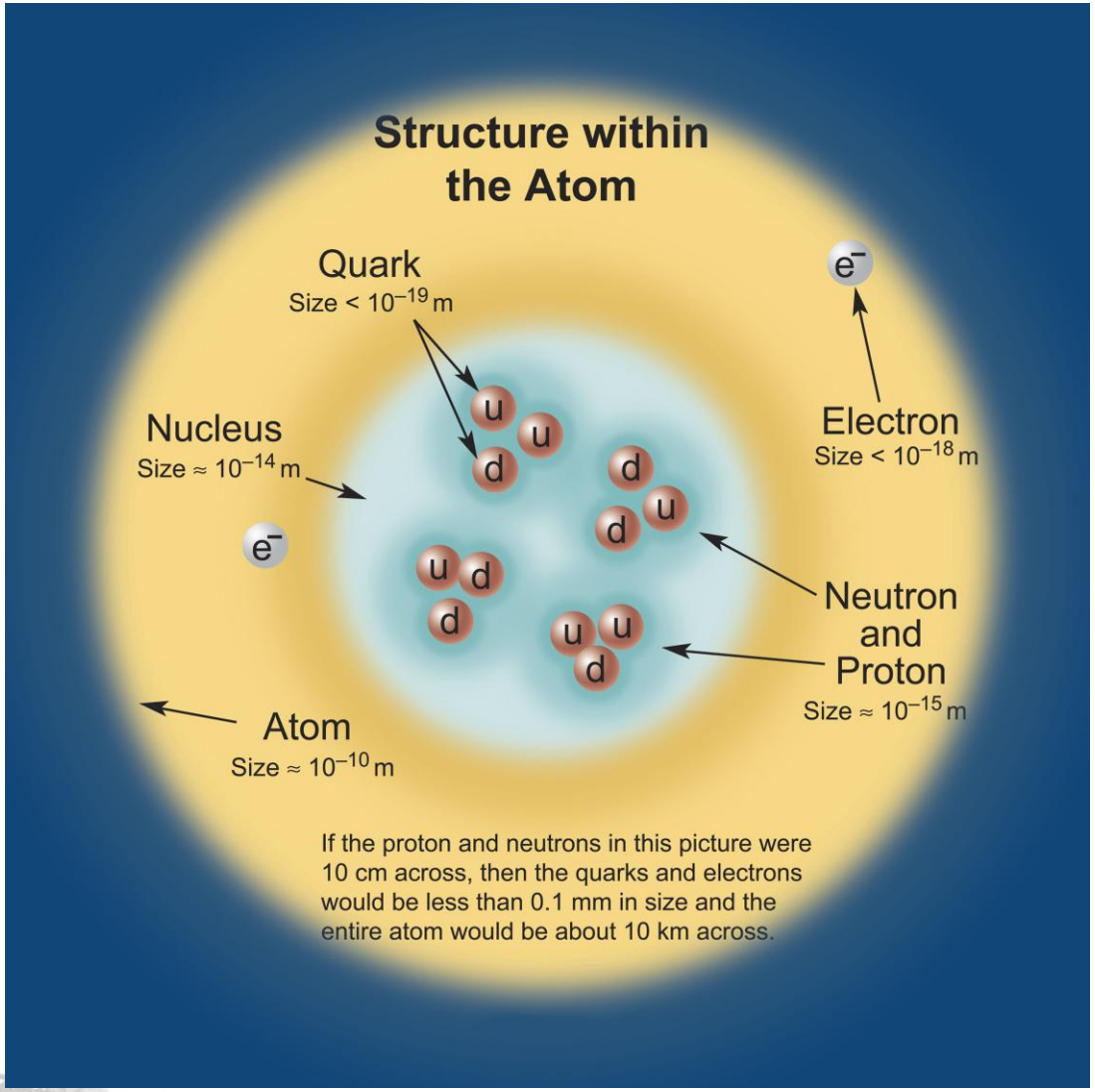


宇宙的本质和演化

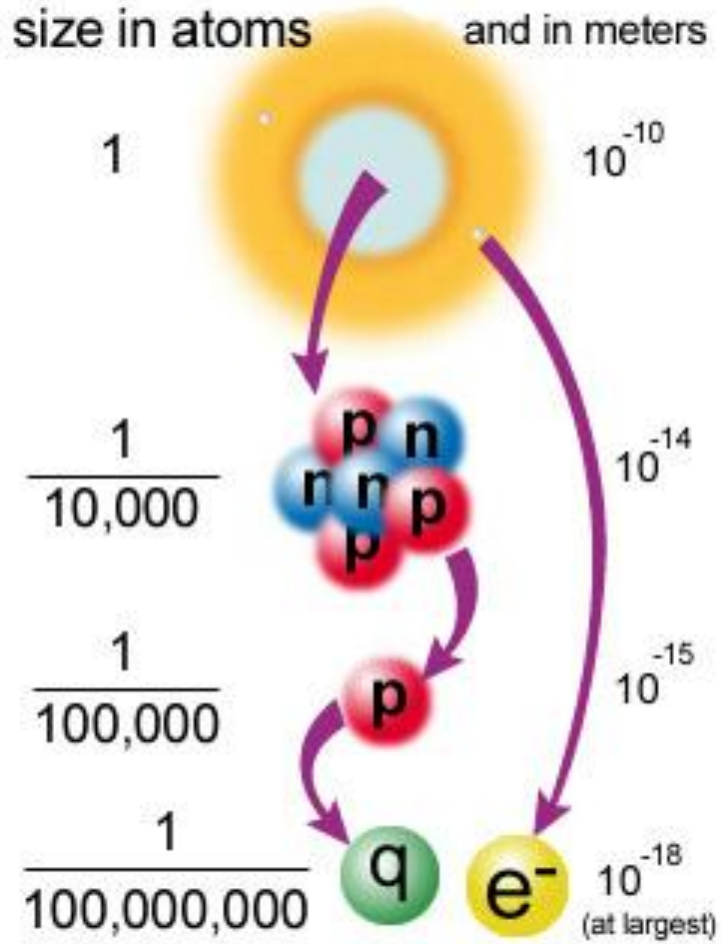
物质的基本结构和相互作用

生命起源

微观对象的尺寸



Human hair: $(40–120)\times10^{-6}$ m



粒子物理实验

- 粒子物理，研究构成物质的基本组元以及它们之间的相互作用的学科。
- 是一门基于实验的基础前沿物理学科。
- 粒子物理实验依靠自然产生和存在的高能射线，或者利用人工加速获得的高能粒子，研究物质中比原子核更深层次的结构和性质。

$$\lambda = h/p$$



探索深层次的结构(小λ)，我们需要高的能量(高p)

构成世界的基本粒子

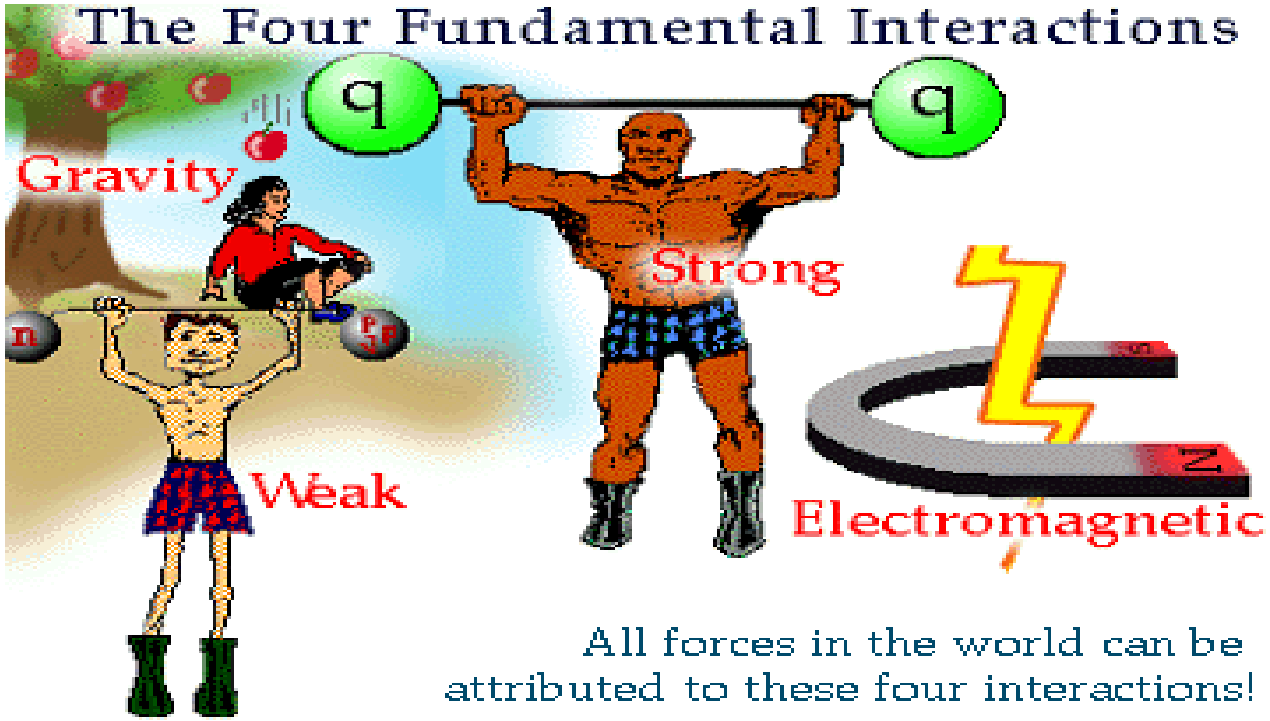
上夸克，	粲夸克，	顶夸克
下夸克，	奇异夸克，	底夸克
电子，	缪子，	陶子
电子中微子，	缪子中微子，	陶子中微子
光子，	胶子，	W/Z玻色子
希格斯粒子		



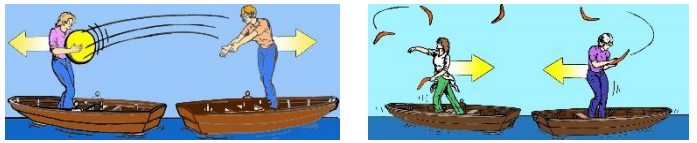
- 夸克和轻子构成了我们的现实世界，称之为“物质”粒子，自旋1/2，为费米子。
- 传播相互作用的粒子通常称之为媒介子或场粒子，自旋为1，为玻色子(目前引力还未能被纳入粒子物理标准模型理论中）。
- 希格斯粒子是目前唯一自旋为0的基本粒子，基本粒子通过希格斯机制获得了质量。

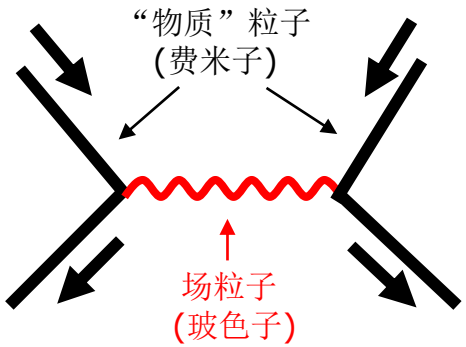
基本粒子之间的相互作用

四种基本相互作用



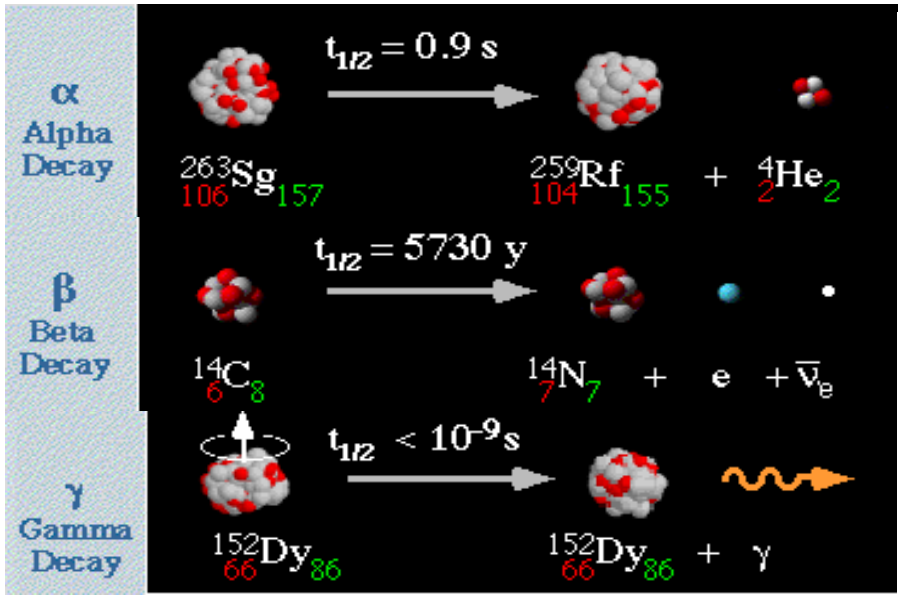
相互作用的进行



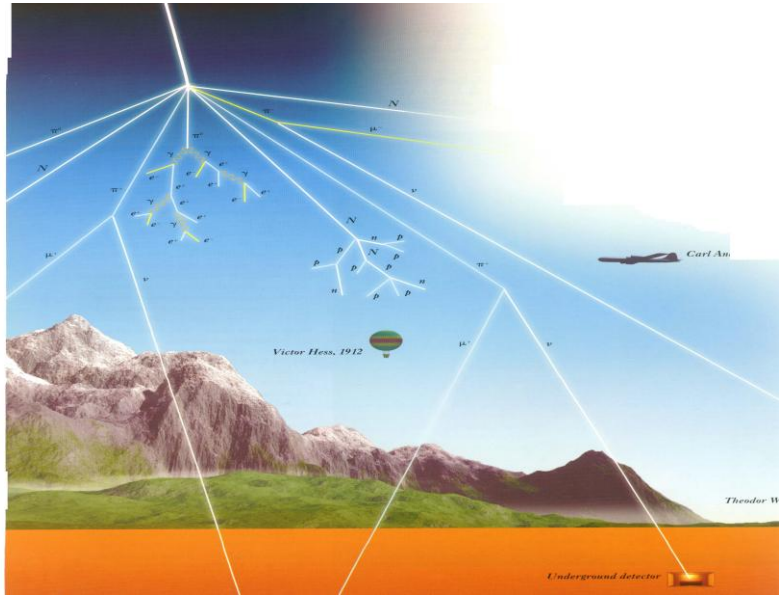




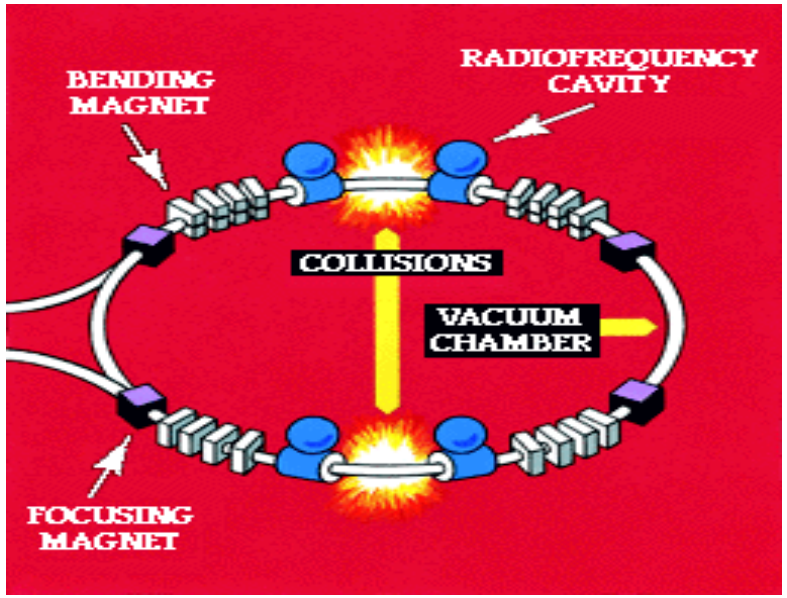
如何开展实验研究



放射源



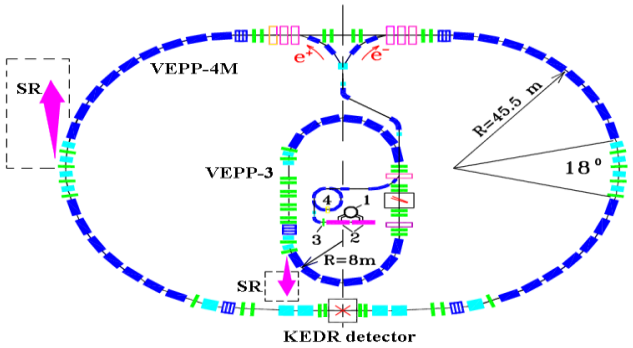
宇宙线



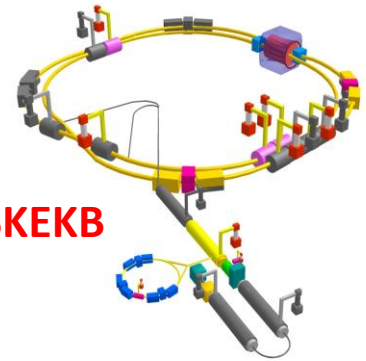
加速器



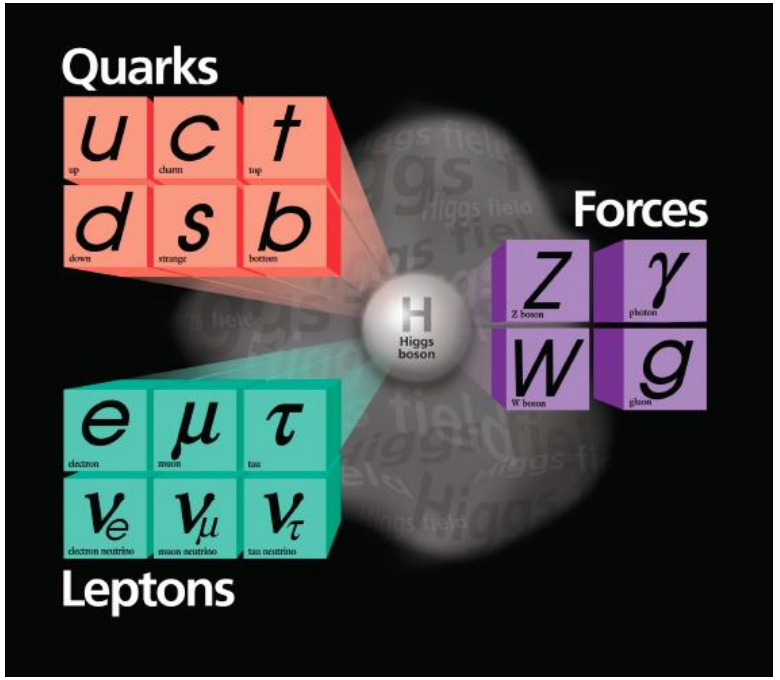
大型粒子物理实验装置

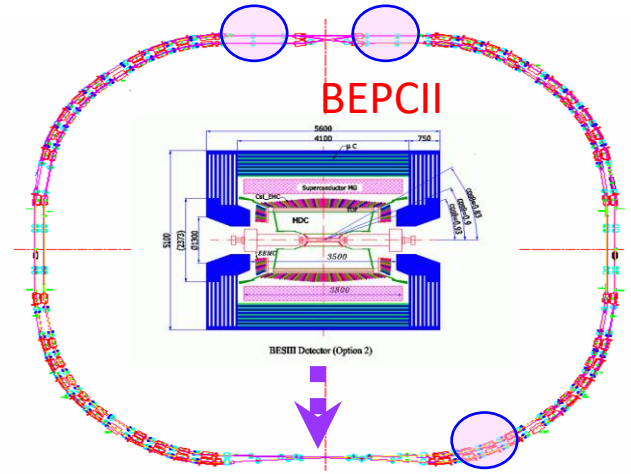


Injector:
1 - Girokon (430 MHz)
2 - Linac (50 MeV)
3 - Electron to positron converter
4 - Synchrotron B-4 (350 MeV)

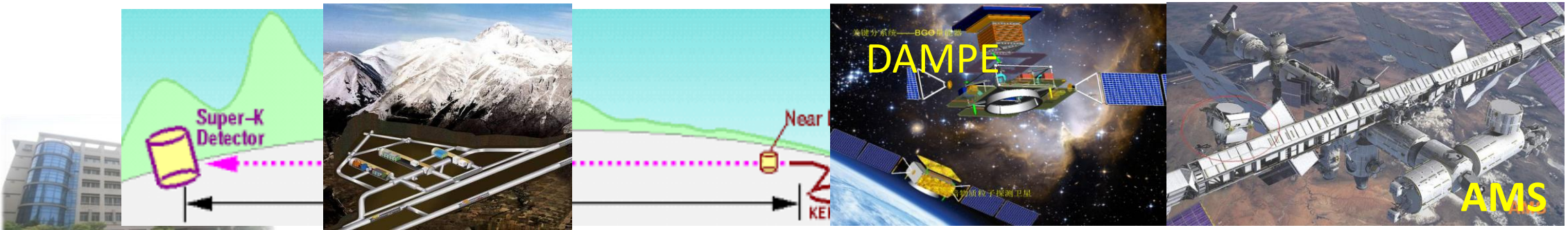


SKEKB

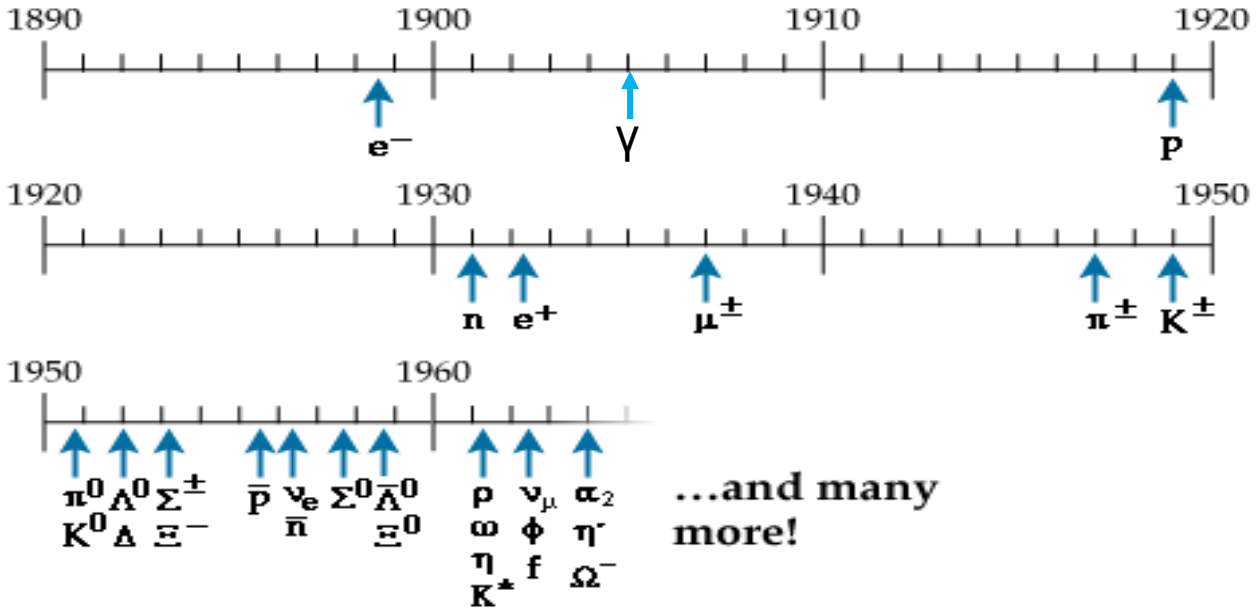








粒子发现史



…and many more!

