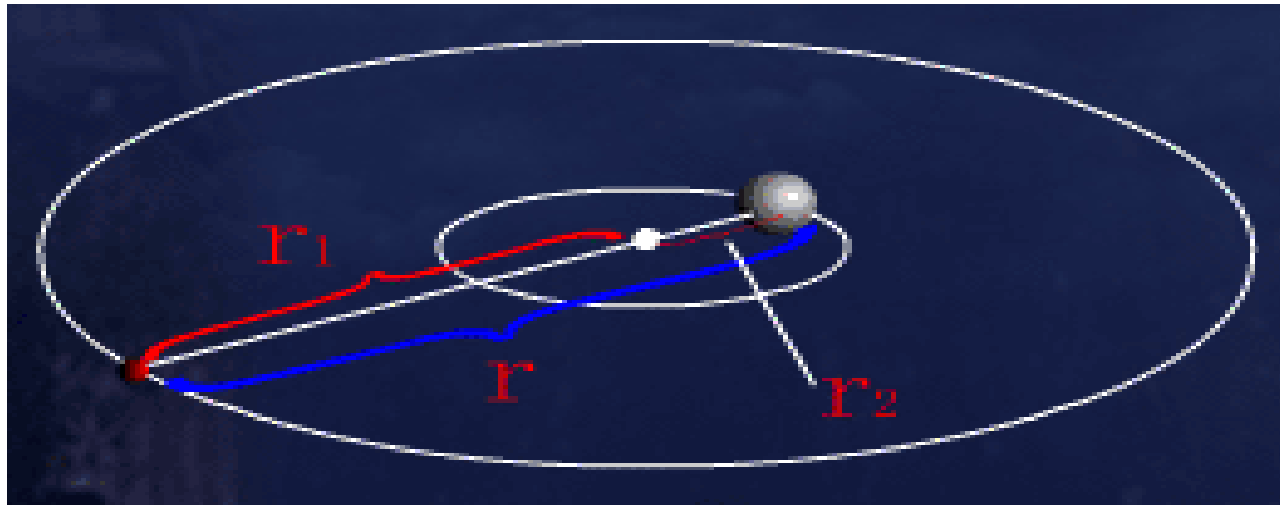


上堂课内容小结

- 普朗克量子理论
- 光电效应
- 氢原子光谱线系
- 玻尔氢原子理论
- 夫兰克-赫兹实验
- 类氢原子
- 奇异原子

两体问题的质心系

玻尔理论 假定电子绕固定不动的核旋转，事实上，只有当核的质量无限大时才可以作这样的近似。而氢核只比电子重约一千八百多倍，这样的处理显然不够精确。实际情况是核与电子绕它们共同的质心运动。



里德伯常量的修正

$$R_H = \frac{2\pi^2 m_e e^4}{(4\pi\epsilon_0)^2 h^3 c}$$

- 玻尔理论值与实验值的万分之五的误差！

- 原子核质量不是无穷大！

$$\mu = \frac{M_H m_e}{M_H + m_e}$$

- 两体问题：约化质量

- 用 μ 替换量子化轨道半径、能量、里德伯常数中的 m_e

$$R_H = \frac{2\pi^2 \mu e^4}{(4\pi\epsilon_0)^2 h^3 c} = \frac{2\pi^2 m_e e^4}{(4\pi\epsilon_0)^2 h^3 c} \cdot \frac{1}{1 + \frac{m_e}{M_H}}$$

- 修正的里德伯常数 R_H 与实验值是高度吻合的，消除了玻尔理论值与实验值的万分之五的误差。
- 测量里德伯常数 \Rightarrow 原子核（同位素）质量？

$$M_H \rightarrow \infty$$

$$R_\infty = 2\pi^2 m_e e^4 / (4\pi\epsilon_0)^2 h^3 c,$$

由玻尔理论得到的里德伯常数，认为核质量无穷大的情形。

$$R_\infty = 109\,73.7315 \text{ mm}^{-1}$$

$$R_H = 109\,67.758 \text{ mm}^{-1}$$

测量里德伯常数
 \Rightarrow 原子核（同位素）质量

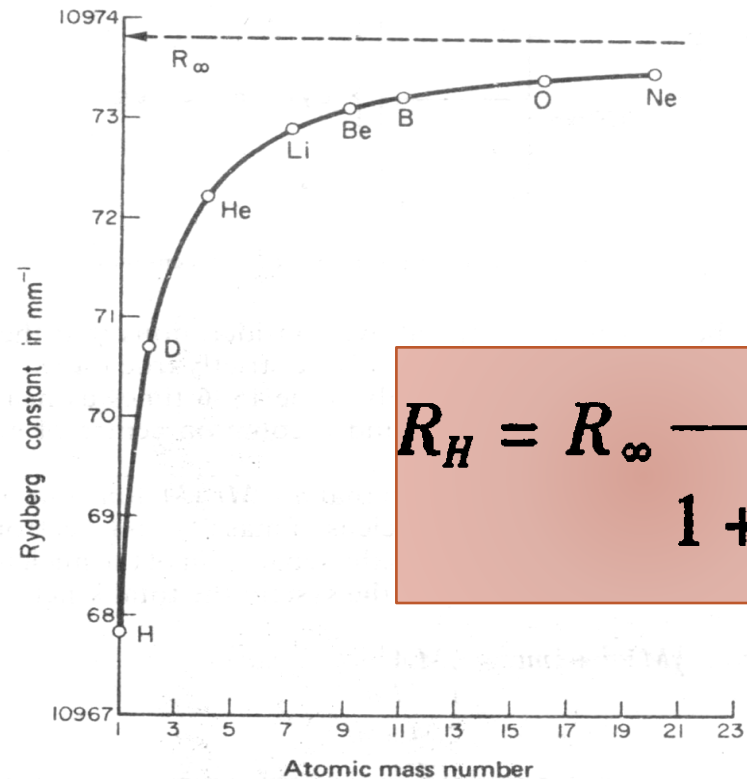


Fig. 7.6 Variation of the Rydberg constant with the atomic mass number.