By 1959: 20 particles

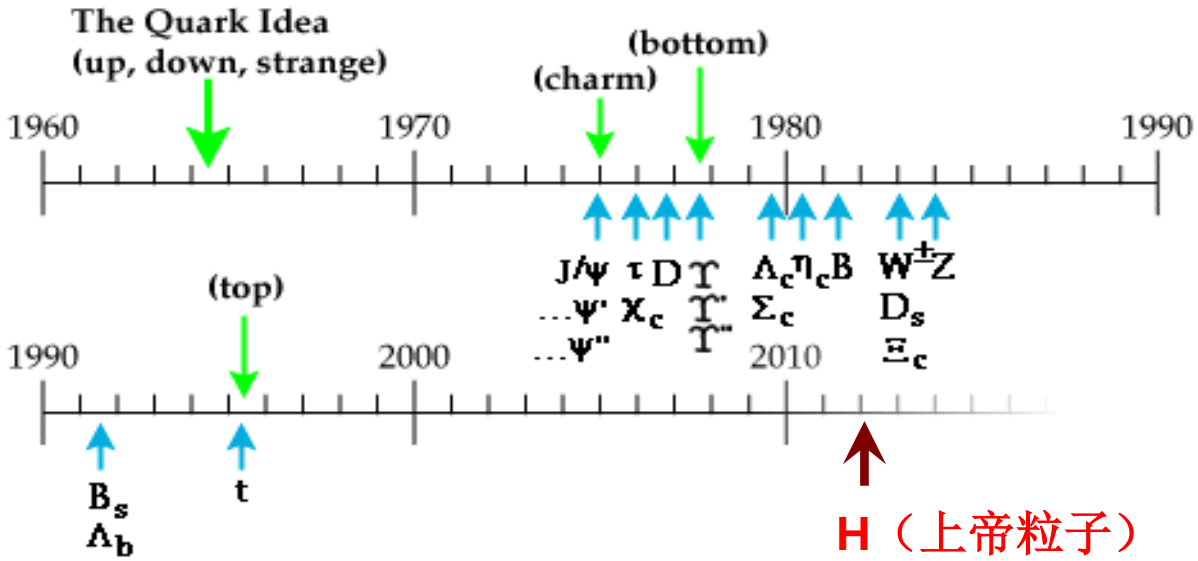
e⁻ : fluorescent screen
n : ionization chamber

7 Cloud Chamber:
e^+
μ^+, μ^-
K^0
Λ^0
Ξ^-
Σ^-

6 Nuclear Emulsion:
π^+, π^-
anti-Λ^0
Σ^+
K^+, K^-

2 Bubble Chamber:
Ξ^0
Σ^0

3 with Electronic techniques:
anti-n
anti-p
π^0





基本粒子探索和诺贝尔奖


Takaaki Kajita

2015


Arthur B. McDonald


Raymond Davis Jr.


2002
Masatoshi Koshiba


Riccardo Giacconi


2013
Francois Englert Peter W. Higgs


1949
Hideki Yukawa

1969


Murray Gell-Mann

1979


Sheldon Glashow


Abdus Salam

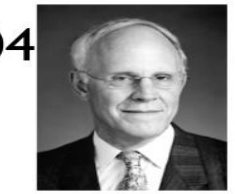

Steven Weinberg

1999


Gerard 't Hooft


Martinus Veltman

2004

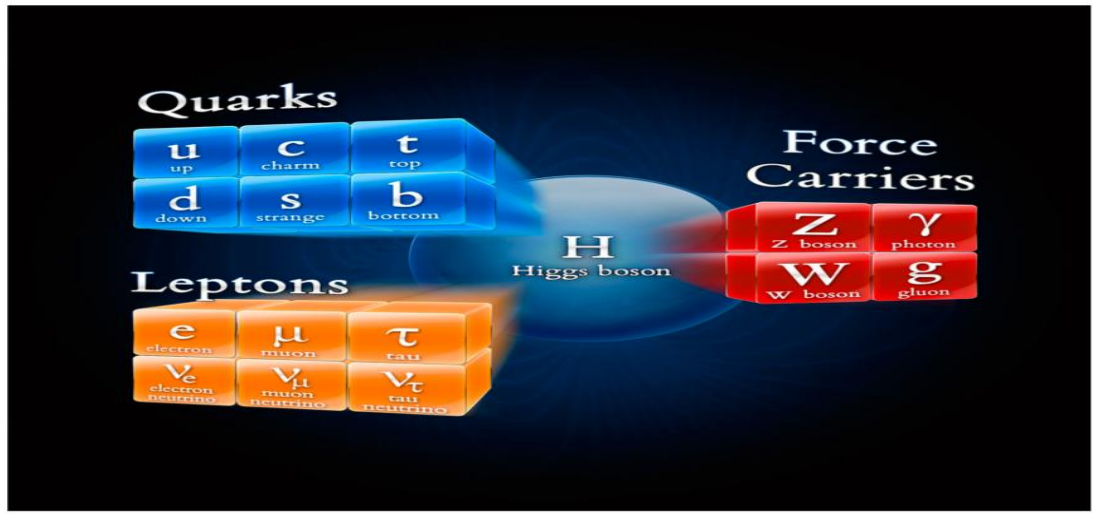

David Gross


David Politzer


Frank Wilczek

1988


Leon M. Lederman Melvin Schwartz Jack Steinberger



1965


Sin-Itiro Tomonaga


Julian Schwinger


Richard P. Feynman

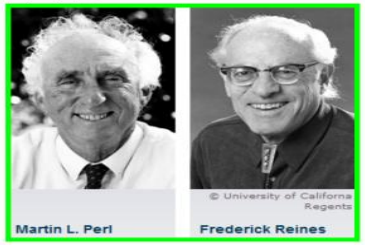
1976


Burt Richter Sam Ting

1984


Carlo Rubbia Simon van der Meer

1995



Martin L. Perl Frederick Reines

1906


Joseph John Thomson

1936


Carl David Anderson

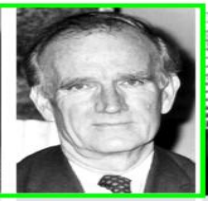
1957


Chen Ning Yang


Tsung-Dao Lee

1980


James Watson Cronin


Val Logsdon Fitch

2008



Yoichiro Nambu



Makoto Kobayashi



Toshihide Maskawa

也是探测技术的发展史

一 获诺奖的探测器大师



C. T. R. Wilson 发明通过蒸气凝结观察带电粒子径迹的方法和技术-云室（1927年）



P. M. S. Blackett 发展云室技术，在核物理与宇宙线研究中做出突出贡献（1948年）



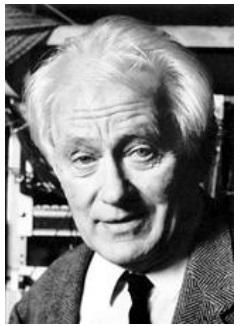
C. F. Powell 发明乳胶成像技术，在宇宙线中发现π介子（1950年）



D. A. Glaser 发明气泡室（1960年）



L. W. Alvarez 发展氢气泡室及数据处理技术，发现大量共振态（1968年）



G. Charpak 发明多丝正比室并发展气体丝室技术（1992年）



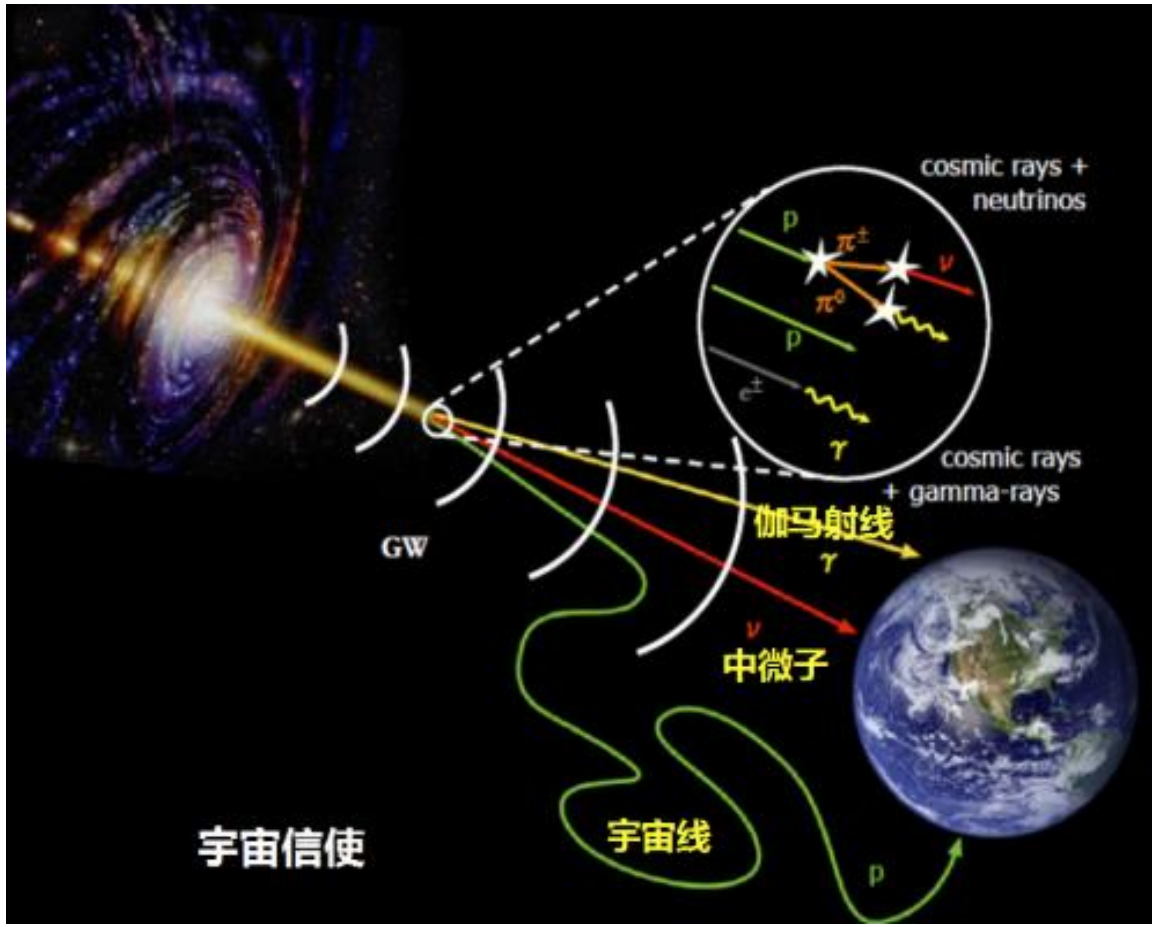
粒子探测

- **什么是粒子？**
  - 答案各异，取决于你问谁。对于粒子探测而言，粒子是指自然界中或人工实验中各类反应产生的各种末态粒子和辐射，例如：α粒子、电子、X和γ射线、质子、中子、μ子、π介子、K介子、重离子等。
- **什么是粒子探测？**
  - 通过粒子与物质的相互作用，测量粒子的各种特征和属性（径迹、能量、动量、电荷、质量…）进而识别粒子。
- **粒子探测器**
  - 用于粒子探测的仪器或设备（能够把粒子与物质发生的相互作用转换为一定的信息载体）
- **谱仪**
  - 由多个具有不同功能的探测器组成的粒子探测系统



粒子探测


你要到哪里去?
你从哪儿来?
你是谁?
三大哲学终极问题
门房大爷的
门房


cosmic rays + neutrinos
cosmic rays + gamma-rays
GW
伽马射线
中微子
宇宙信使
宇宙线



如何探测粒子？

1. 前提是粒子与物质（探测器）发生作用

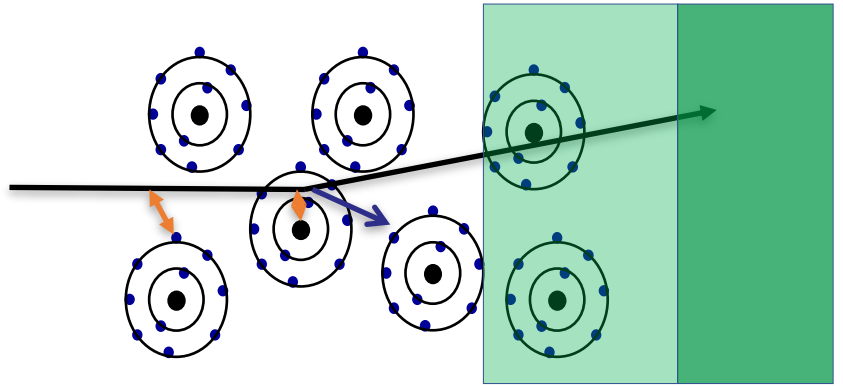
- 带电粒子
- 光子
- 中性粒子

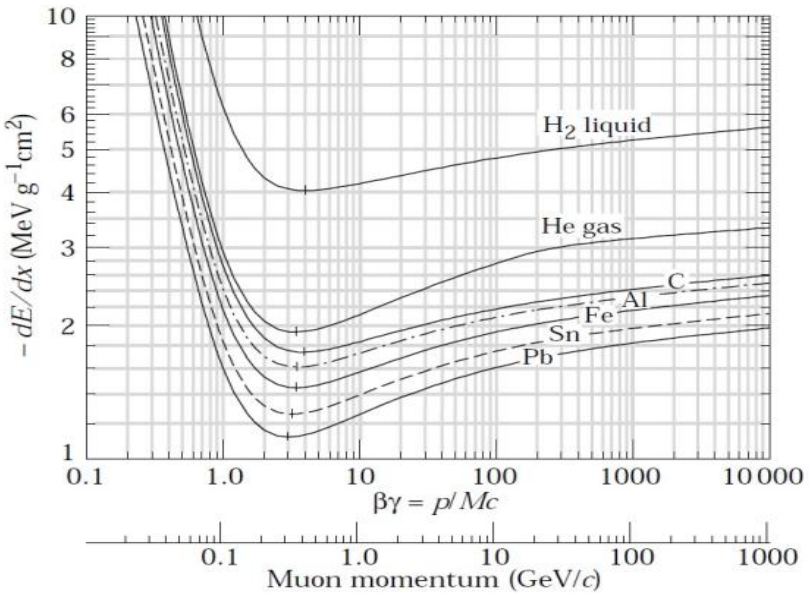


一、带电粒子与物质作用

1. 电离和激发

- 入射带电粒子与物质原子核外的电子发生库仑相互作用而损失能量，物质原子的电子获得能量。当电子获得能量足以克服原子核的束缚，则电子就脱离原子成为自由电子。这就是电离。
  - 电离的结果形成一对正离子和自由电子。
- 当电子获得能量较少，不足以克服原子核的束缚成为自由电子，将跃迁到较高的能级。这就是原子的激发。处于激发态的原子不稳定，作短暂停留后，将从激发态跃迁回到基态，这就是退激。退激时，释放的能量以光的形式发射出来。

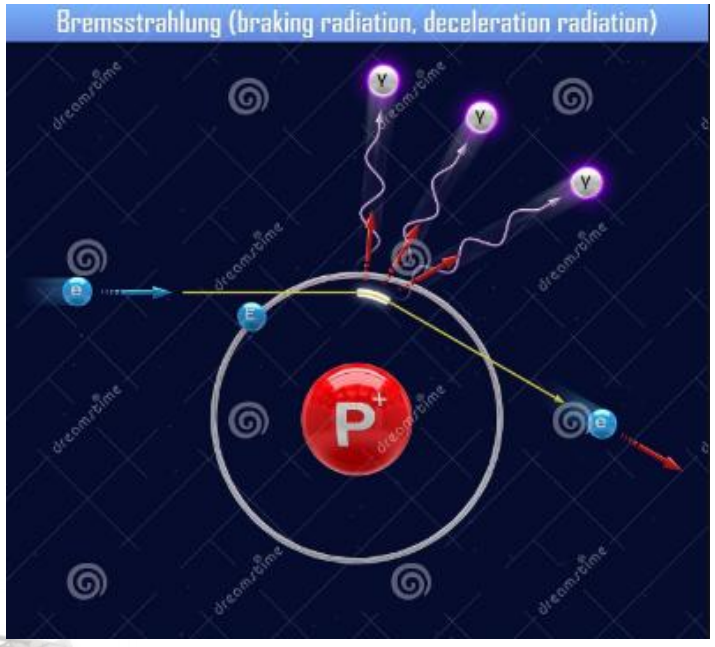


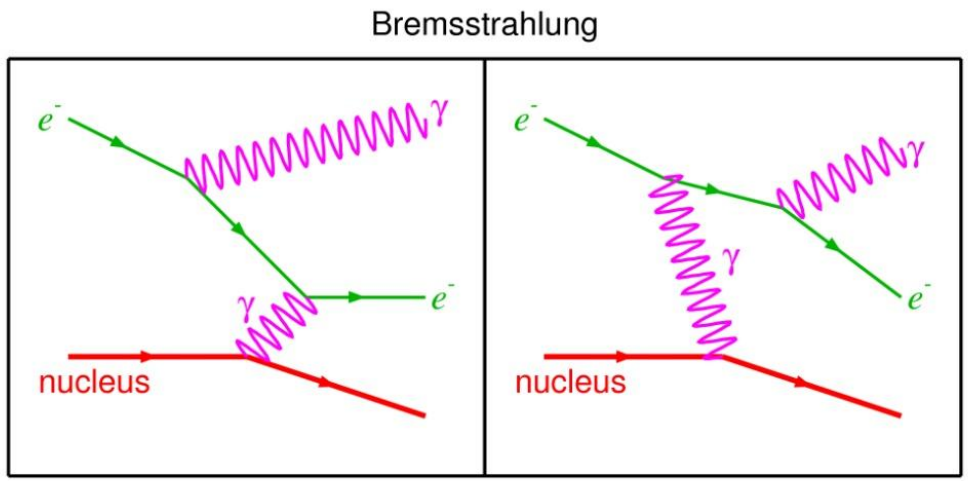




轫致辐射（Bremsstrahlung）

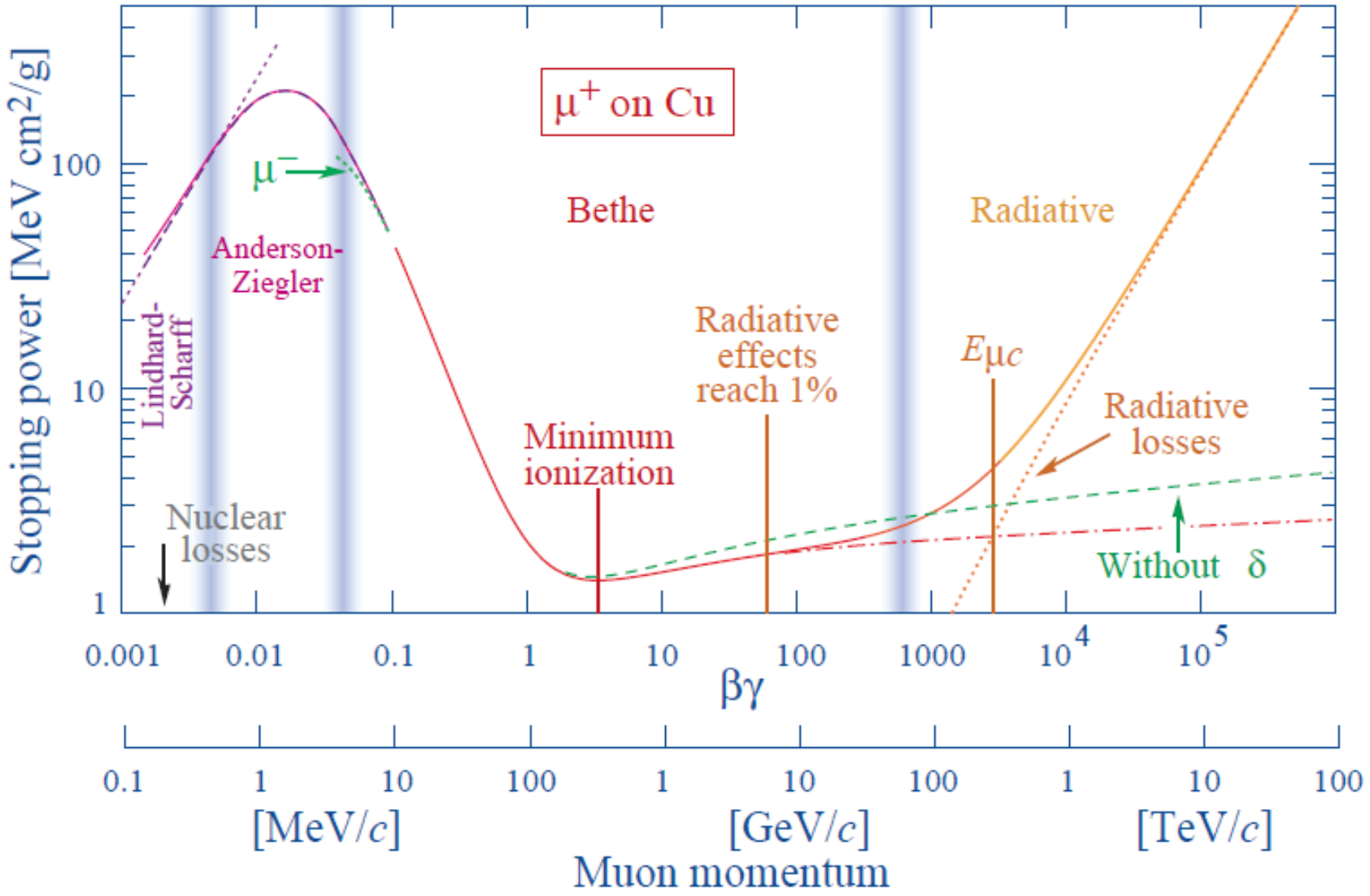
- **轫致辐射：**当入射带电粒子受介质原子、尤其是原子核库仑场的作用，其运动速度的大小或方向发生改变，即发生加速度时，会发出电磁辐射，即轫致辐射，而同时入射粒子相应地损失能量。





轫致辐射过程相应的费曼图

能量损失


μ+ on Cu
Stopping power [MeV cm²/g]
100
10
1
μ⁻
Bethe
Radiative
Anderson-
Ziegler
Lindhard-
Scharff
Radiative
effects
reach 1%
Eμc
Minimum
ionization
Radiative
losses
Nuclear
losses
Without δ
0.001
0.01
0.1
1
10
100
1000
10⁴
10⁵
βγ
0.1
1
10
100
1
10
100
1
10
100
[MeV/c]
[GeV/c]
[TeV/c]
Muon momentum

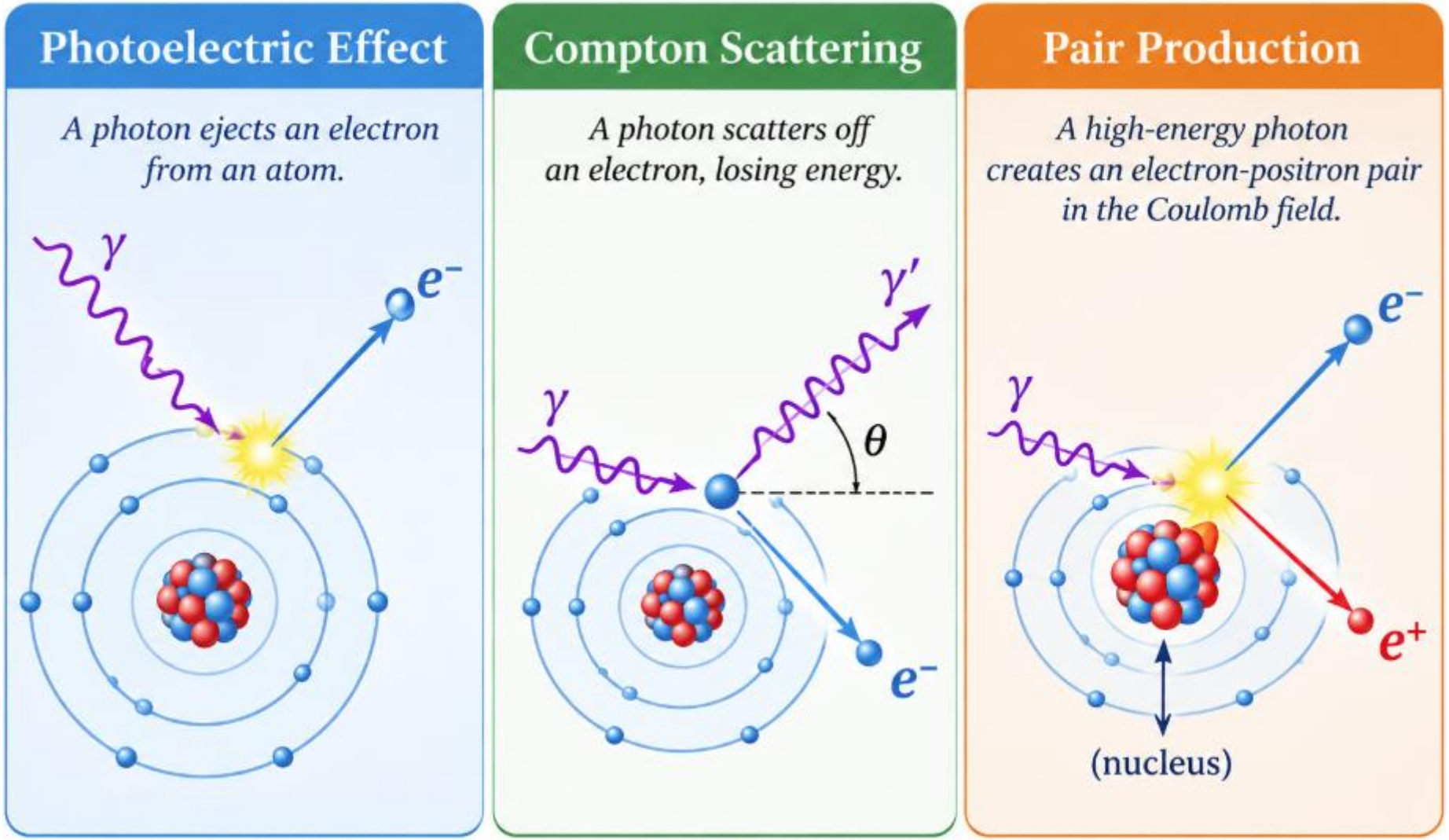


二、光子与物质作用

- 光子（包括X射线和γ射线）是中性粒子，不能像带电粒子那样通过电离和激发原子而连续损失能量。
  - 没有留下径迹
- 光子与物质的相互作用是一种单次性的随机事件：要么发生作用后消失或转换为另一光子，要么不发生作用而穿过物质。射程对于光子没有直接意义。
- 光子与物质的相互作用主要有三种形式：
  - 光电效应、康普顿散射、电子对产生
- 光子通过以上形式的相互作用产生次级电子，损失全部或部分能量，并转换为次级电子的能量。
- 对光子的探测是通过这些次级电子与物质的相互作用进行的，称之为间接探测。
  - 即首先把光子“转换”为带电粒子，然后通过探测这些次级带电粒子实现光子的探测



二、光子与物质作用

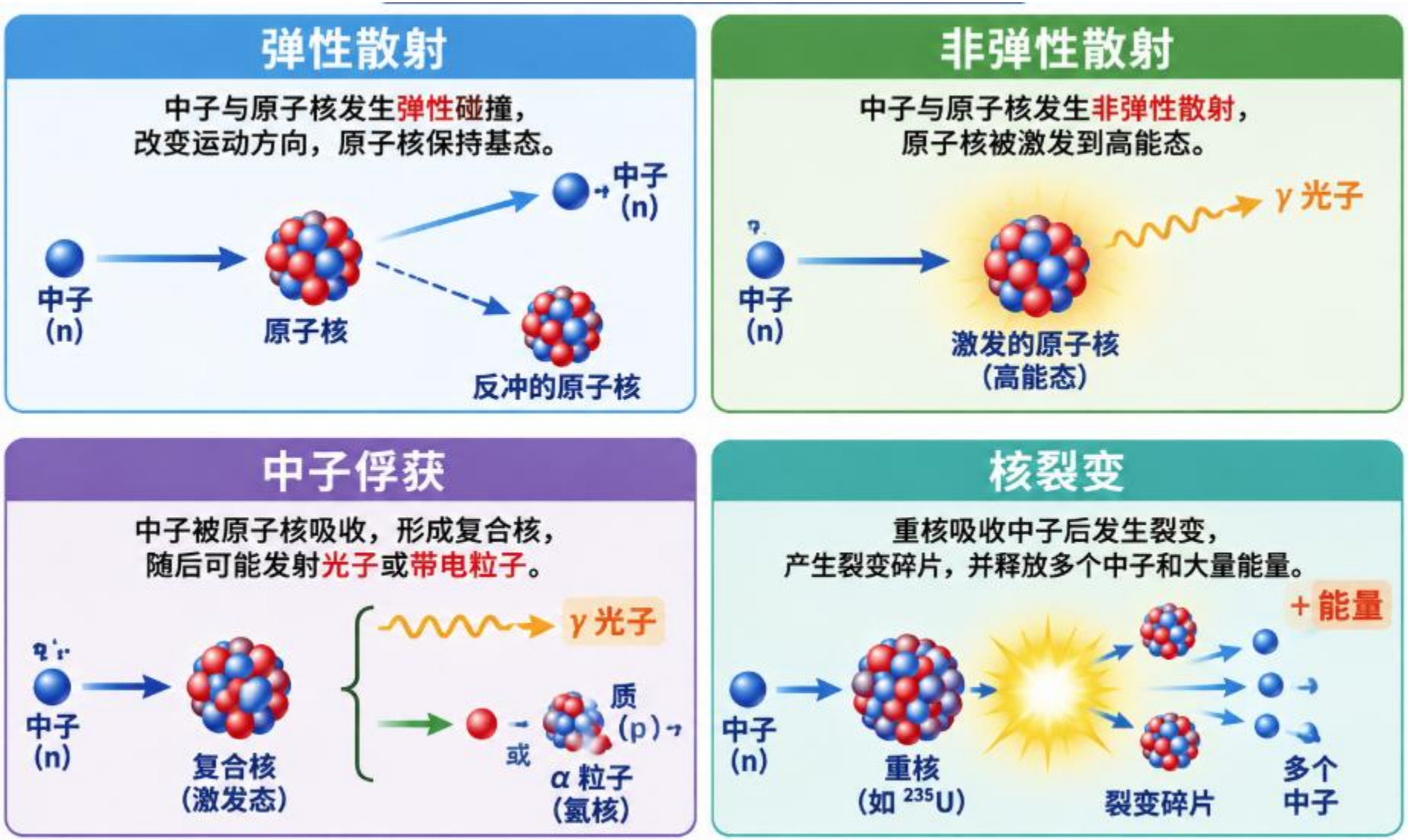

Photoelectric Effect
A photon ejects an electron from an atom.
γ
e⁻
Compton Scattering
A photon scatters off an electron, losing energy.
γ
γ′
θ
e⁻
Pair Production
A high-energy photon creates an electron-positron pair in the Coulomb field.
γ
e⁻
e⁺
(nucleus)

三、中子与物质的相互作用

- 中子不带电，与物质相互作用主要是通过与原子核的强相互作用进行的。具体相互作用机制有两大类：
  - **吸收**：中子进入介质中的原子核内，发生核反应，原子核被激发，处于激发态的原子核通过放出γ射线或产生次级重带电粒子而退激
  - **散射**：中子与原子核发生碰撞，出射中子的能量和方向发生变化，原子核类型不变，受到反冲或被激发。
- 次级重带电粒子和反冲原子核均为带电粒子，它们通过电离损失在介质中损失能量。
- 对中子的探测通常就是通过探测这些次级带电粒子实现的（**间接探测**）。



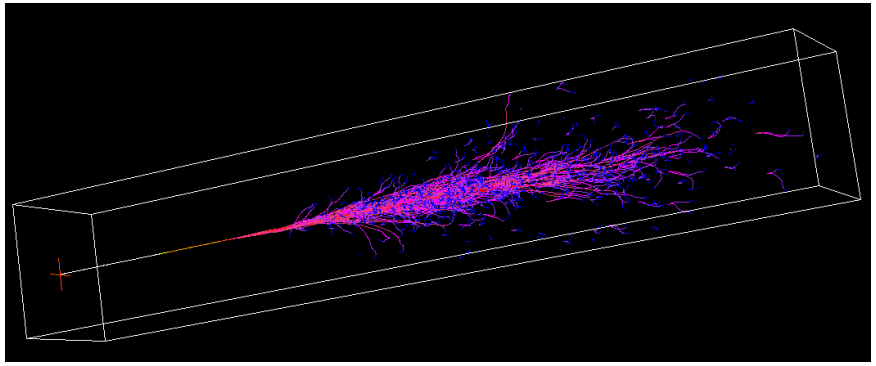
三、中子与物质作用


弹性散射
中子与原子核发生弹性碰撞，
改变运动方向，原子核保持基态。
中子
(n)
原子核
中子
(n)
反冲的原子核
非弹性散射
中子与原子核发生非弹性散射，
原子核被激发到高能态。
γ 光子
中子
(n)
激发的原子核
(高能态)
中子俘获
中子被原子核吸收，形成复合核，
随后可能发射光子或带电粒子。
γ 光子
中子
(n)
复合核
(激发态)
或
质子
(p)
α 粒子
(氦核)
核裂变
重核吸收中子后发生裂变，
产生裂变碎片，并释放多个中子和大量能量。
+ 能量
中子
(n)
重核
(如 235U)
裂变碎片
多个
中子

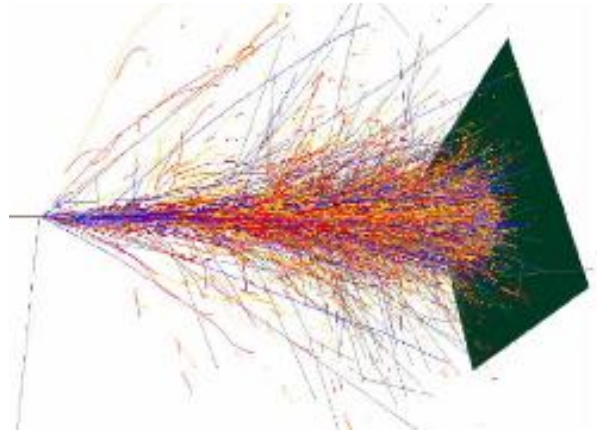
四、高能粒子在物质中的簇射效应

- 当入射粒子能量很高时，其与物质的相互作用变得复杂，一个显著的特点是：高能粒子与物质原子相互作用，通过级联过程会产生越来越多的各种次级粒子——**高能簇射**。

- **高能簇射**
  - **电磁簇射**：高能电子或γ光子与介质原子通过电磁相互作用产生电子—γ光子—电子的级联过程
  - **强子簇射**：高能强子与介质原子核通过强相互作用产生次级强子的级联过程