$$R_H = R_\infty \frac{1}{1 + \frac{m_e}{M_H}}$$

氘存在的实验确认

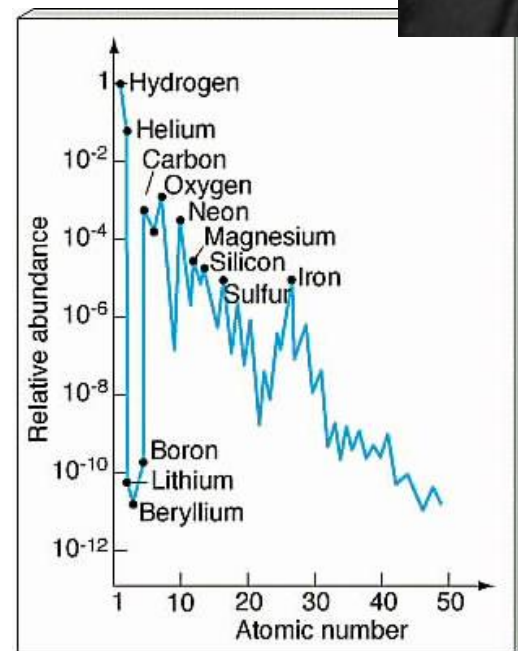
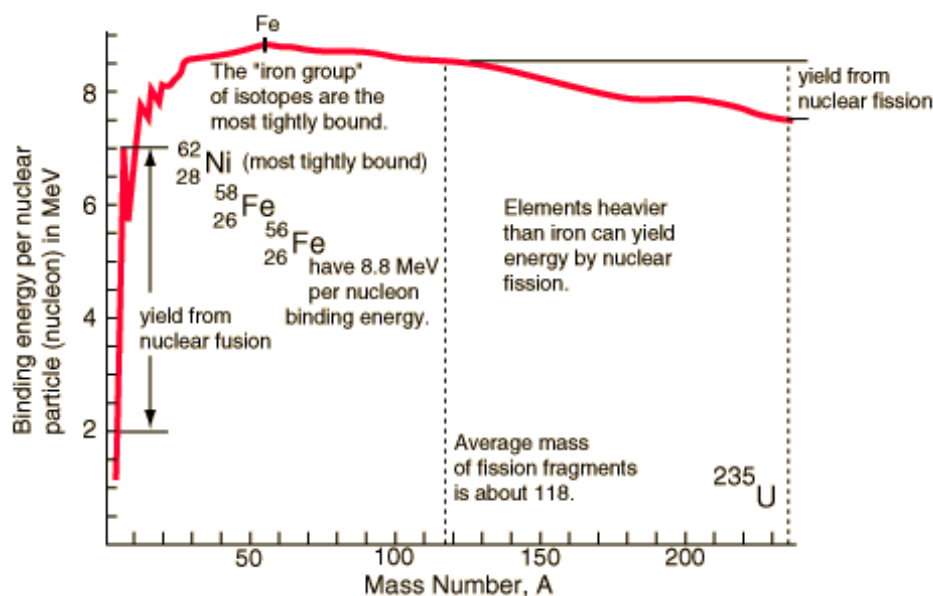
- R与核质量的相关关系 $R_D = R_\infty \frac{1}{1 + \frac{m_e}{M_D}}$
- 氘（重氢）含量很低，(现在已知是氢的0.0148%)
⇒ 谱线很弱，不易观察到
- 1932年美国的化学家尤雷(H·Ureg)把3升液氢蒸发到不足1毫升，提高了剩余液氢中氘的含量(氢比氘容易蒸发) ⇒ 注入放电管 ⇒ 测量光谱
- 测量结果：在氢的巴耳末α线(656.279nm)的旁边还有一条谱线(656.100nm)，两者只差0.179nm

$$\frac{R_H}{R_D} = \frac{1 + \frac{m_e}{M_D}}{1 + \frac{m_e}{M_H}} = \frac{2M_H + m_e}{2(M_H + m_e)} = 0.9997278$$

- 有兴趣可以自己计算谱线的波长差异 $\Delta\lambda = \lambda_H - \lambda_D = \lambda_H(1 - \frac{R_H}{R_D})$
- 这一工作促进了同位素化学的进展 ⇒ 1934年诺贝尔化学奖

“Cosmochemistry” — 宇宙化学

由于发现重氢在1934年获得诺贝尔化学奖的尤雷于1951年第一次发表了元素在宇宙间的分布数据：氢最多，氦次之，再次为碳、氮、氧，并且随相对原子质量的增加而迅速减少，但到了铁时有一个突然增多，而比铁更重的元素则又逐渐减少。



类氢光谱

- 所谓类氢离子，是指核电荷数 $Z > 1$ ，而核外只有一个电子的离子，如 He^+ 、 Li^{2+} 、 Be^{3+} 等等
- 和氢原子的差异：电荷数 Z
- 在光谱学中，把中性的H、一次电离的 He^+ 、二次电离的 Li^{2+} 等等分别记作H I、He II、Li III……。这一个系列叫作氢原子的等电子序列
- 类氢光谱举例：

$$\begin{aligned}\frac{1}{\lambda} &= R_A Z^2 \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{n'^2} \right) \\ &= R_A \left(\frac{1}{(n/Z)^2} - \frac{1}{(n'/Z)^2} \right)\end{aligned}$$

H ($Z=1$), He^+ ($Z=2$), Li^{2+} ($Z=3$), Be^{3+} ($Z=4$)

类氢光谱(续)

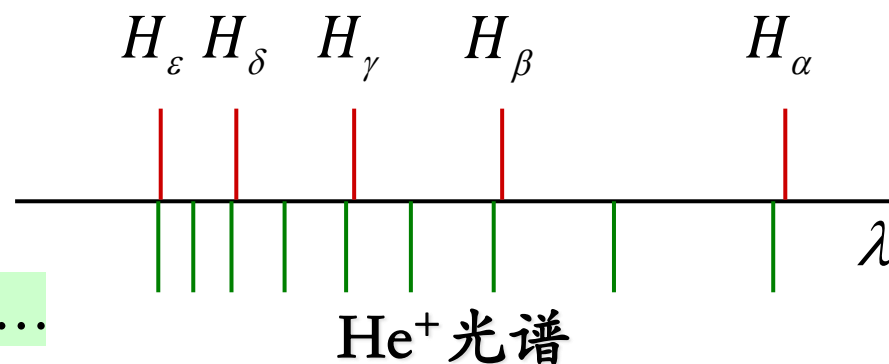
毕克林线系： 1897年, 毕克林从星光光谱中发现类巴耳末系. 在地球上的氢是观察不到的, 最初以为是一种特殊的氢所发的. 后来发现在氢气中掺杂些氦就能出现这线系, 这才认定毕克林系是氦离子所发.

$$\frac{1}{\lambda} = R_{He^+} 2^2 \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{n'^2} \right)$$

$$n = 4 \quad n' = 5, 6, 7, 8, 9 \dots$$

$$\frac{1}{\lambda} = R_{He^+} \left(\frac{1}{(2)^2} - \frac{1}{(k)^2} \right)$$

$$k = \frac{5}{2}, 3, \frac{7}{2}, 4, \frac{9}{2} \dots$$



它与氢的巴耳末系公式相似, 差别仅仅是 k 可取半整数, 所以谱线比氢的多。由于 $R_{He^+} > R_H$, 所以谱线相对氢紫移。

爱因斯坦称玻尔理论是一个“伟大的发现”。

非量子化轨道

- 在实验上观察到在巴耳末等系限外有**连续谱**！
- 连续谱是自由电子与氢离子结合时产生的光谱
- 自由电子与氢离子结合成一个氢原子时，也即电子从非量子化轨道跃迁至一个量子化轨道时，原子就向外辐射一个光子，光子的能量为

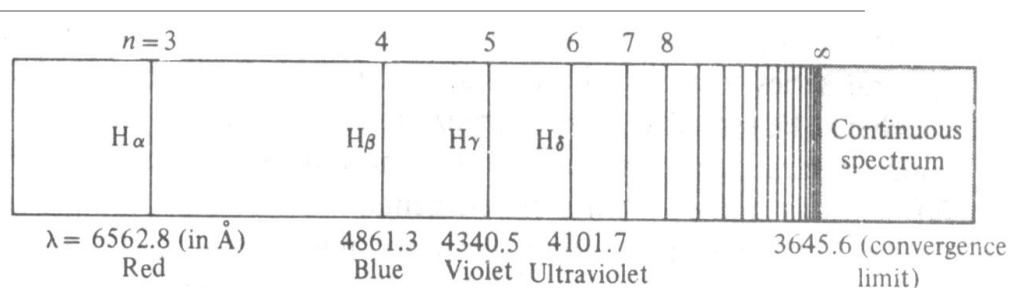
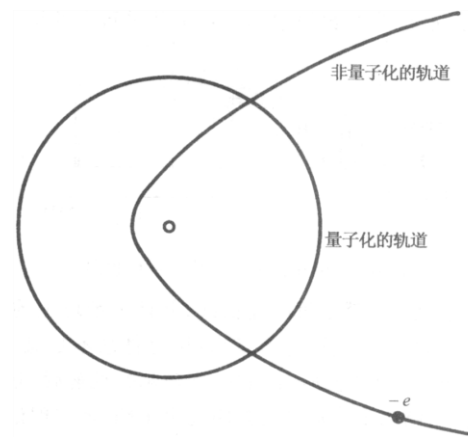


Figure 4.3 Diagram of the Balmer series of atomic hydrogen. (The wavelengths are the values in air.)



$$h\nu = E - E_n = \frac{1}{2} m_e v_0^2 - \left(-\frac{hcR}{n^2} \right) = \frac{1}{2} m_e v_0^2 + \frac{hcR}{n^2}$$