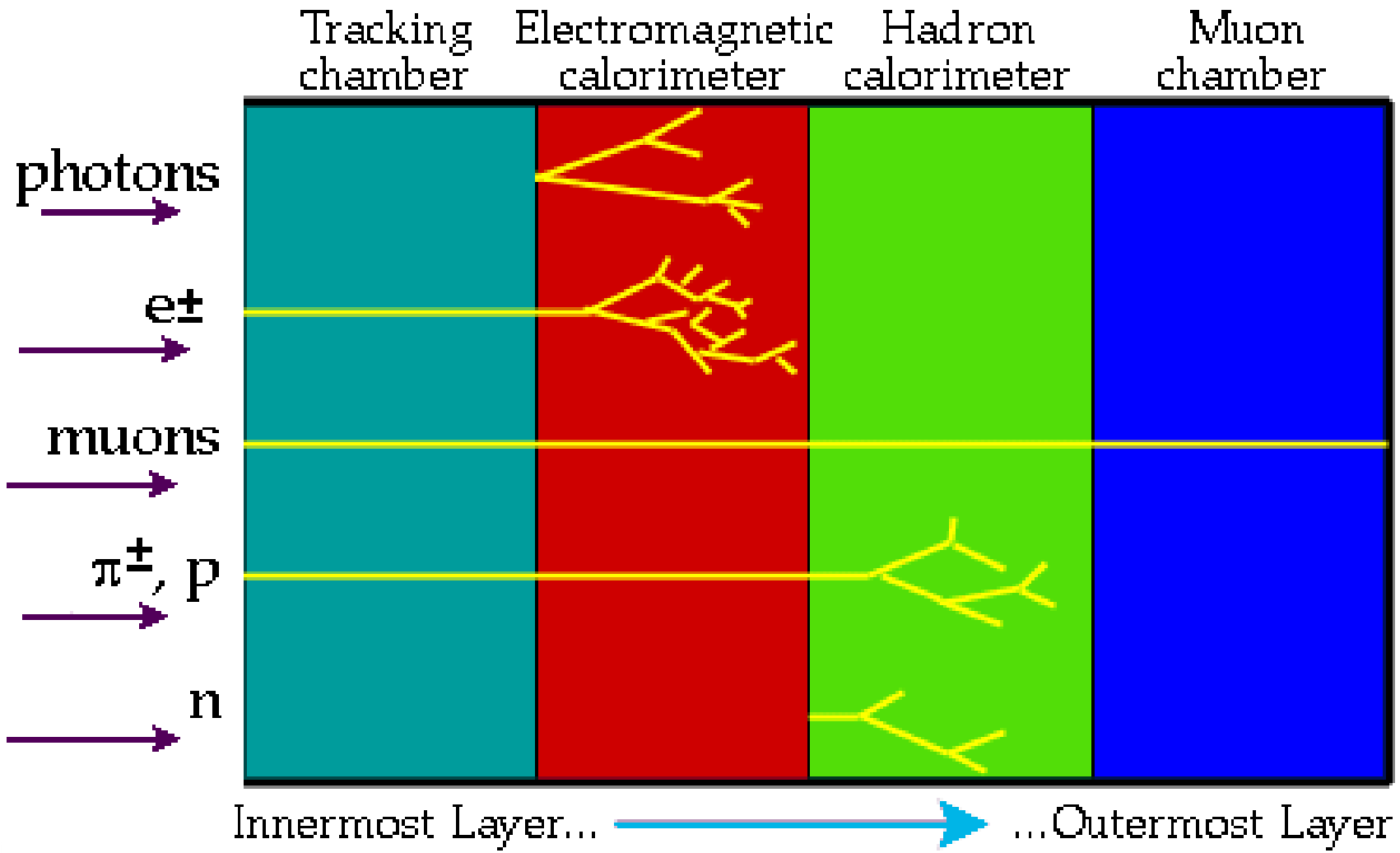
电磁簇射



强子簇射

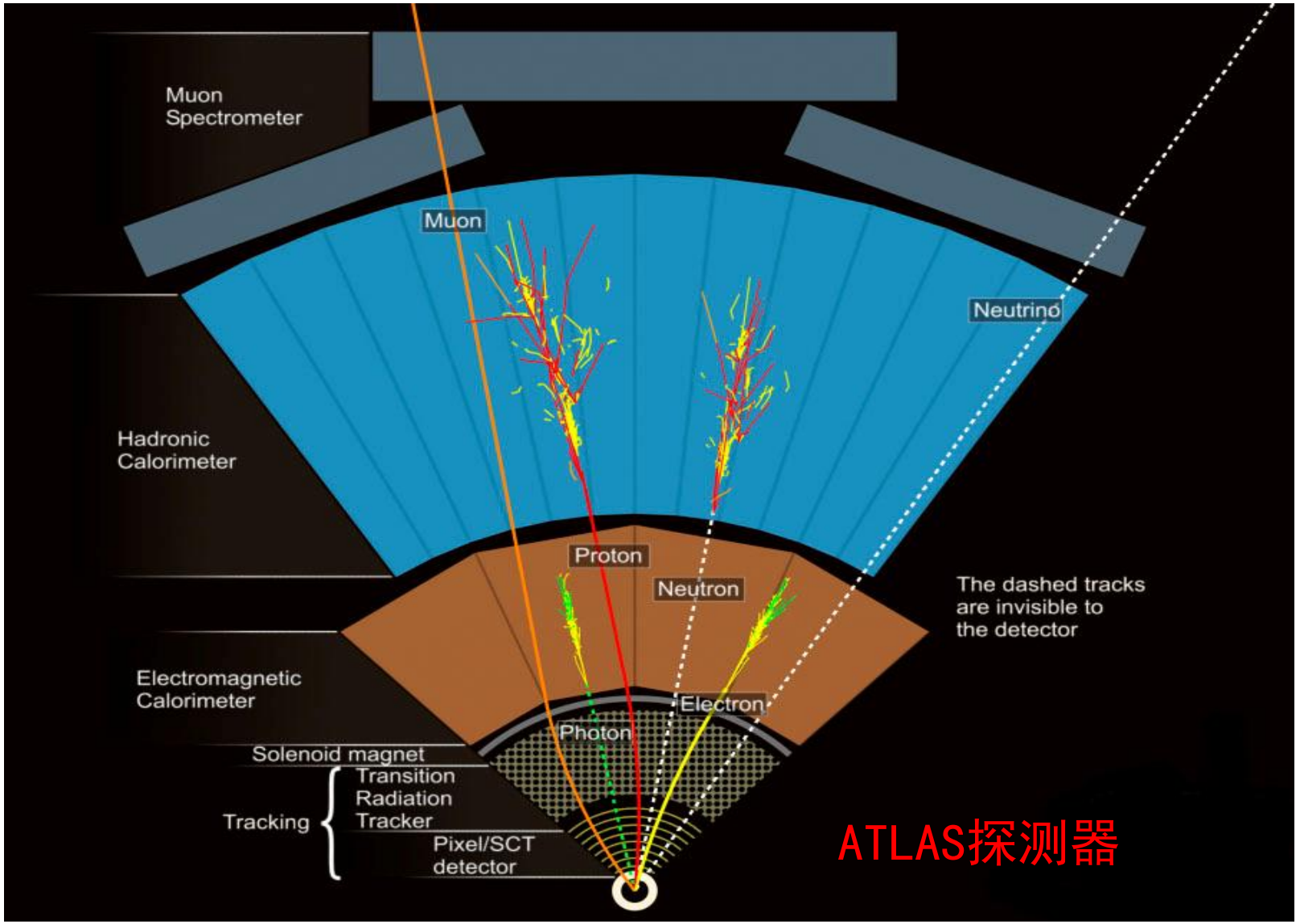


看到粒子

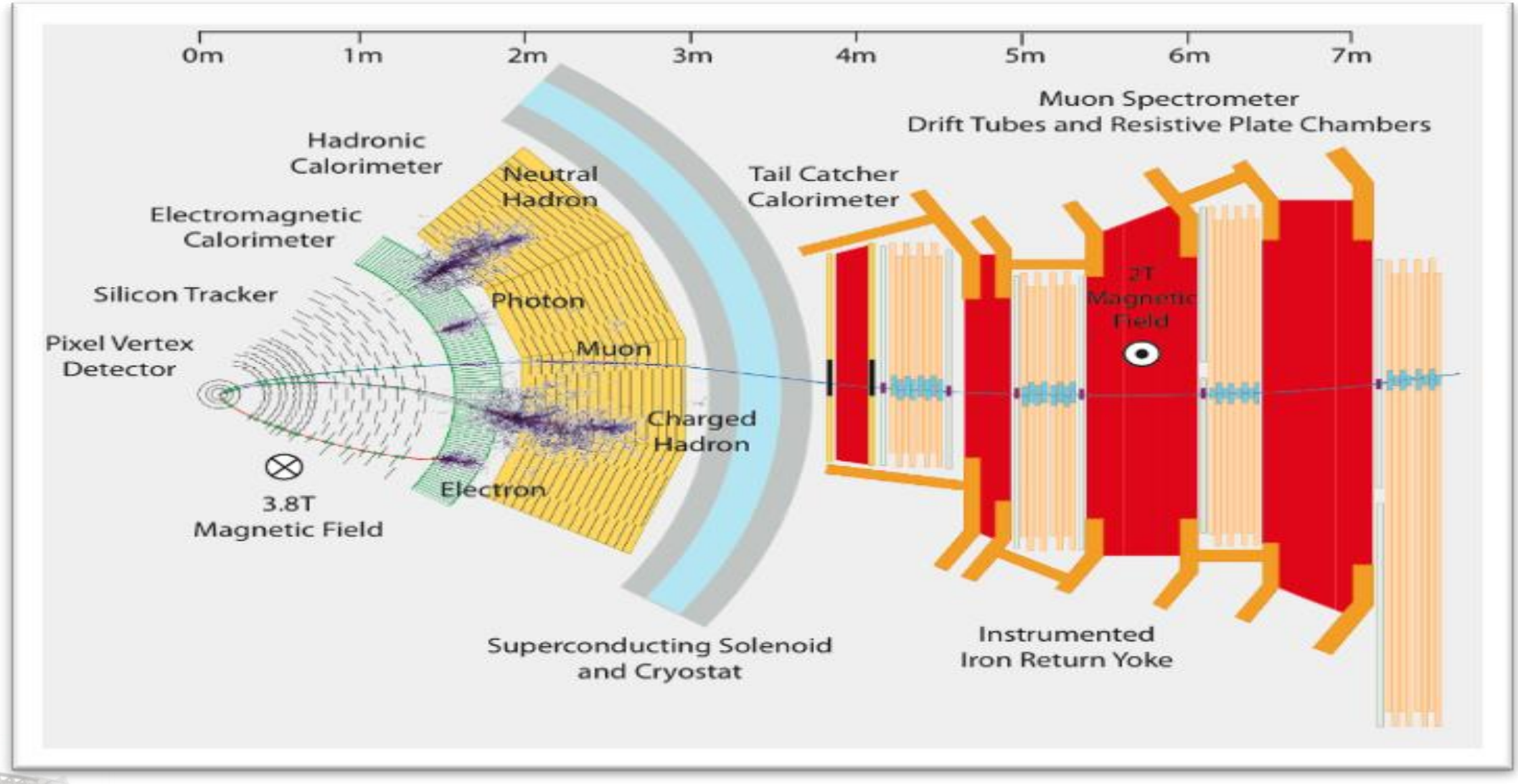

Tracking chamber
Electromagnetic calorimeter
Hadron calorimeter
Muon chamber
photons
e±
muons
π±, p
n
Innermost Layer...
...Outermost Layer



粒子与物质的相互作用在粒子探测中应用



粒子与物质的相互作用在粒子探测中应用



如何探测粒子？

1. 前提是粒子与物质（探测器）发生作用

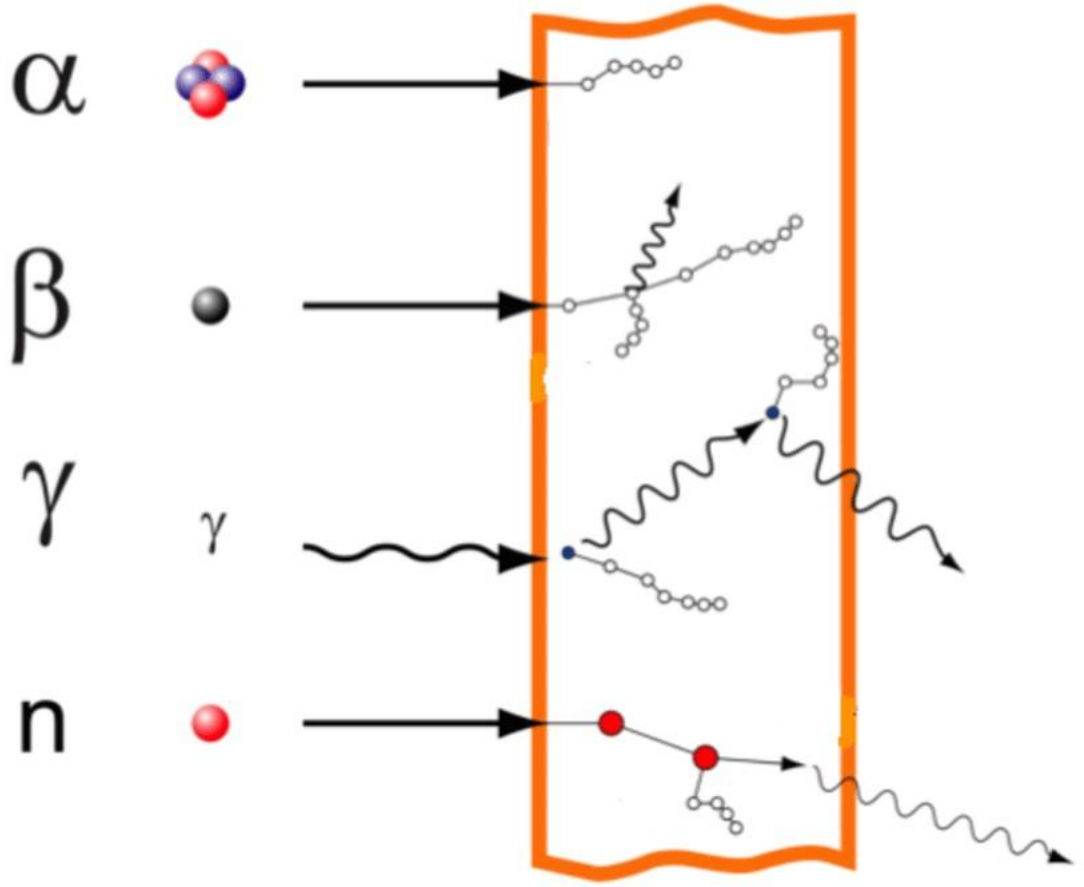
2. 需要一种能把“相互作用产生的能量沉积”转换为一定信息载体的材料



粒子与物质的作用

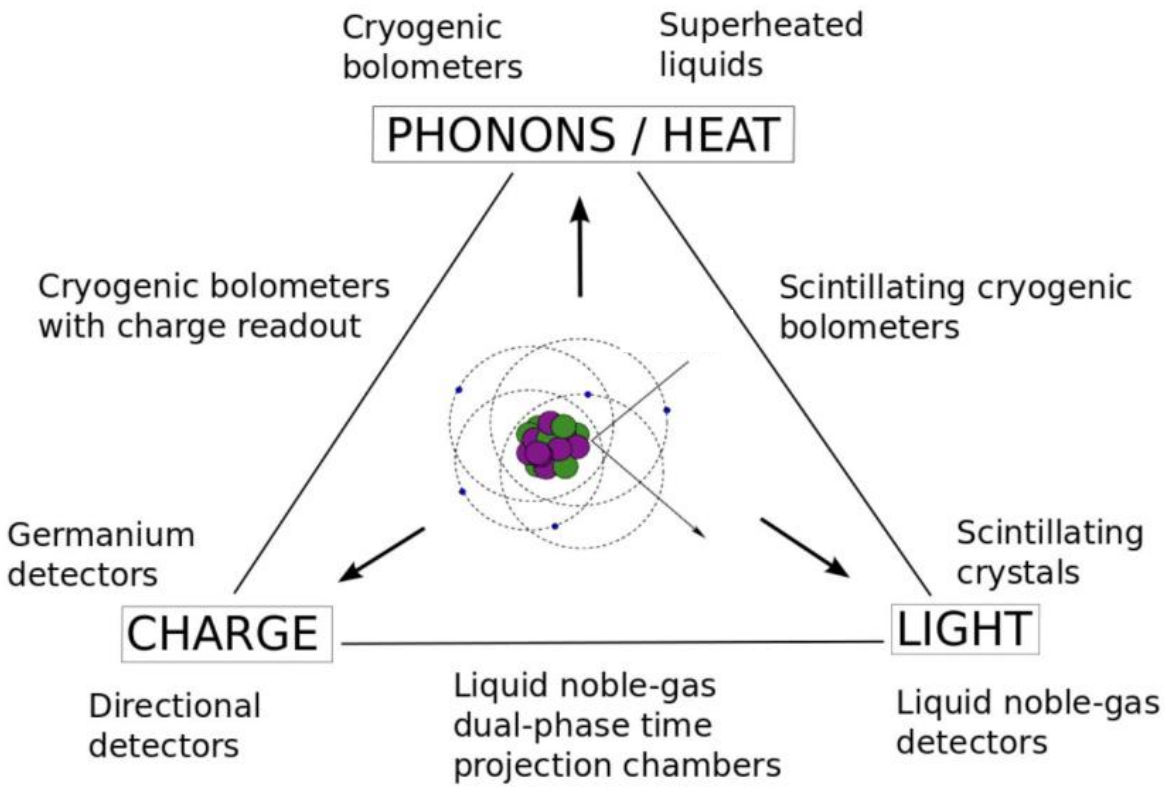
- 入射粒子与物质发生作用，损失能量
- 对于一些“特殊”的材料，可以把粒子损失的能量转化为“信息载体”
- 使用探测器来记录这些信息载体就可以获得微观粒子的信息





粒子探测中信息载体

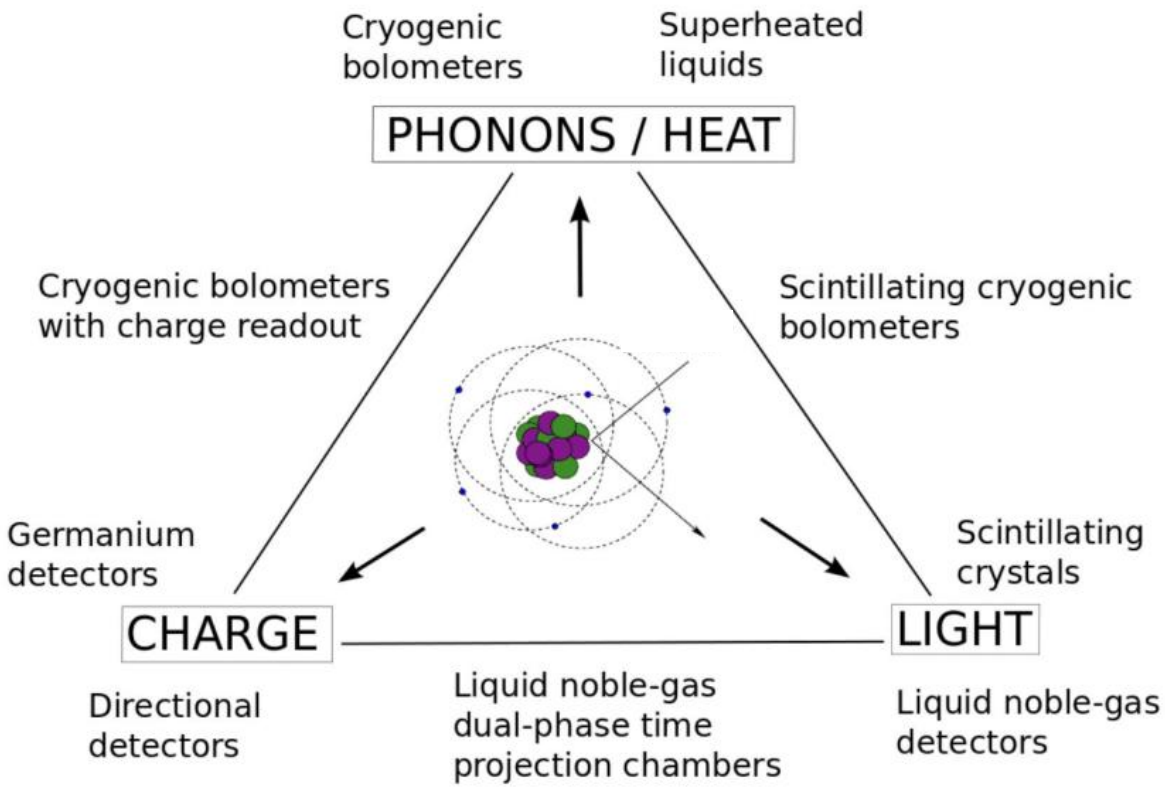
- 基于“光信号”进行探测
  - 闪烁（光）探测器
- 基于“电荷信号”进行探测
  - 气体探测器——电子-离子
  - 半导体探测器——电子-空穴
- 基于“声子信号”进行探测
  - 量热器





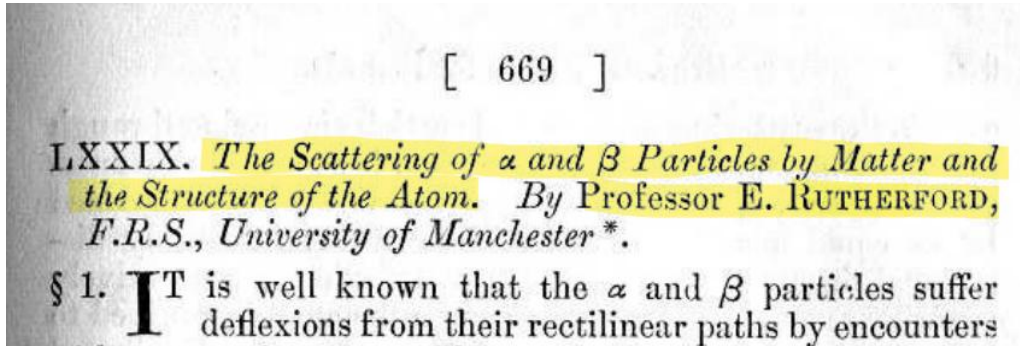
粒子探测

- 基于“光信号”进行探测
  - 闪烁（光）探测器
- 基于“电荷信号”进行探测
  - 气体探测器——电子-离子
  - 半导体探测器——电子-空穴
- 基于“声子信号”进行探测
  - 量热器





闪烁（光）探测器

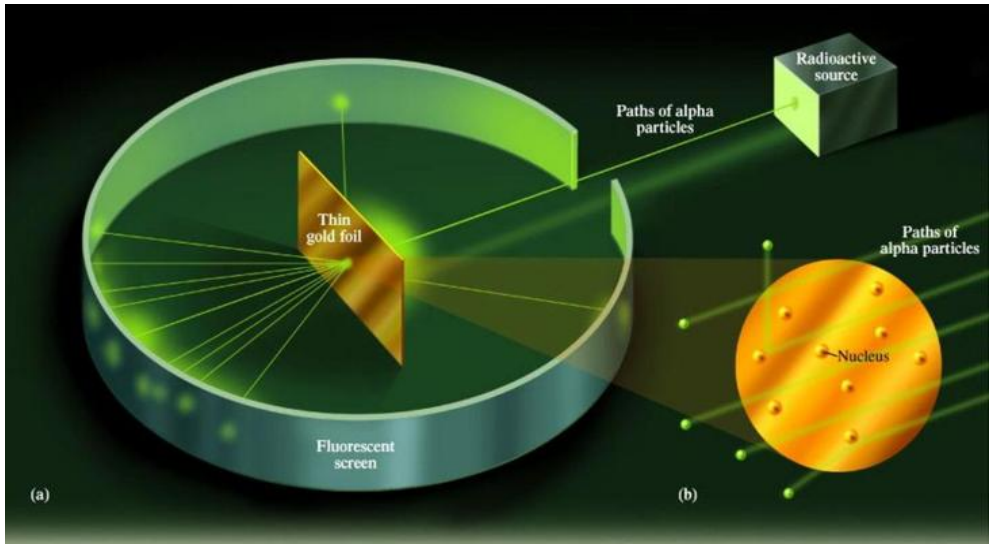


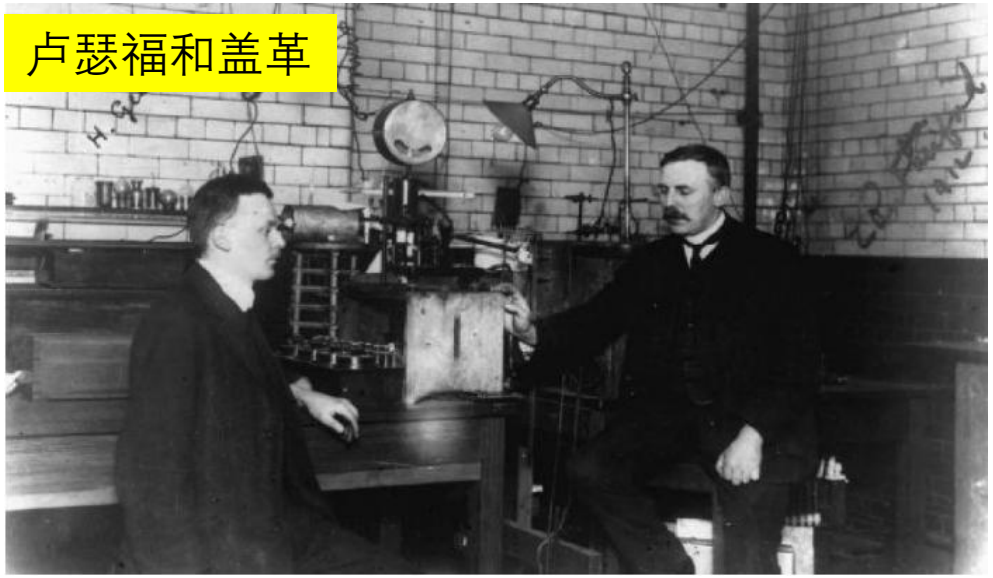
[669]

LXXIX. *The Scattering of α and β Particles by Matter and the Structure of the Atom.* *By* Professor E. RUTHERFORD, *F.R.S., University of Manchester* *.

§ 1. IT is well known that the α and β particles suffer deflexions from their rectilinear paths by encounters

- 卢瑟福 α 散射实验
  - 采用了ZnS荧光屏
  - 散射的 α 粒子击中ZnS屏，激发闪烁光（可见光波段）
  - 通过闪烁光产生的位置，推算 α 粒子散射角度
    - 盖革明亮的眼睛发挥了重要作用 ☺

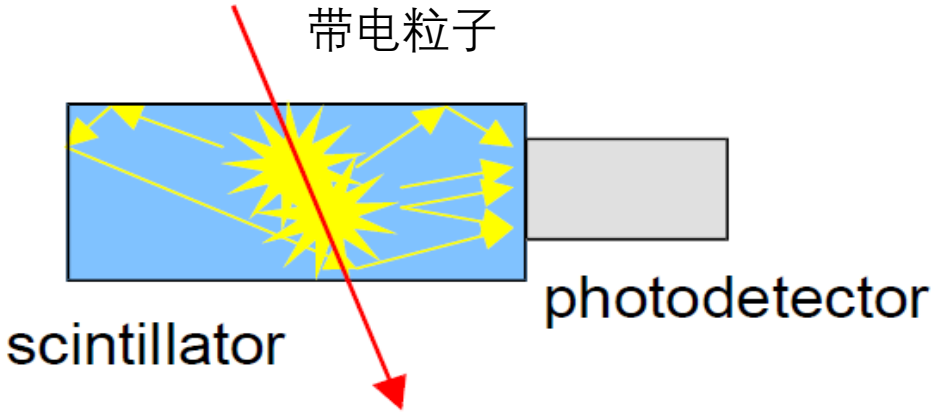


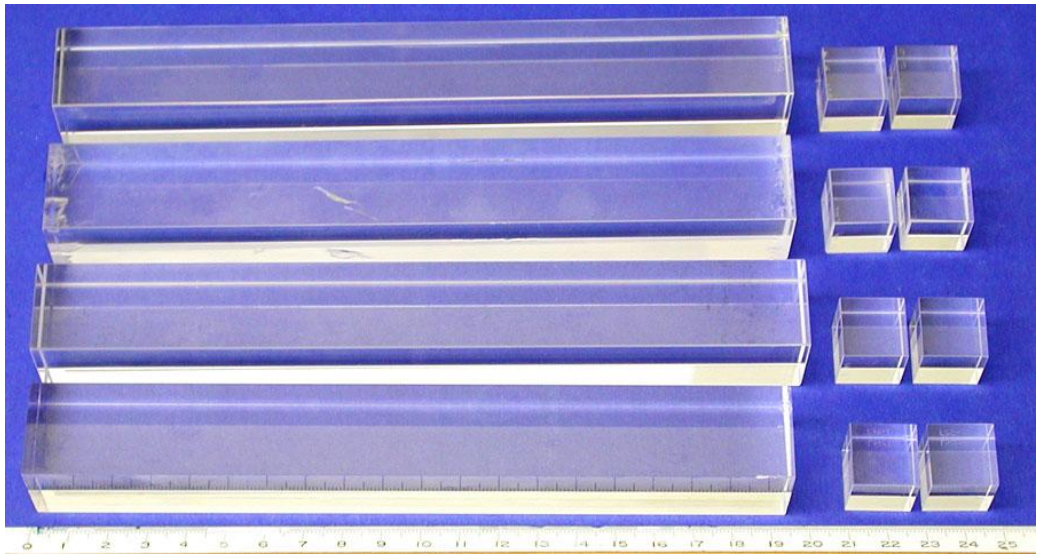


卢瑟福和盖革

闪烁探测器的工作原理

- 入射粒子进到闪烁体内，发生电离和激发过程，损失能量
- 激发闪烁体发射荧光光子
  - ~300 – 600 nm
- 光子被与闪烁体耦合的光电器件收集并转换为电信号
- 根据电信号的大小得到粒子能损
- 特点：物质量大，“阻止” 本领强，测量粒子能量

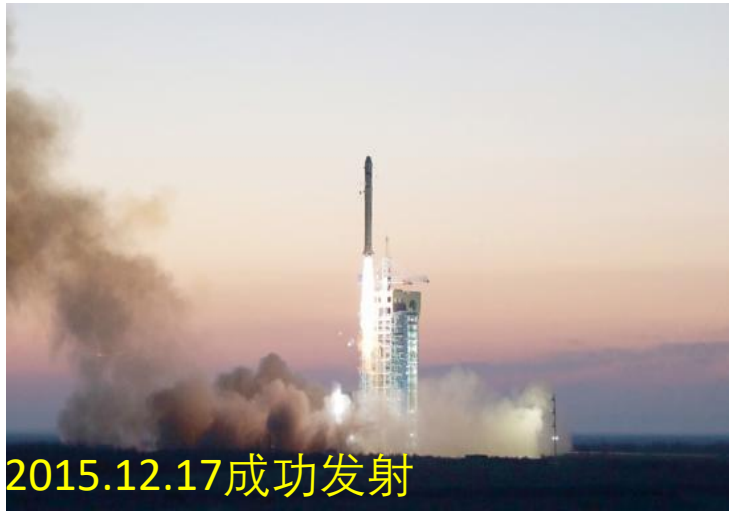


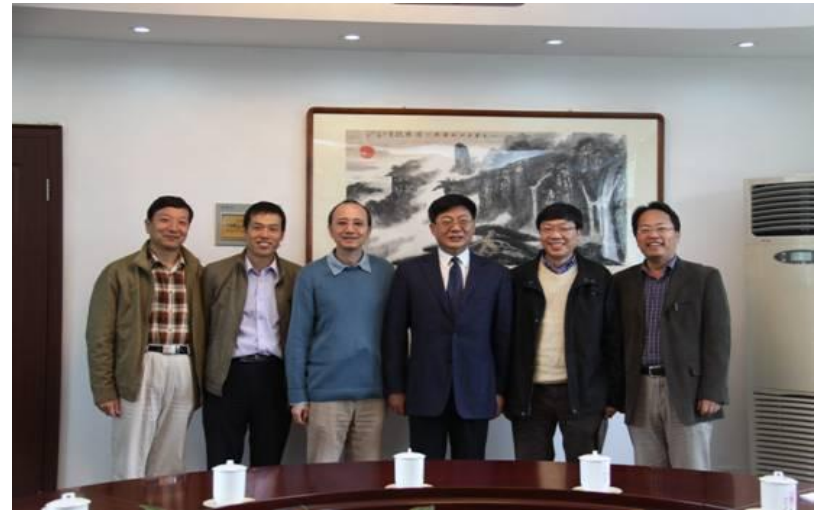


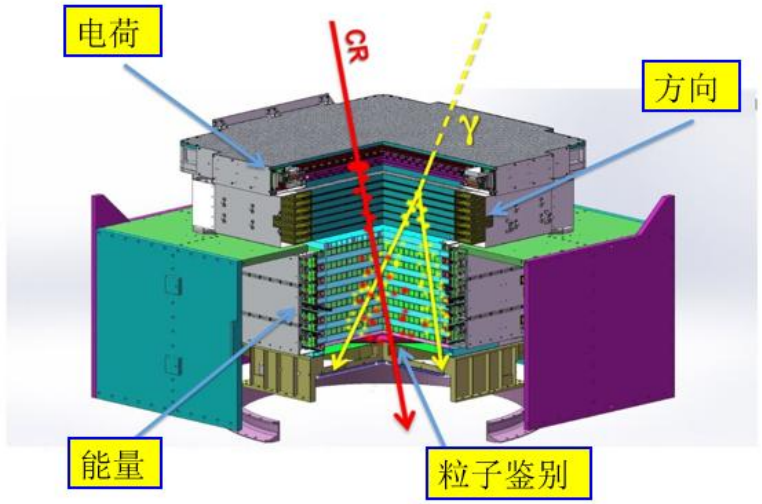
闪烁体

闪烁探测器的应用—“悟空”号

- “悟空”号是我国十二五空间战略性先导专项首发星
- 通过在轨直接观测原初高能宇宙线，进而间接寻找暗物质粒子
- 能区：5 GeV to 10 TeV



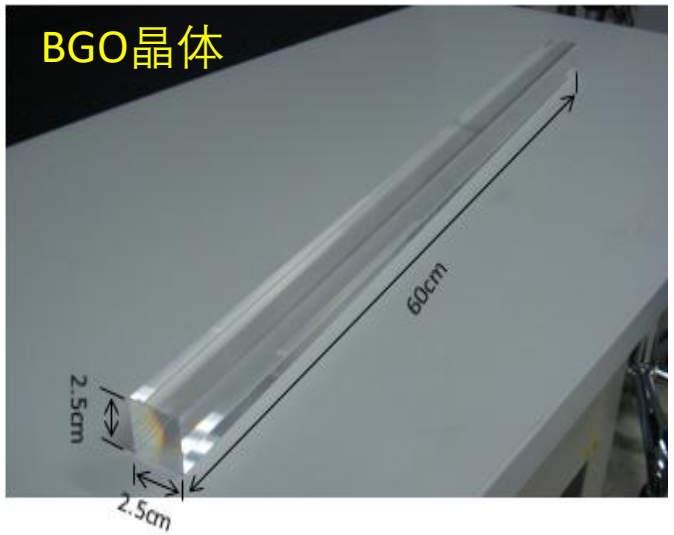




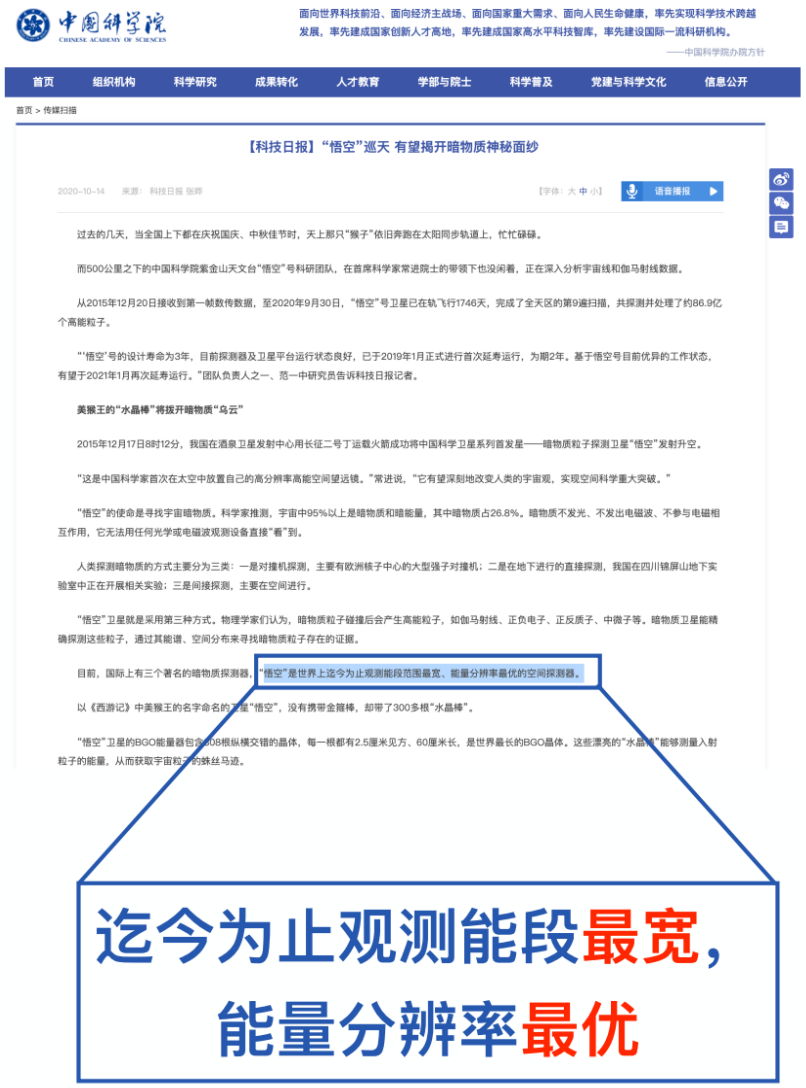


闪烁探测器的应用—“悟空”号

- BGO量能器是“悟空”号谱仪的核心部分
- 承担入射粒子能量的精确测量
- 核探测与核电子学国家重点实验室负责该量能器的研制
- 采用我国自研的国际最大尺寸的锗酸铋（BGO）晶体阵列研制
  - 全吸收型
  - 3D成像型
  - 总辐射长度最大



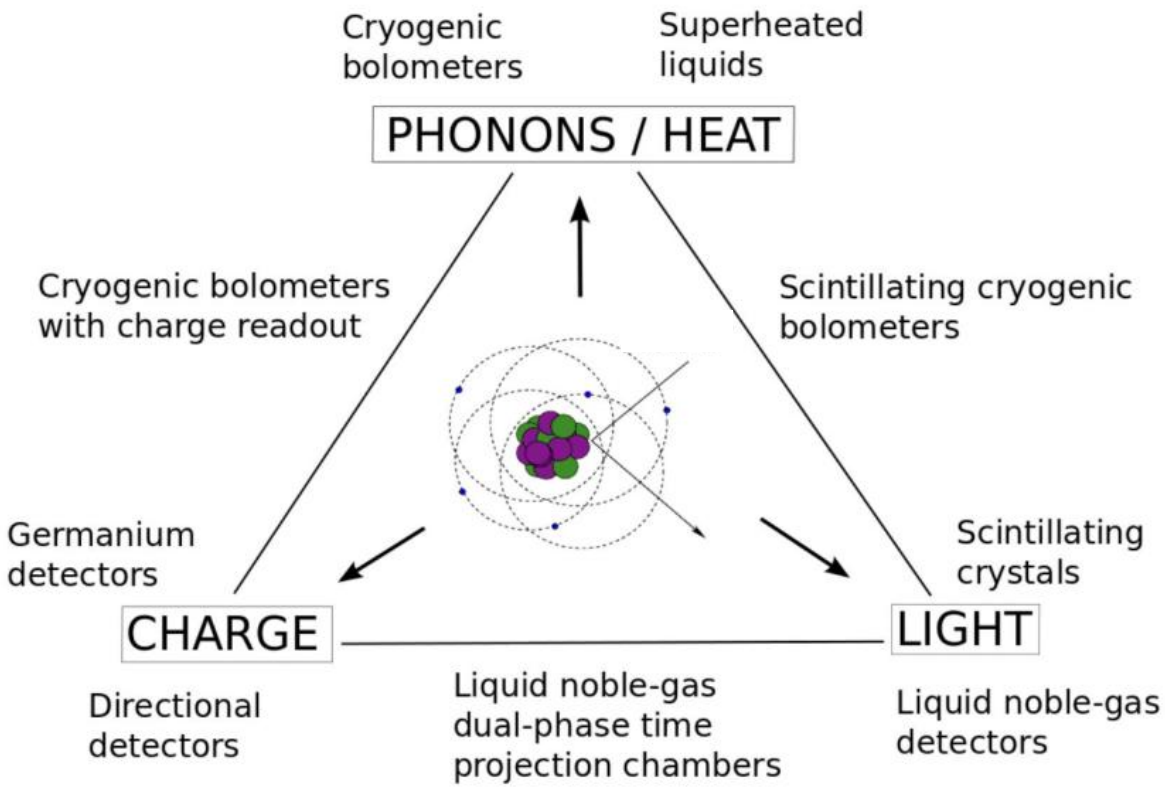






粒子探测

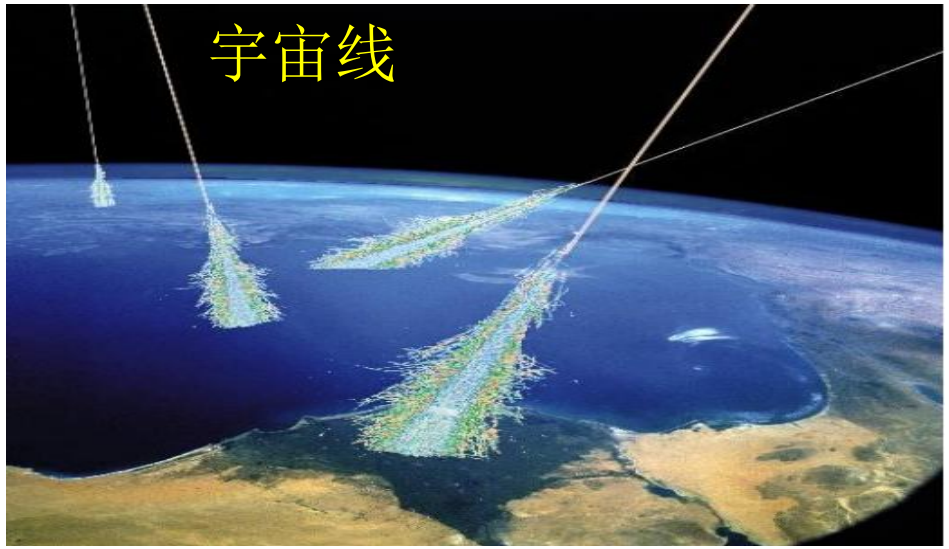
- 基于“光信号”进行探测
  - 闪烁（光）探测器
- 基于“电荷信号”进行探测
  - 气体探测器——电子-离子
  - 半导体探测器——电子-空穴
- 基于“声子信号”进行探测
  - 量热器