里德伯原子

- 当原子中有一个电子被激发到很高的能级(n 很大)时, 称其处在里德伯态, 并称这时的原子叫里德伯原子。
- 目前在实验室里已制备出 $n=116$ 的氢原子, 射电天文观察已探测到 $n=630$ 的高激发态原子。
- 对 $n=30$, $r_{30} \sim 48\text{nm}$; 对 $n=250$, $r_{250} \sim 3.3\mu\text{m}$ 接近细菌大小。

$$r_n = a_1 \frac{n^2}{Z}$$

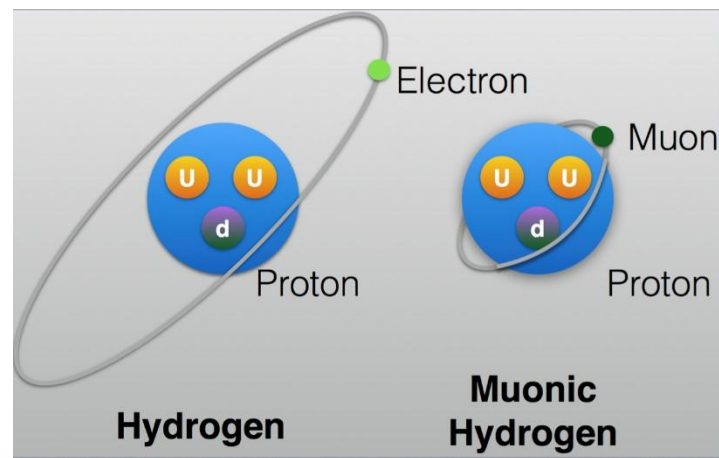
- 里德伯原子处于某能级的平均寿命近似与 $n^{4.5}$ 成正比, 而 n 较低时, 存在寿命比较短

里德伯原子（续）

- 当受到外界刺激时，里德伯原子向较低能级的跃迁几率较大，这样就能释放较多的能量，为应用里德伯原子产生高强度激光提供了依据。
- 里德伯原子中，高量子态的电子离核较远，受到的束缚较弱，很容易被电离。例如， $n=100$ 的氢原子的电离能仅为 10^{-3}eV 。可利用这种性质进行同位素分离。
- 先加外电场使里德伯原子电离，然后加磁场可使不同质量的同位素分离
- 目前，对里德伯原子的研究非常活跃，这些研究已在射电天文、等离子体物理和激光物理等领域取得了可喜成果。

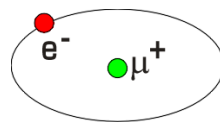
奇异原子

- 指通常原子轨道上一个电子被其它带负电的粒子取代，而其余仍为电子的原子。轨道上虽是电子，但原子核已不再由质子组成，而由其它带正电的粒子组成的原子。
- 一个 μ^- 子代替电子 $e^- \Rightarrow$ μ^- 子原子
- 一个正 μ^+ 子与一个电子 $e^- \Rightarrow$ 正 μ^+ 子素
- 一对正负电子(e^+ , e^-) \Rightarrow 正负电子偶素
- 夸克偶素：一对正反粲夸克
- 此外，还有质子 p 与 K^- 介子， p 与 π^- 介子组成的原子体系等等，泛称介子原子

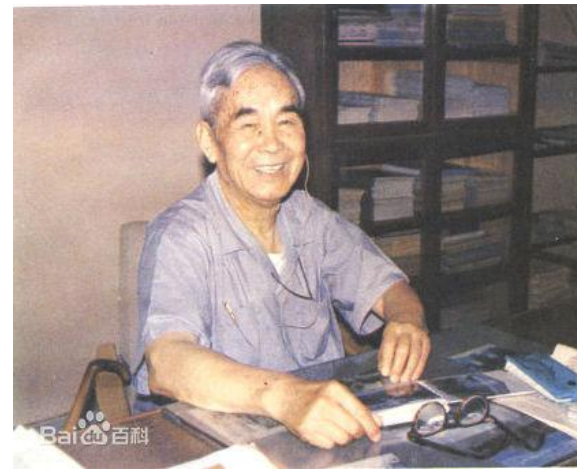


Muon 轻子简介

- 1936年Anderson and Neddermeyer 发现muon轻子
- 与电子质量关系: $m_\mu = 207 \cdot m_e$
- 弱衰变导致: “long” lifetime (2.2 微妙) \rightarrow beam and probe
- 主要衰变 $\mu \rightarrow e \nu_e \nu_\mu$ (parity violating)
- 极化束流: muon beam from pion decay
- Muon 束缚态 (muon原子: μ^-p , μ^-d ; muonium: μ^+e^- ; dimuon: $\mu^+\mu^-$)



- 对新物理更敏感 $(m_\mu/m_e)^2 \approx 40,000$
- Lepton flavor violation ($\mu \rightarrow e$) extremely small in SM
- 容易被探测: $P_{\text{detection}} \approx 1$



张文裕所长 (1978-1984), 高能所第一任所长, 科大近物系主任, 1947年在普林斯顿大学巴尔默实验室发现muonic atom。

电子偶素(positronium)

正电子的质量与电子的质量相同，里德伯常数是

$$R_P = \frac{R_\infty}{1 + m_e/M} = \frac{R_\infty}{1 + m_e/m_e} = \frac{R_\infty}{2}$$

所谓电离能，就是把电子偶素从它的基态($n=1$)激发到 $n=\infty$ 态所需要的能量

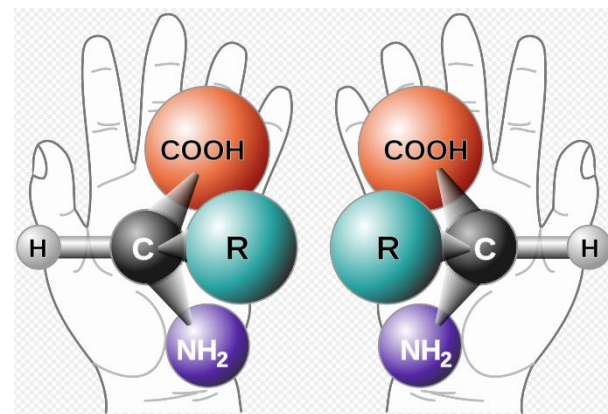
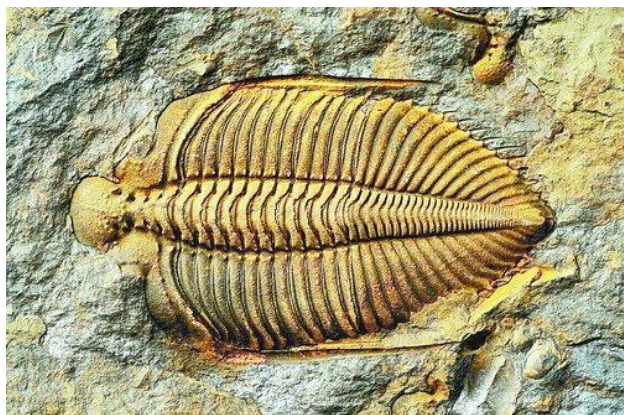
$$E_n = -hcR_P \frac{1}{n^2}$$