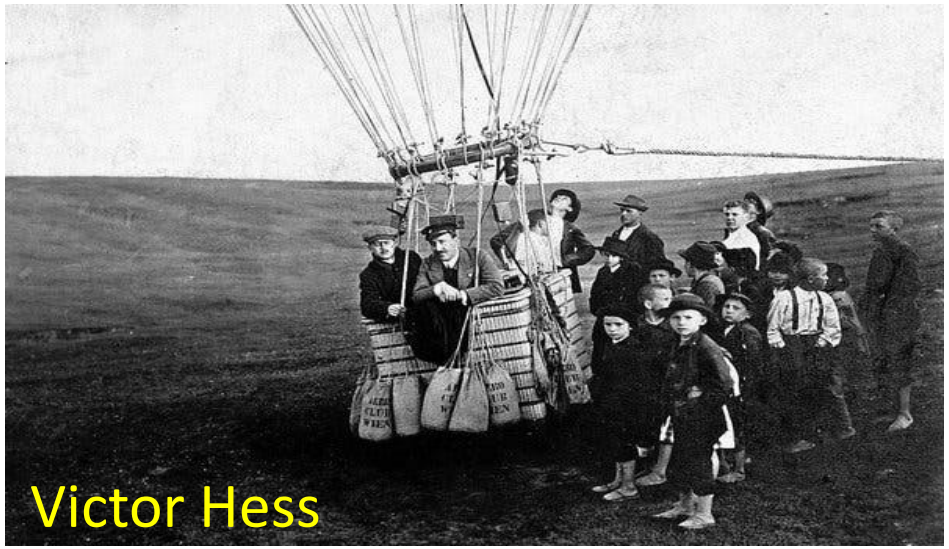


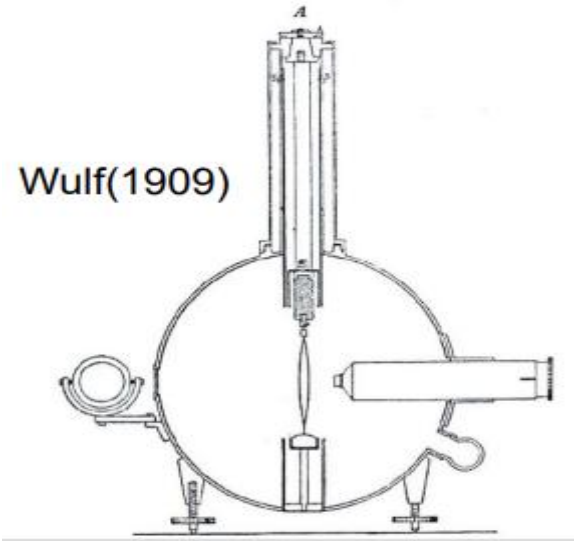


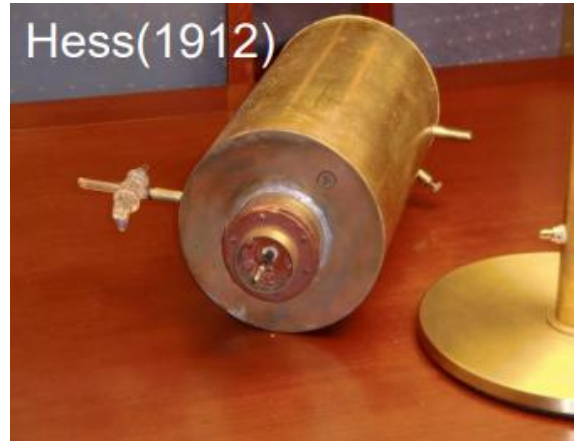
气体探测器

- 宇宙线的发现
- 1911年，海斯携带气体电离室乘坐气球，在1100米高空，没有发现明显异常
- 1912年，上升到5300米高空，发现辐射率约为地面的3倍
  - 该辐射来自于“天上”





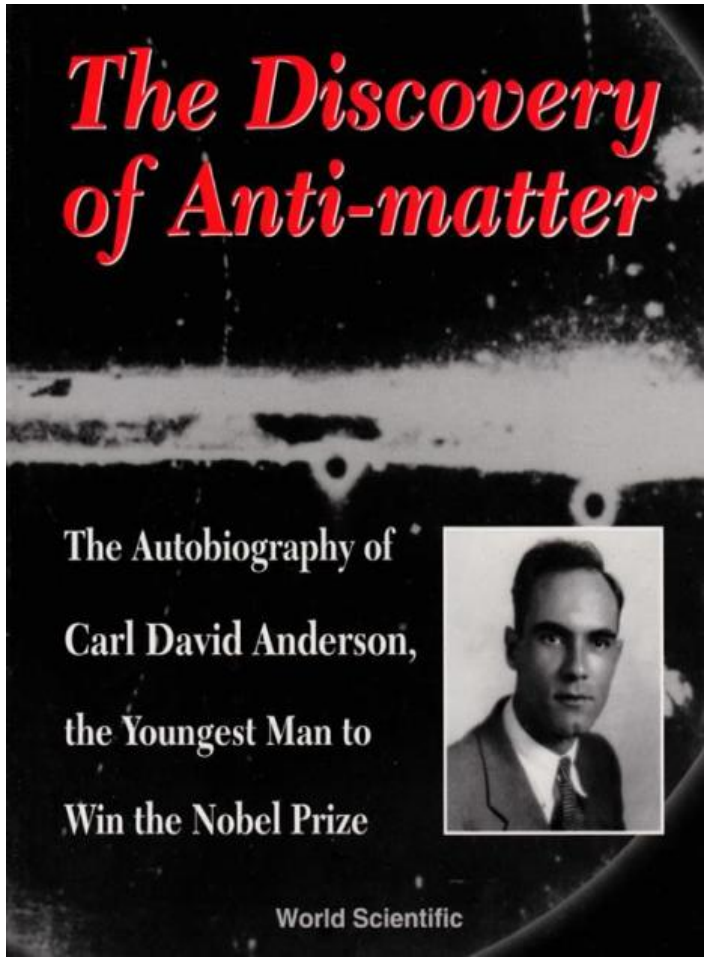


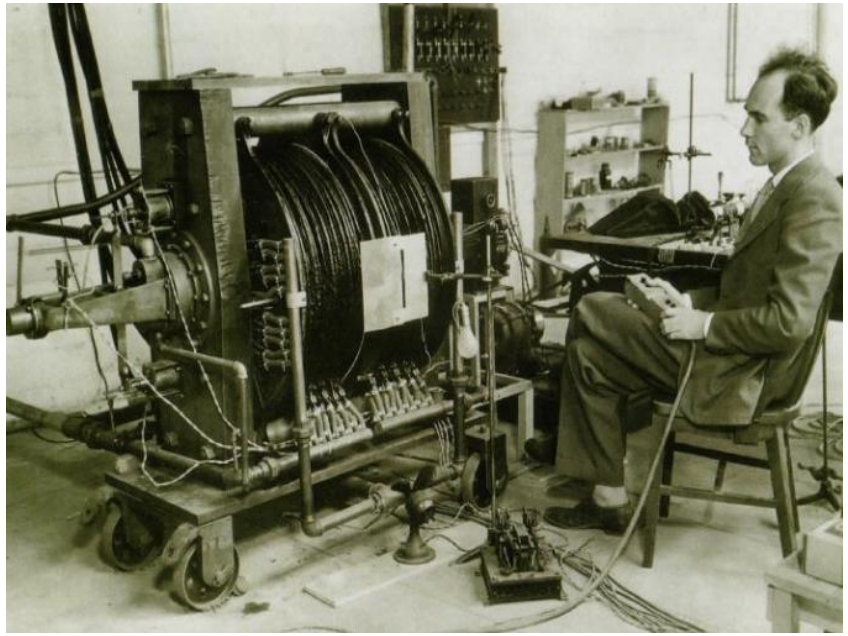


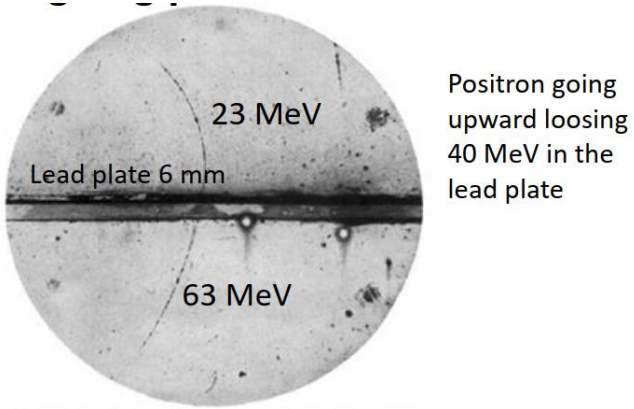


气体探测器

- 反物质的发现
- “云室”是Wilson于1900年代发明的
  - 介质是过饱和蒸气
  - 粒子入射云室，沿着径迹会留下清晰的液滴
- 安德森（赵忠尧先生在加州理工的同事），利用云室首次发现了反物质粒子——正电子

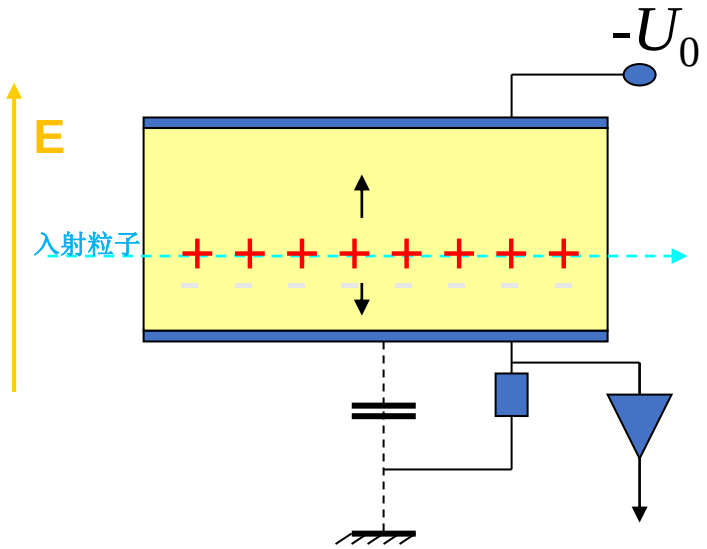






气体探测器工作原理

- 以惰性气体作为工作介质，在电极上加高压
- 入射粒子进到气体探测器内，发生电离损失能量，产生电子-离子对
- 电子-离子在电场作用下，向电极漂移，最终被电极“收集”
- 根据“收集”到的电荷量大小得到粒子能损
- G. Charpak，1968年发明多丝正比室，广泛应用于粒子物理实验中
- 特点：物质量低，对粒子影响小，测量粒子径迹



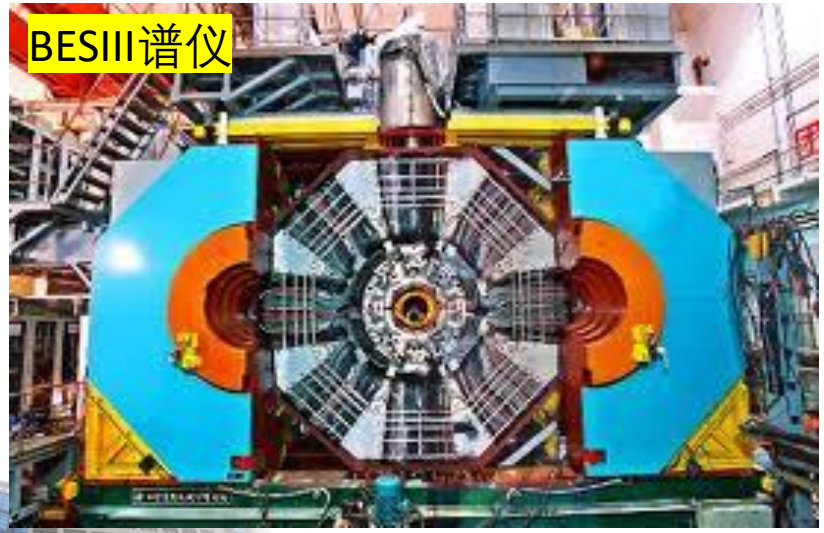


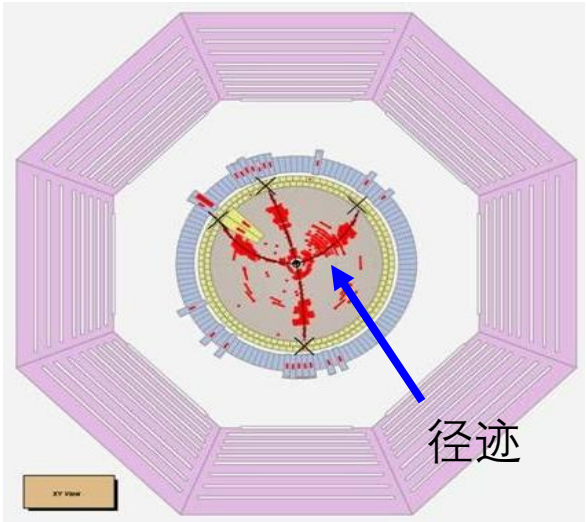
Charpak 与 多丝正比室

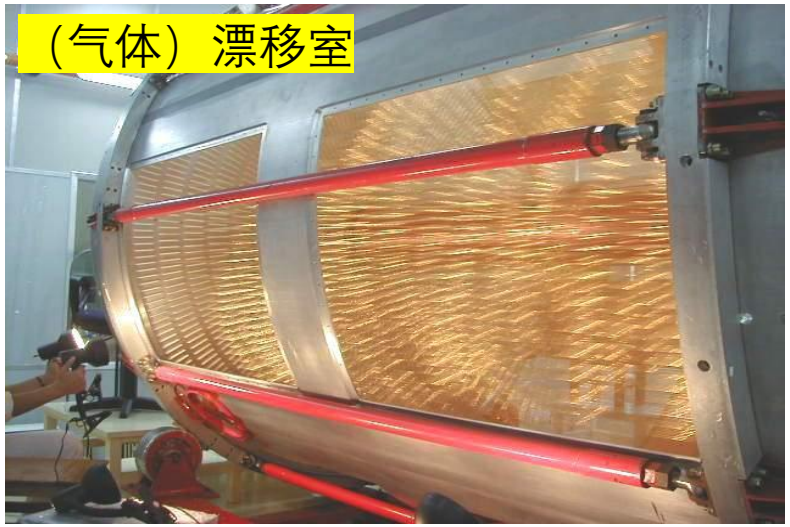
气体探测器的应用 I — 对撞实验径迹探测器

- 北京正负电子对撞机(BEPCII），物理目标是陶-粲 能区的精确测量和新物理的探索。
- （气体）漂移室是BESIII磁谱仪最重要的子探测器之一，用来测量带电粒子的径迹、动量
  - 物质量低，优势明显
  - 动量分辨：0.5% @ 1 GeV





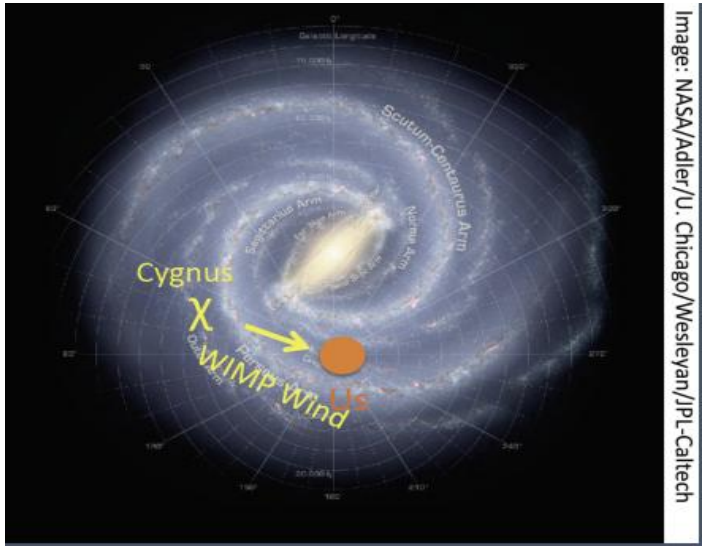


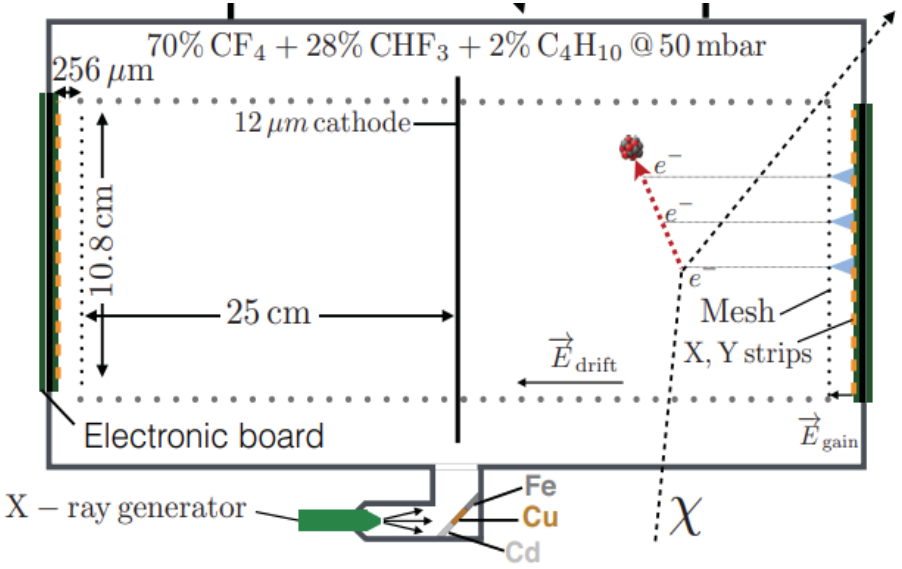


气体探测器的应用 II — 暗物质探测

- MIcro-tpc MAtrix of Chambers （MIMAC）

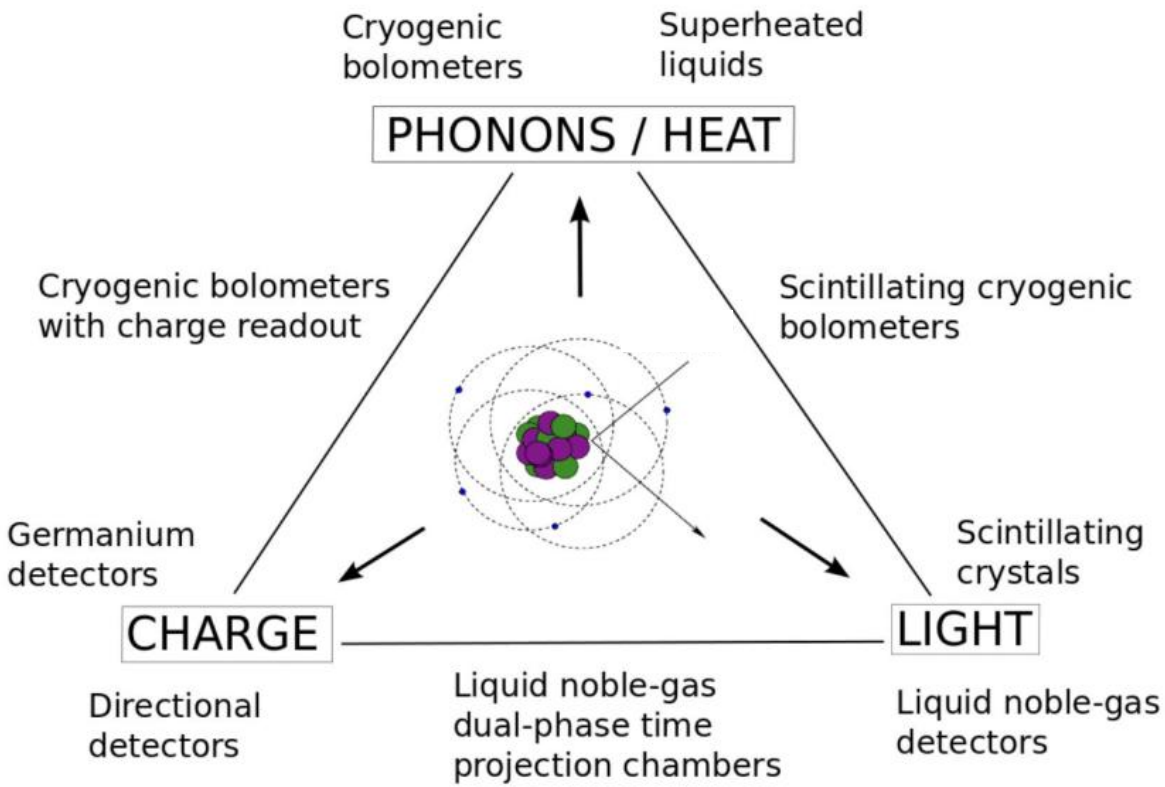
  暗物质“方向”型探测实验
- 假设银河系存在“暗物质晕”
- 太阳系绕着银心公转，速度~220 km/s
- 当太阳系（及地球）经过该区域，暗物质粒子会与探测器发生（弱）作用
- 反冲的原子核径迹具有一定的方向性
  - 需要测量反冲原子核径迹
  - 低气压气体探测器