$$\begin{aligned} E_{\text{电离}} &= E_\infty - E_1 = 0 - (-hcR_P) = hcR_P \\ &= hc \frac{R_H}{2} = 6.8\text{eV} \end{aligned}$$

$$\frac{1}{\lambda} = \tilde{\nu} = R_P \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

$$\frac{hc}{\lambda} = h\nu = hcR_P \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

从对称性说起

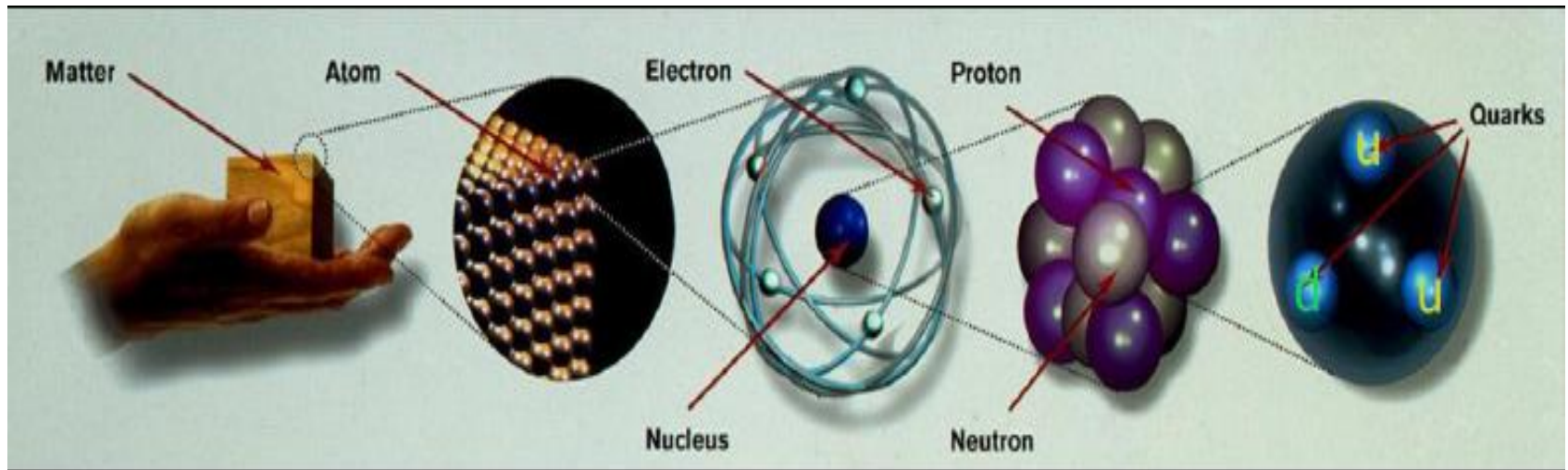


对称性无处不在

原子物理学2025春

粒子物理中的对称性

- 基本粒子及其相互作用，转化



- 大量全同或者在某些方面可以看成全同的性质
- 对称性是研究粒子物理的重要手段

对称性的意义

- 大大简化系统
- 每一个对称性都意味着某种属性的不可分辨性
 - 空间平移对称性
 - ❖ 无法知晓空间任意点的绝对坐标
 - ❖ 在任何空间点的规律都一样
 - 时间平移对称性
 - ❖ 无法知晓绝对时间
 - ❖ 任何时刻的物理规律都一样

Noether's theorem (诺特定理)

- Amalie Emmy Noether:
 - 1882.3.23 - 1935.4.14
 - 德国数学家
- 每一个连续对称性，都伴随着一个守恒量
 - 空间平移对称 \Rightarrow 动量守恒
 - 时间平移对称 \Rightarrow 能量守恒
 - 空间旋转对称 \Rightarrow 角动量守恒
 - ...



对称性破缺

- 对称性破缺
 - 弱相互作用下P宇称不守恒



- C宇称对称破缺 ==> 正物质主导的宇宙?

- 时间对称性破缺?

每一个破缺的对称性，都加深了对物质世界更深的理解

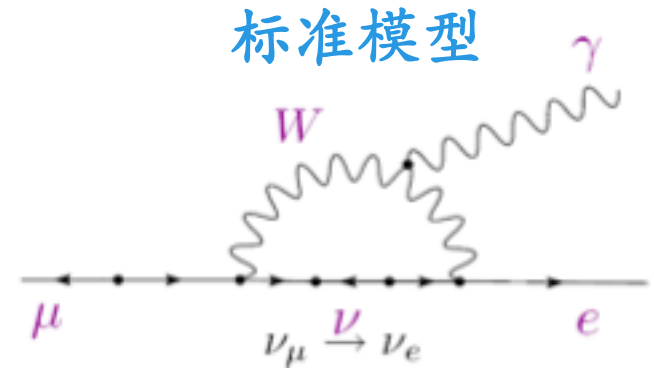


带电轻子味破坏过程 ($\mu \rightarrow e \gamma$)