粒子探测

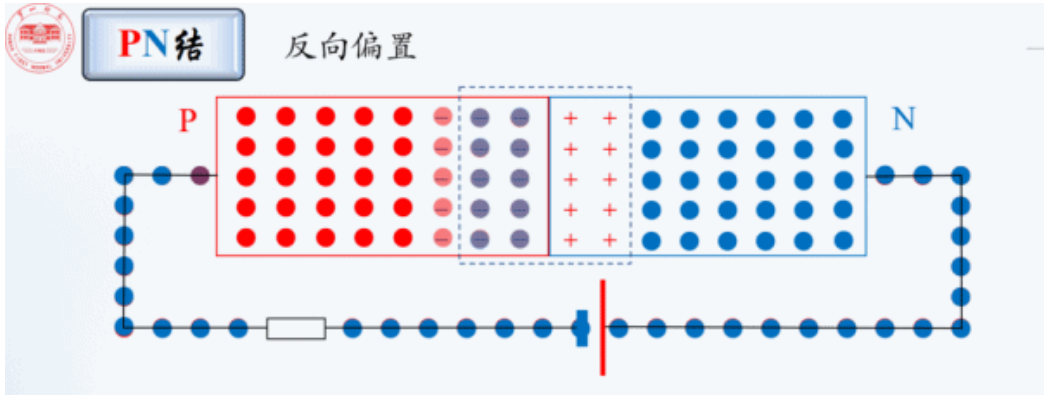
- 基于“光信号”进行探测
  - 闪烁（光）探测器
- 基于“电荷信号”进行探测
  - 气体探测器——电子-离子
  - 半导体探测器——电子-空穴
- 基于“声子信号”进行探测
  - 量热器

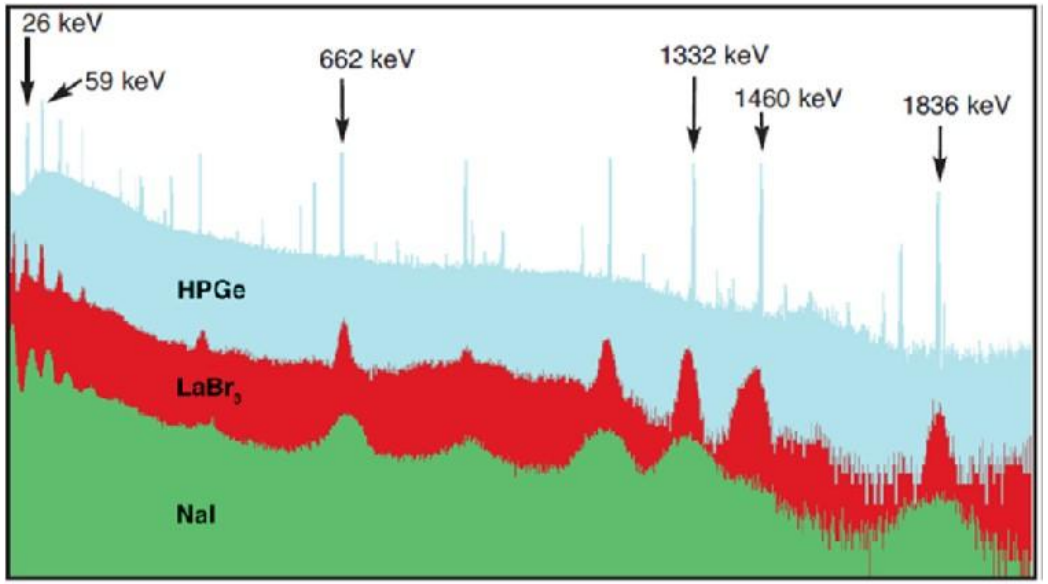




半导体探测器

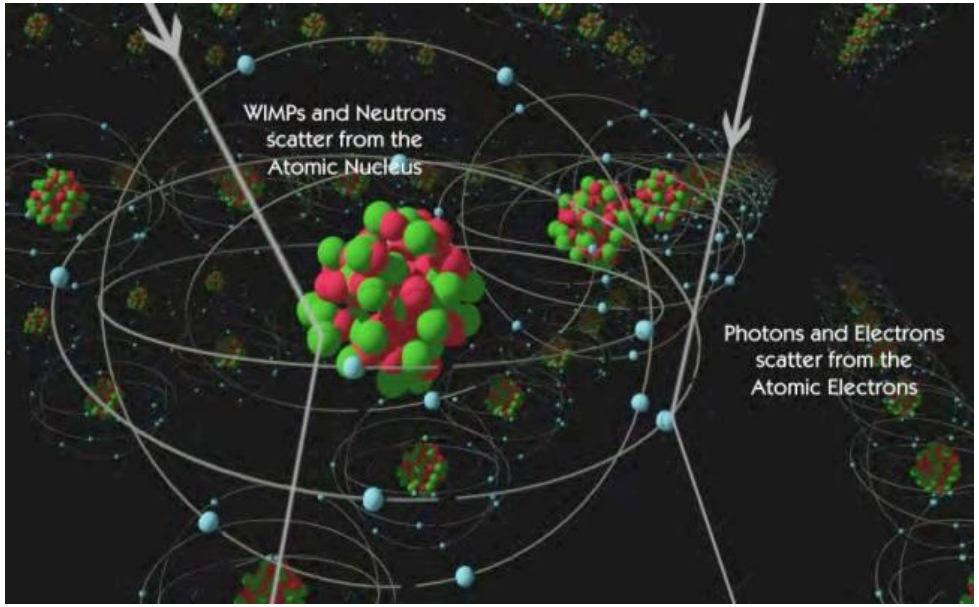
- 半导体~1960前后被应用与粒子探测
- 本质上是固体电离室
- 入射粒子进到半导体探测器内，发生电离损失能量，产生电子-空穴对
- “电子-空穴”在电场作用下，向电极漂移，最终被电极“收集”
- 根据“收集”到的电荷量大小得到粒子能损
- 特点：极好的能量分辨
  - 比闪烁探测器好一个数量级

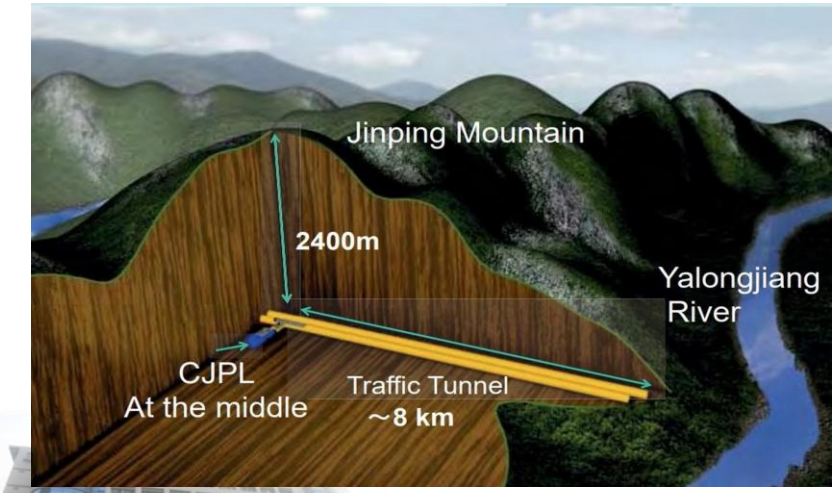


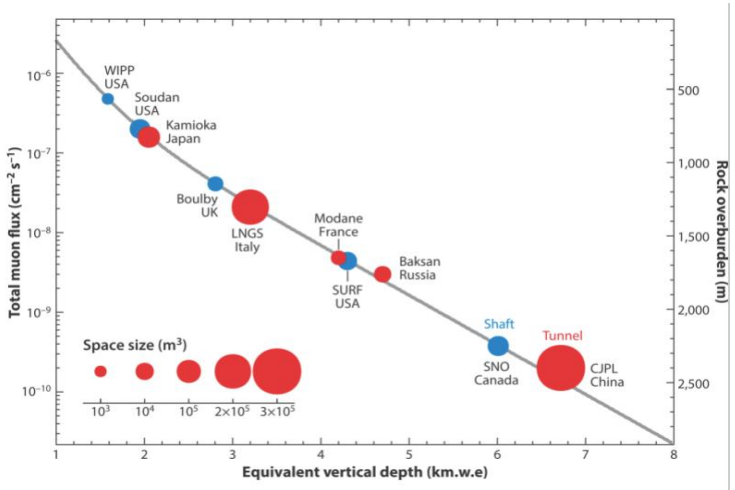


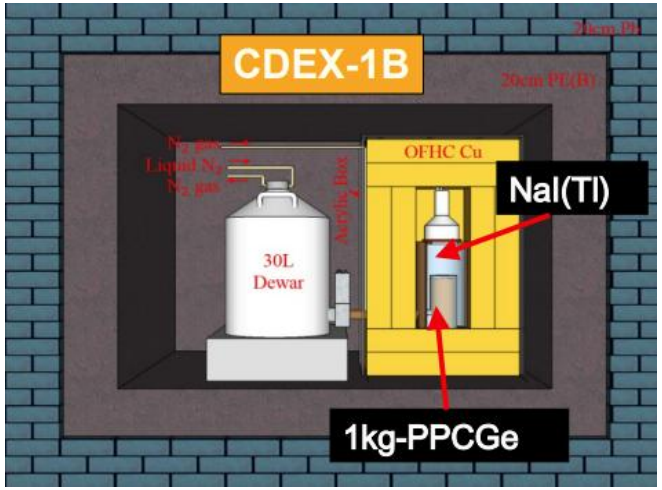
半导体探测器的应用 I—暗物质探测

- 暗物质粒子直接寻找
- China Dark matter Experiment （CDEX）实验采用HpGe探测暗物质粒子
- 与MIMAC实验不同，CDEX是测量反冲原子核的能量
  - 能量分辨好



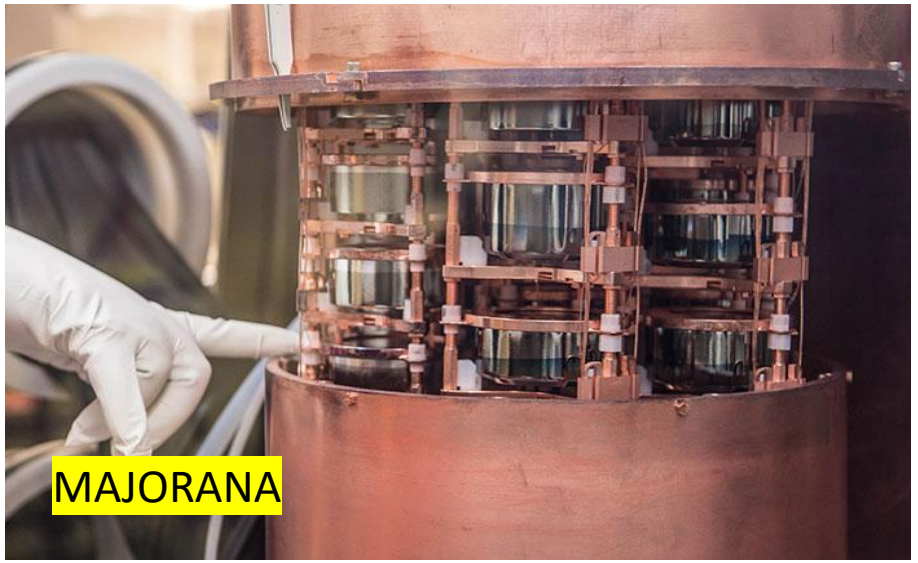


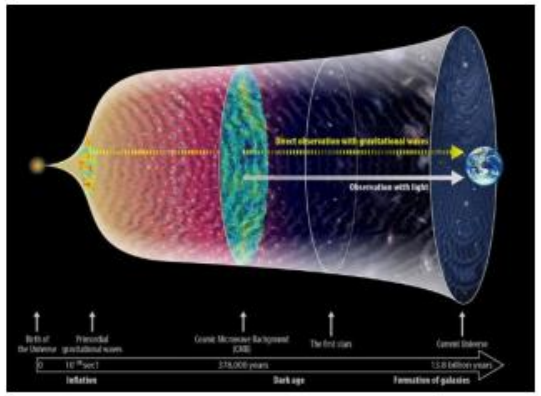




半导体探测器的应用 II—分数电荷

- 自由的分数电荷粒子的寻找
- 稀有事例寻找，要求低本底、高分辨
- MAJORANA实验组采用高纯锗半导体探测器开展了分数电荷粒子的研究





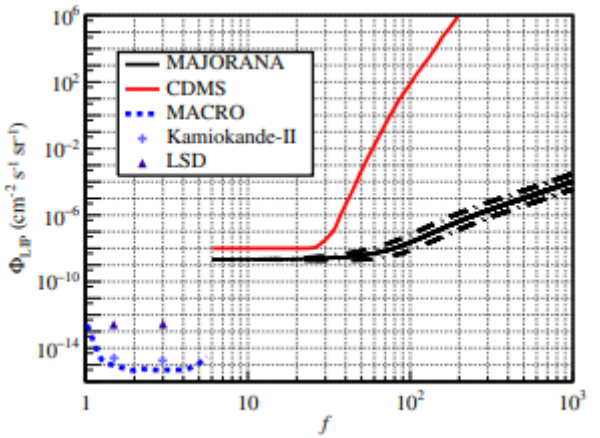
宇宙演化早期



超新星爆发



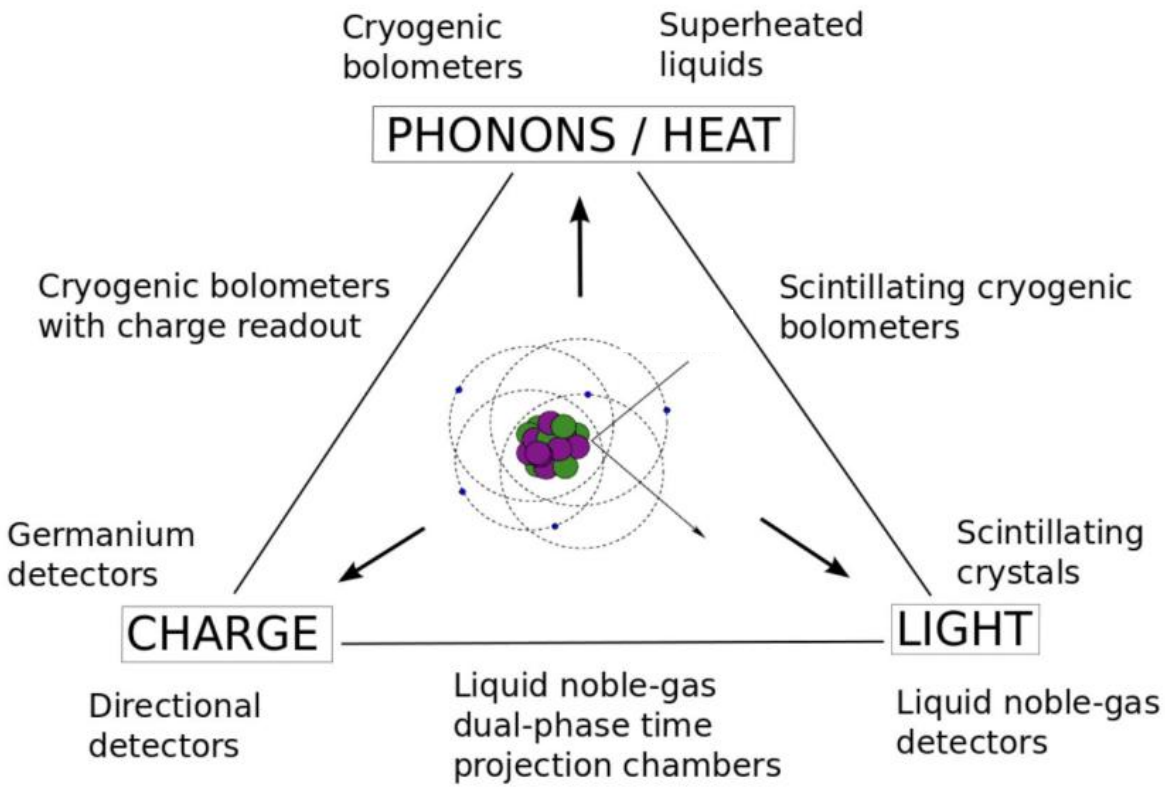
广延大气簇射



Phys. Rev. Lett. 120, 211804

粒子探测

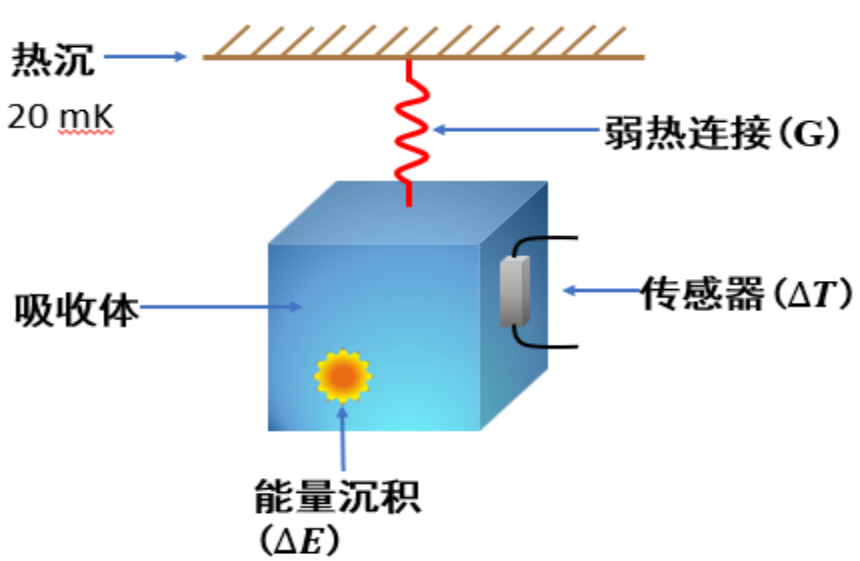
- 基于“光信号”进行探测
  - 闪烁（光）探测器
- 基于“电荷信号”进行探测
  - 气体探测器——电子-离子
  - 半导体探测器——电子-空穴
- 基于“声子信号”进行探测
  - 量热器

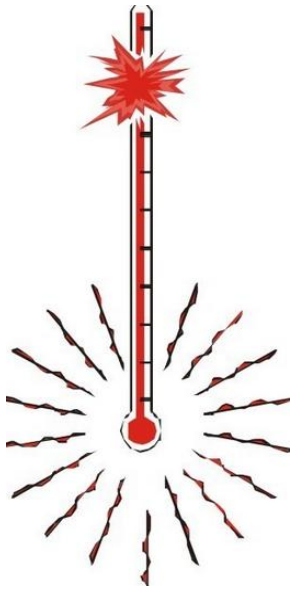




微量热器

- 入射粒子与物质作用沉积能量，绝大部分都会转变为热量—产生“声子”
- 利用温度传感器“收集”声子
- 根据温度变化量得到粒子能损
  - 需要极低温度下实现
- 特点：顶级的能量分辨



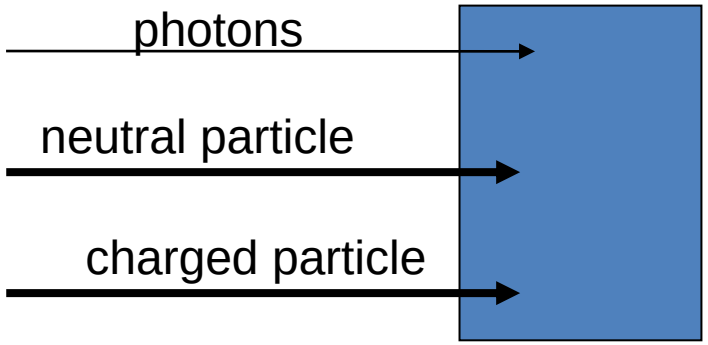


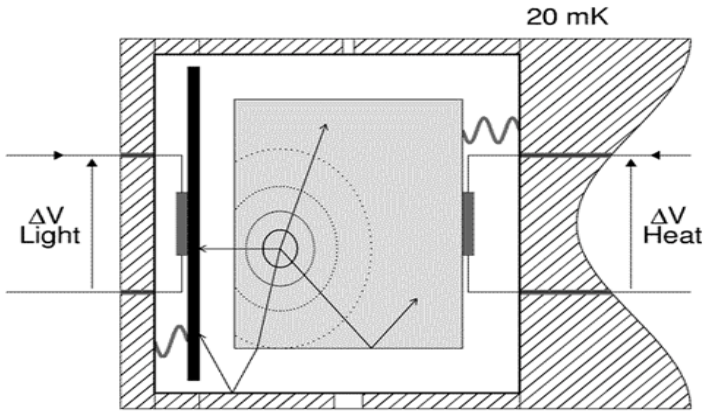
闪烁光：~300 eV

电子-离子对：~ 30 eV

电子-空穴对：~3 eV

声子：~meV

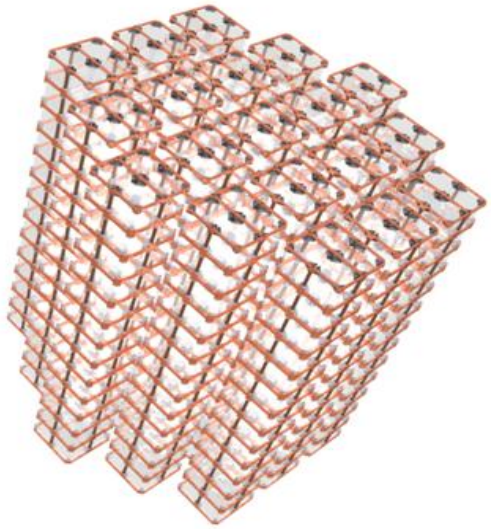


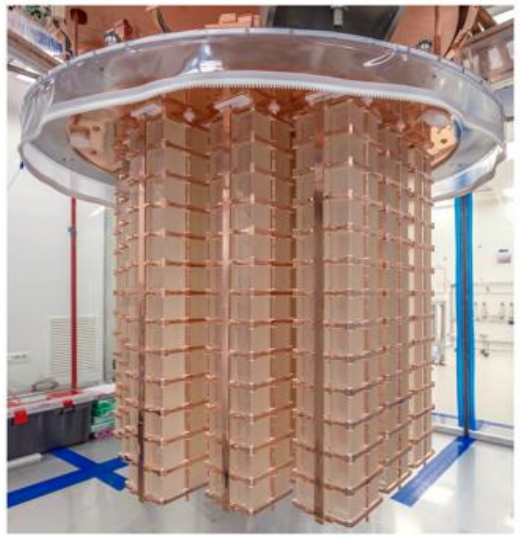


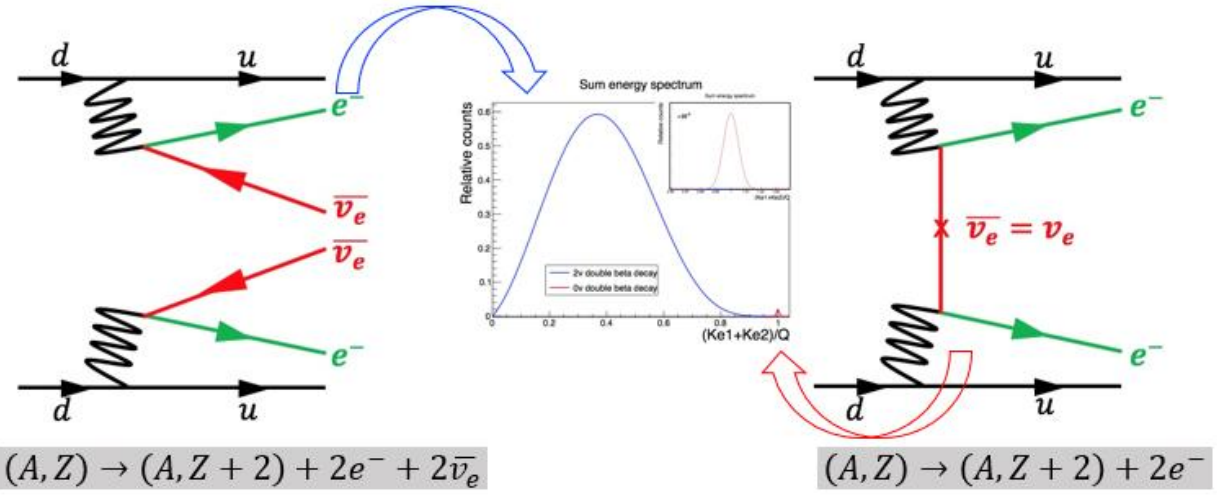


微量热器的应用 II —稀有衰变

- 无中微子双贝塔衰变实验
- 稀有事例寻找，要求低本底、高分辨
- CUORE实验选择微量热器方案
  - TeO_2晶体
  - 既是“粒子源”，又是探测器自身

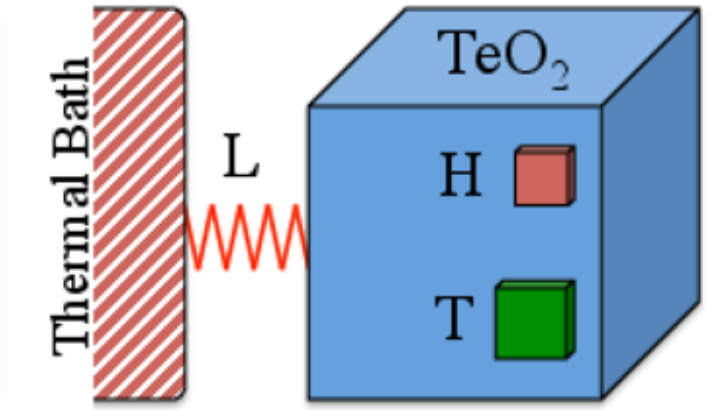




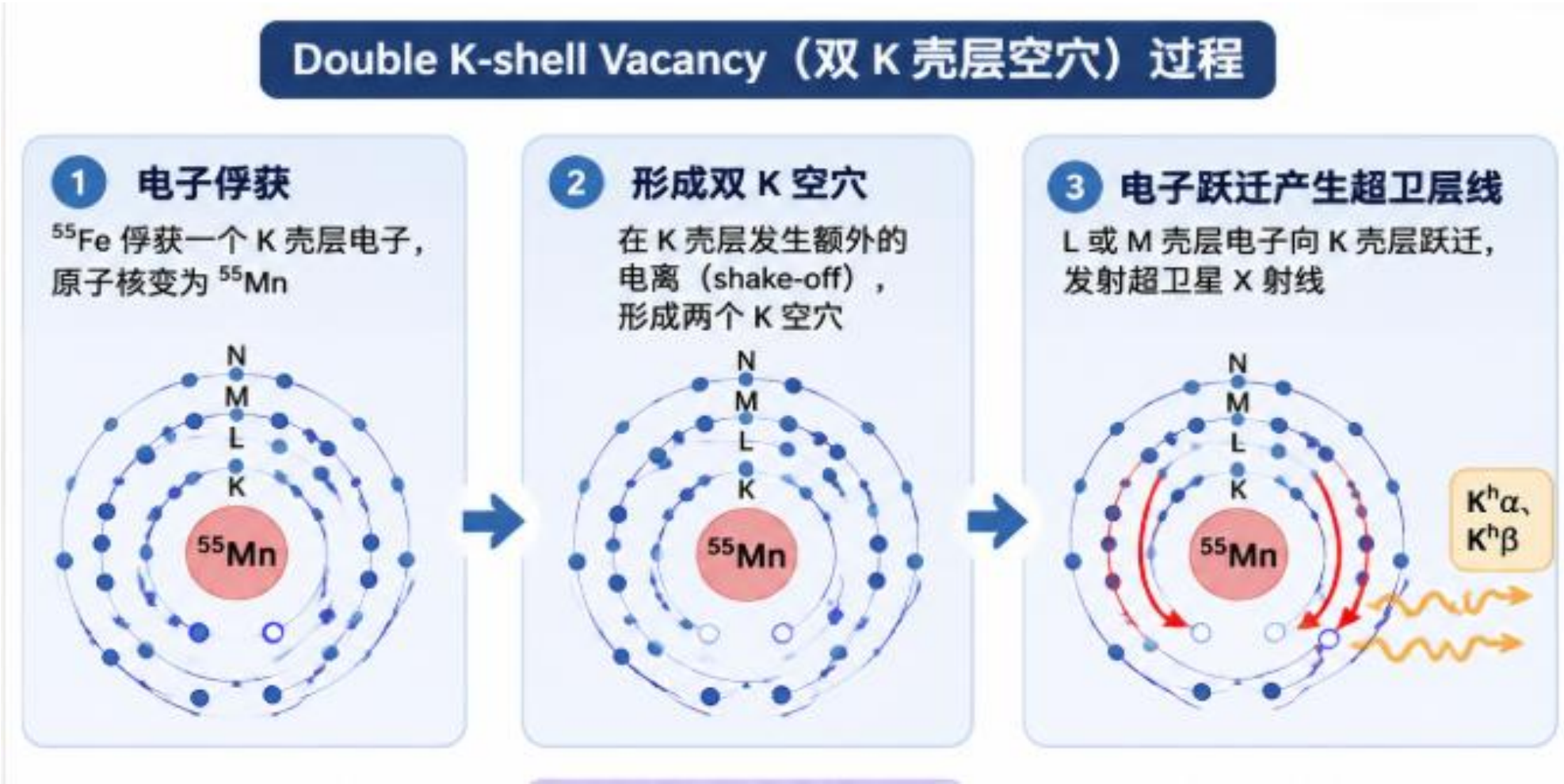


$(A,Z) \rightarrow (A,Z+2) + 2e^- + 2\overline{\nu_e}$

$(A,Z) \rightarrow (A,Z+2) + 2e^-$

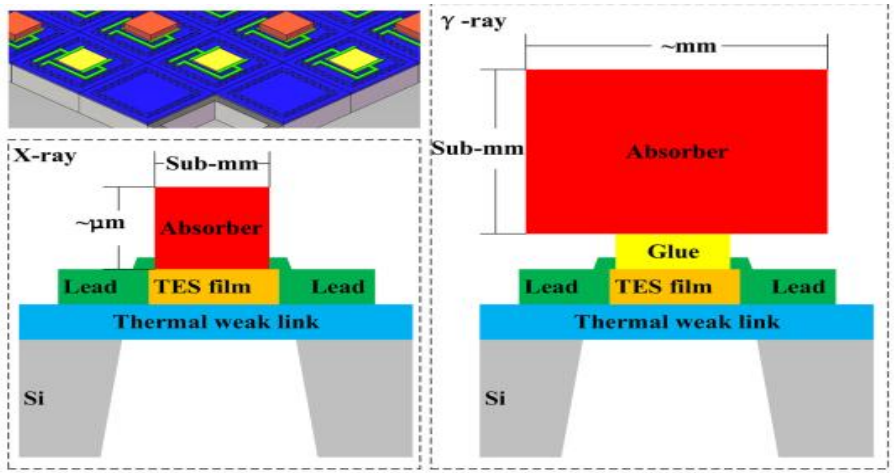


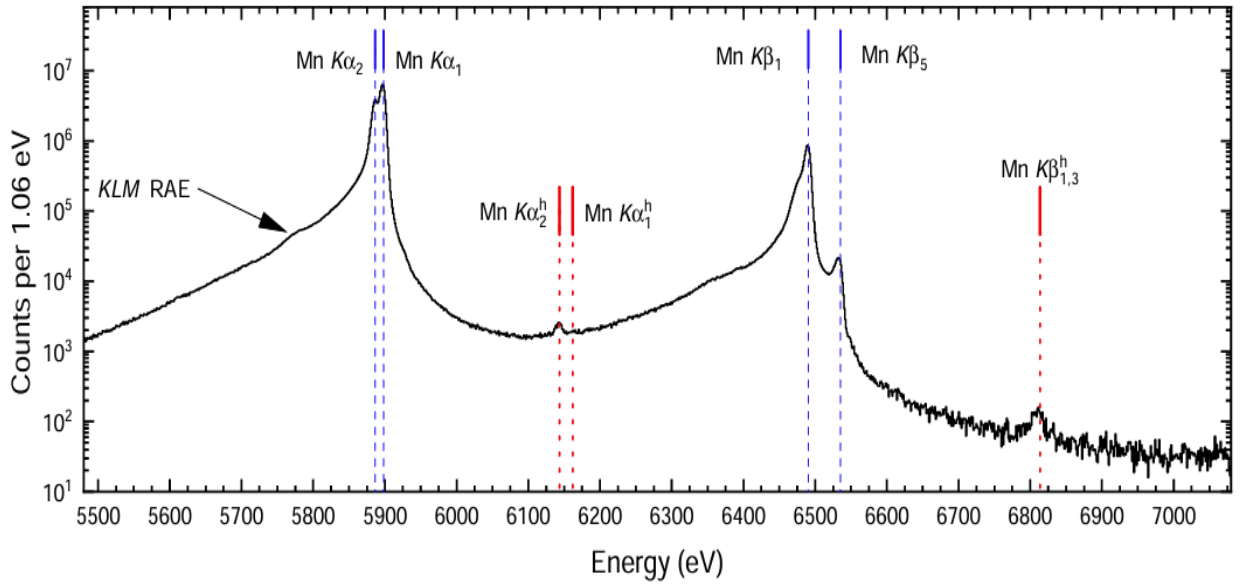
KX超卫星线

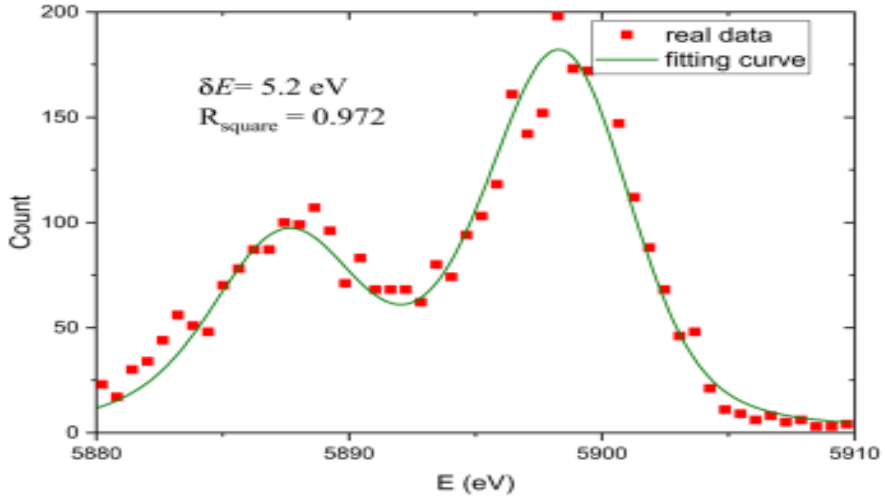

Double K-shell Vacancy（双 K 壳层空穴）过程
1 电子俘获
^{55}Fe 俘获一个 K 壳层电子，原子核变为 ^{55}Mn
N
M
L
K
^{55}Mn
2 形成双 K 空穴
在 K 壳层发生额外的电离（shake-off），形成两个 K 空穴
N
M
L
K
^{55}Mn
3 电子跃迁产生超卫层线
L 或 M 壳层电子向 K 壳层跃迁，发射超卫星 X 射线
N
M
L
K
^{55}Mn
$K^h\alpha$、$K^h\beta$

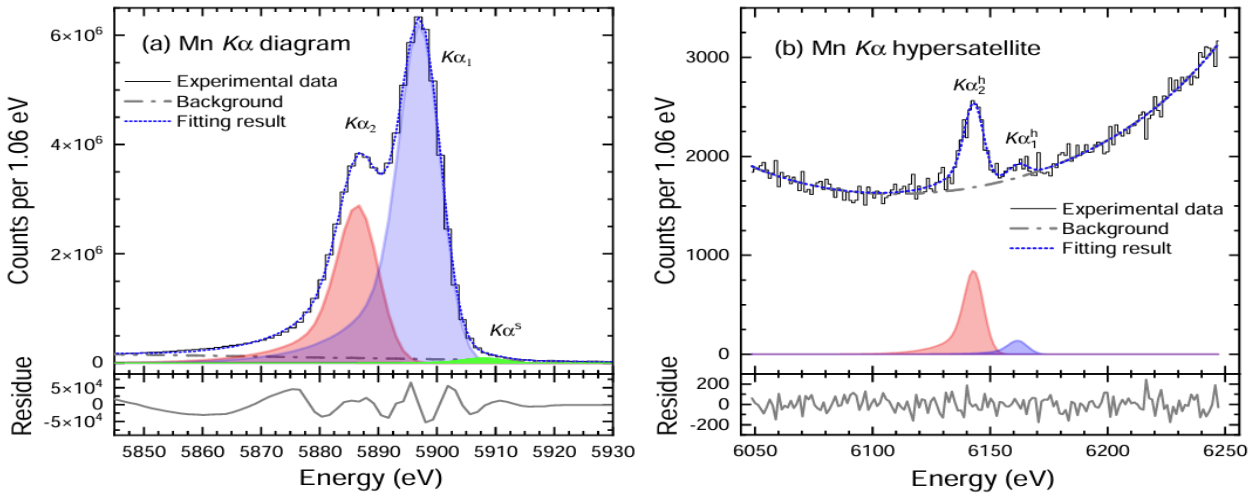


KX超卫星线


X-ray
Sub-mm
~μm
Absorber
Lead
TES film
Lead
Thermal weak link
Si
γ -ray
~mm
Sub-mm
Absorber
Glue
Lead
TES film
Lead
Thermal weak link
Si

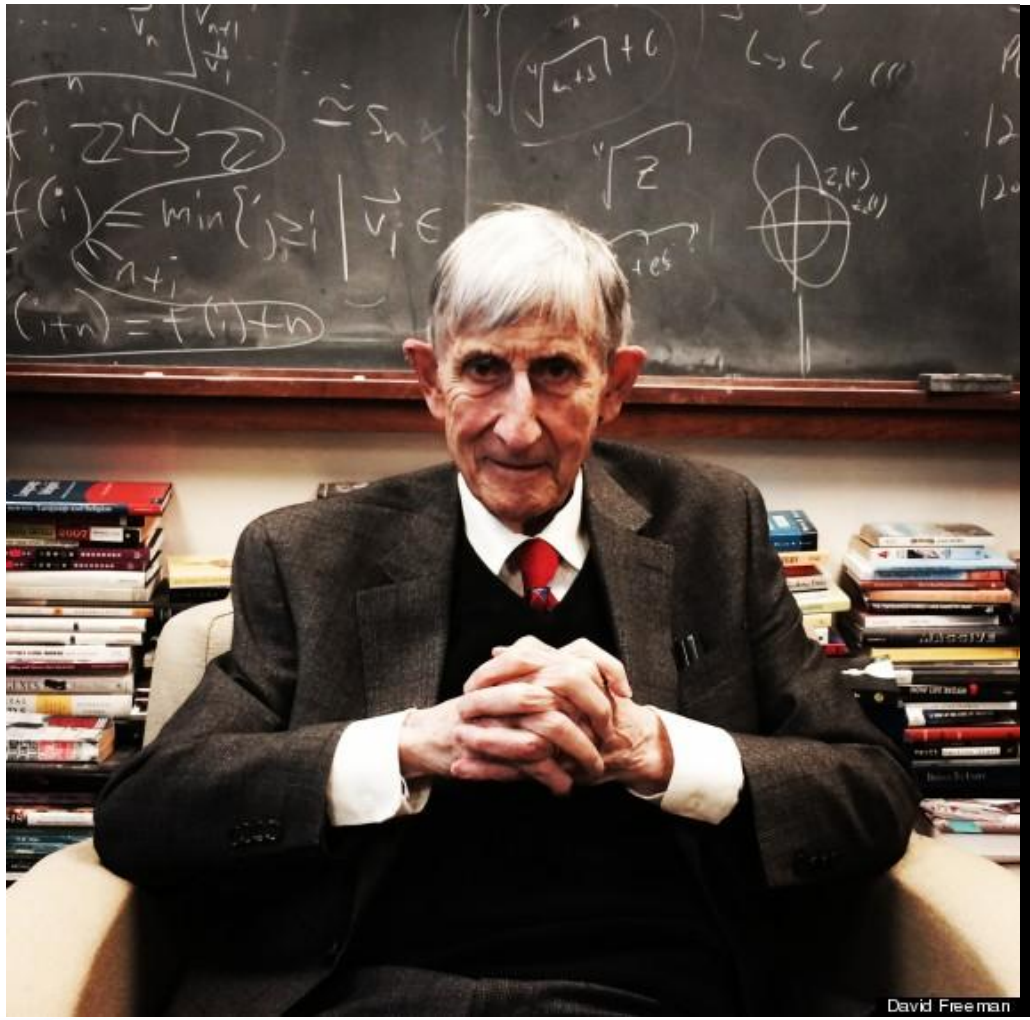

Mn Kα2
Mn Kα1
Mn Kβ1
Mn Kβ5
KLM RAE
Mn Kα2h
Mn Kα1h
Mn Kβ1,3h
Counts per 1.06 eV
Energy (eV)


real data
fitting curve
δE= 5.2 eV
R square = 0.972
Count
E (eV)


(a) Mn Kα diagram
Experimental data
Background
Fitting result
Kα1
Kα2
Kαs
Counts per 1.06 eV
Residue
Energy (eV)
(b) Mn Kα hypersatellite
Kα2h
Kα1h
Experimental data
Background
Fitting result
Counts per 1.06 eV
Residue
Energy (eV)



总结



New directions in science are launched by new tools much more often than by new concepts. The effect of a concept-driven revolution is to explain old things in new ways. The effect of a tool-driven revolution is to discover new things that have to be explained.

—Freeman Dyson