考虑到中微子微小质量后标准模型预言：

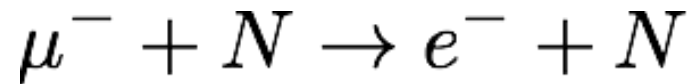
$$BR(\mu \rightarrow e \gamma) = \frac{3\alpha}{32\pi} \left| \sum_{i=2,3} U_{\mu i}^* U_{ei} \frac{\Delta m_{1i}^2}{M_W^2} \right|^2$$
$$< 10^{-54}$$

很多新物理模型可以给出可测量的预言！



对比夸克味改变的中性流过程，带电轻子味改变的中性流没有强相互作用本底的污染，理论预言干净、可靠，是探测新物理的理想探针。

寻找缪轻子到电子转换过程 (cLFV):



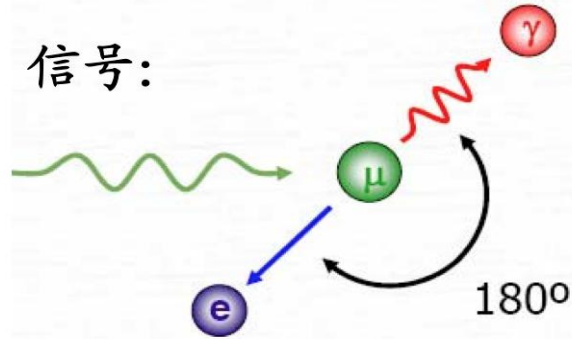
Coherent transition: 缪型原子在1S态 \rightarrow 跃迁机率90% \rightarrow 1S原子末态。电子动量为单能：105 MeV/c, 信号简单、易于测量！

美国MEG实验

$\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$ 衰变实验

$\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$ 衰变: MEG实验@PSI

信号:

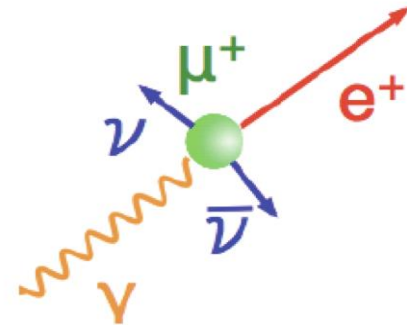


受到随机本底的限制,
提高束流强度无济于事,
最好的预期测量到 10^{-13} 。

2013: 5.7×10^{-13} @90% C.L.
PRL 110 (2013)201801

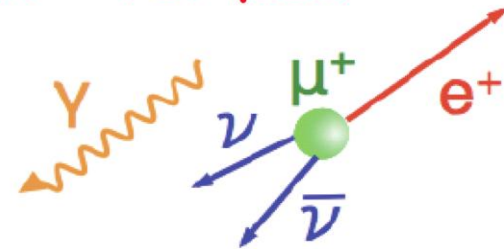
本底较大:

Radiative μ decay: $\mu \rightarrow e \nu \bar{\nu} \gamma$



随机本底:

$\mu \rightarrow e \nu \bar{\nu}$ + 随机 γ 光子



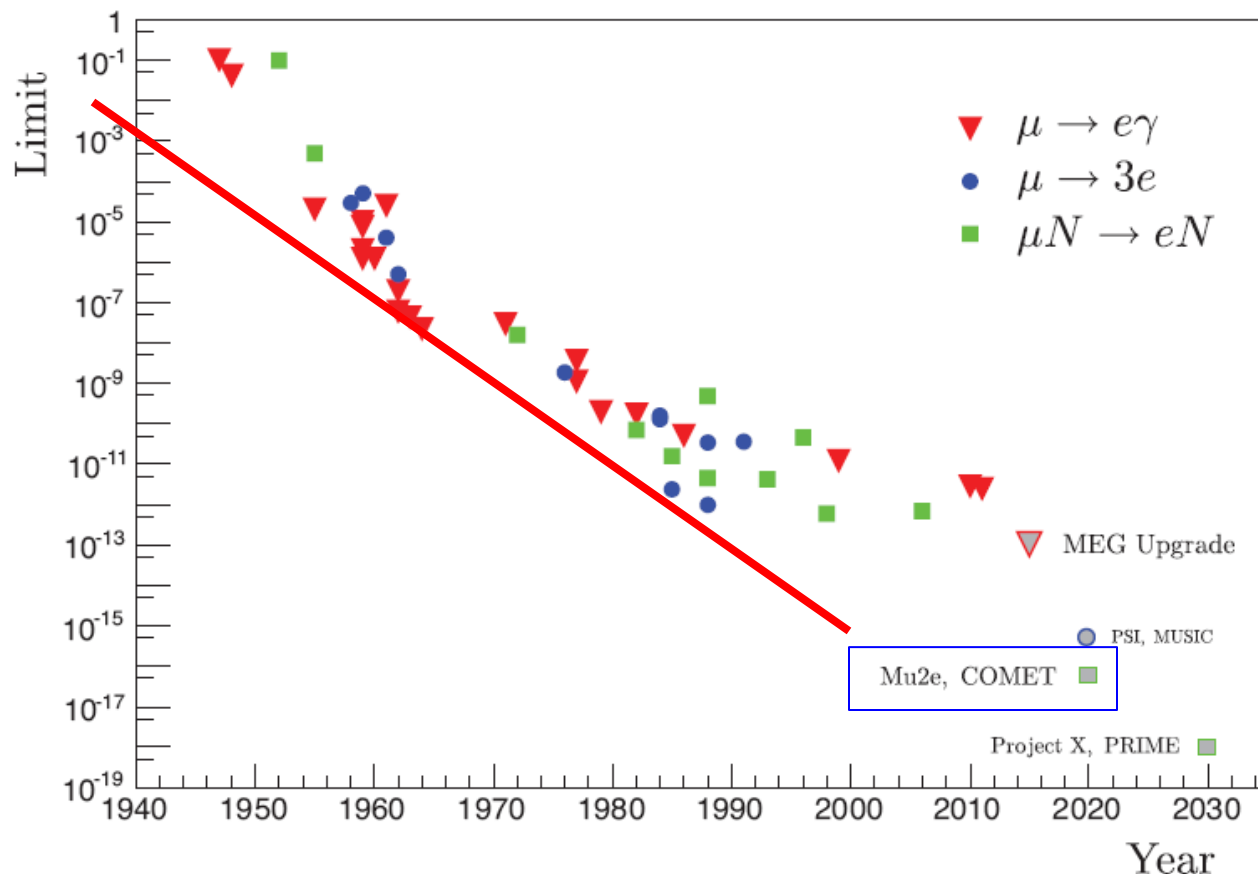
实验状况 ($\mu \rightarrow e \gamma$)

1947年：彭加可夫



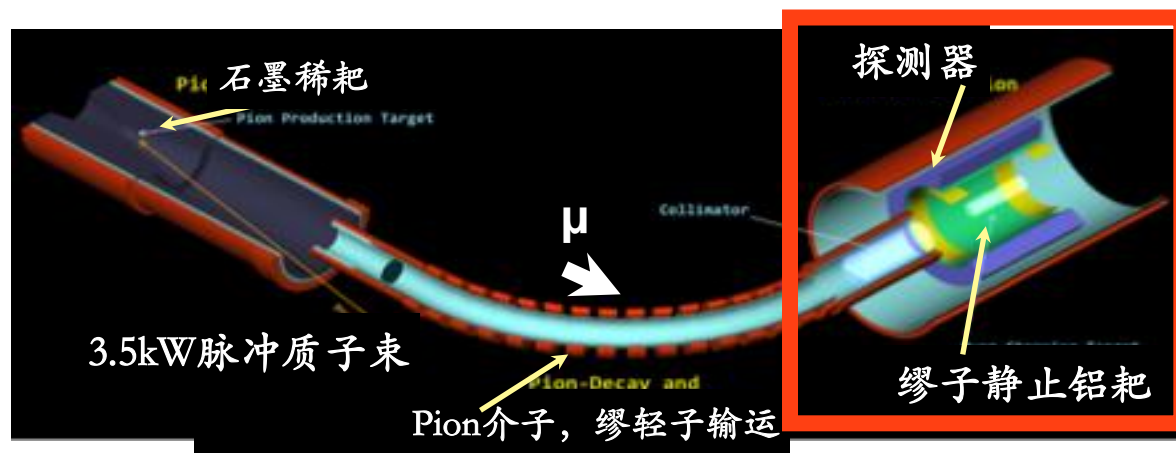
Бруно Понтекорво

[Bruno Pontecorvo](#)

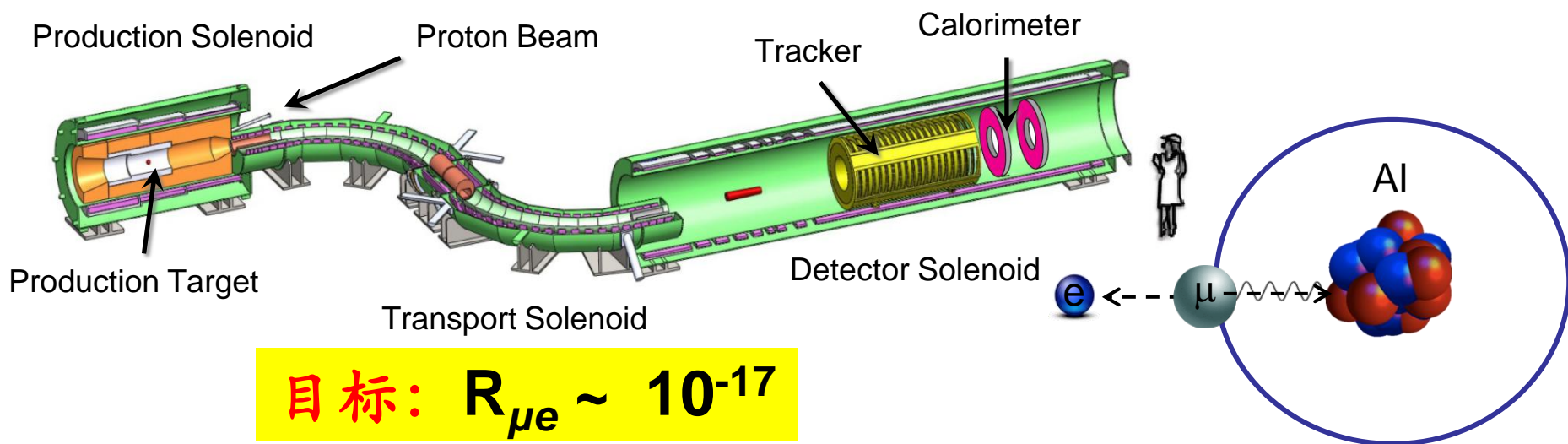


目前最好的上限：在90%置信度下为 5.7×10^{-13} [PRL 110 (2013) 201801]

日本COMET实验和美国Mu2e实验

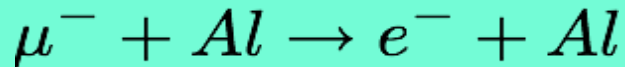


实验方法：带负电缪轻子被铝靶停止，形成1S态缪原子。

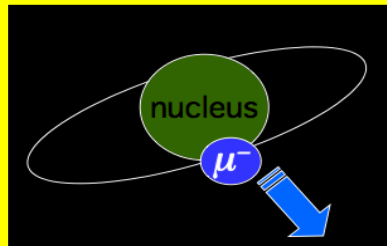


μ原子物理

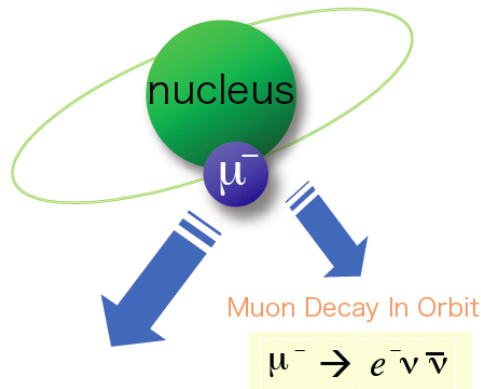
缪轻子到电子转换过程?



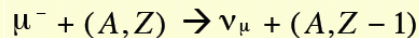
缪轻子被原子俘获形成1S态缪原子，在轨道上发生到电子转换，释放105 MeV/c单能电子。



1s state in a muonic atom



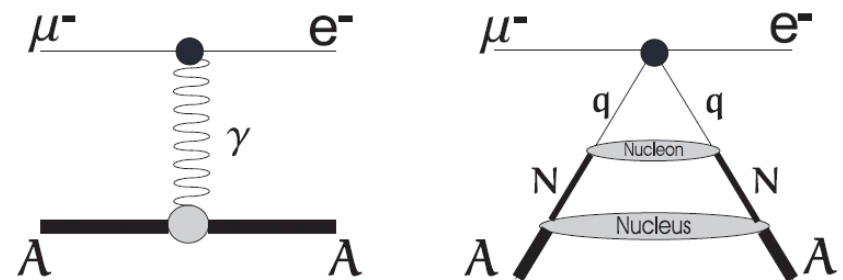
nuclear muon capture



Neutrino-less muon
nuclear capture
(= μ-e conversion)



lepton flavours
changes by one unit



原子物理和量子力学发展史上3类重要的实验:

- 1)证实光量子的实验,如黑体辐射、光电效应、康普顿效应
- 2)证实原子中量子态的实验,如光谱实验、夫兰克-赫兹实验
- 3)证实粒子波动性的实验 (下一章)

玻尔理论的成功和局限

玻尔理论的历史地位

三个革命性的假定，突破了经典力学的束缚，是后来量子力学的“催生婆”

- 从理论上满意地解释了氢原子及类氢离子光谱
- 用已知的物理量计算出了里德伯常数，而且和实验值符合较好（对应原理）
- 较成功地给出了氢原子半径的数据，定量地给出了氢原子的电离能。
- 正确地指出定态和角动量量子化的概念
- 正确地指出原子能级的存在（原子能量量子化）

玻尔理论在人们认识原子结构的进程中有很大的贡献---- 1922年玻尔获诺贝尔物理奖

玻尔理论的局限

- 还保留了经典轨道概念，把微观粒子的运动视为有确定的轨道是不正确的。
- 是半经典半量子理论，存在逻辑上的缺点，即把微观粒子看成是遵守经典力学的质点，同时，又赋予它们量子化的特征，缺乏逻辑一致性（旧量子论）；
- 不能解释光谱线的强度、极化和选择定则，也不能解释比氢原子更复杂的原子中更复杂的光谱现象。

正是这些困难,迎来了物理学的大革命!

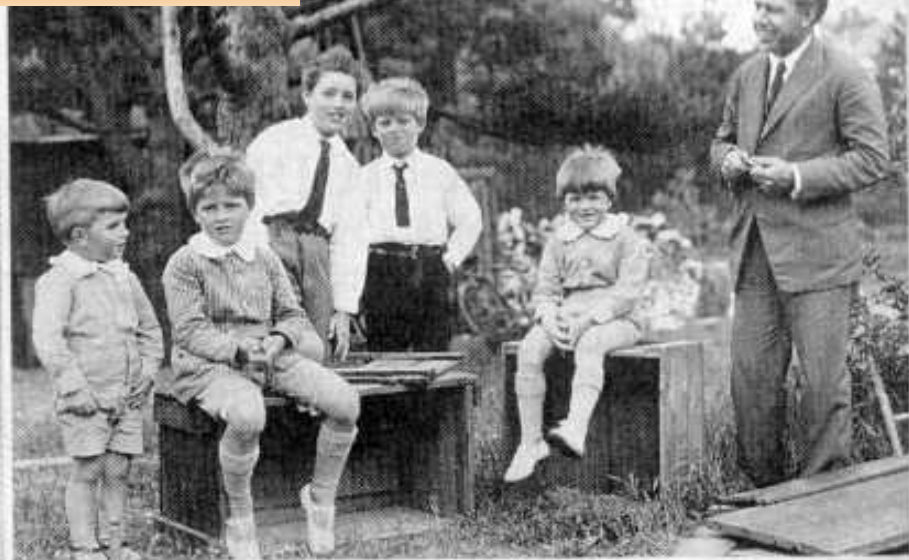
玻尔的其他影响



玻尔研究所

哥本哈根学派 在玻尔研究所里
学术空气很浓，玻尔演讲后与听
众踊跃讨论

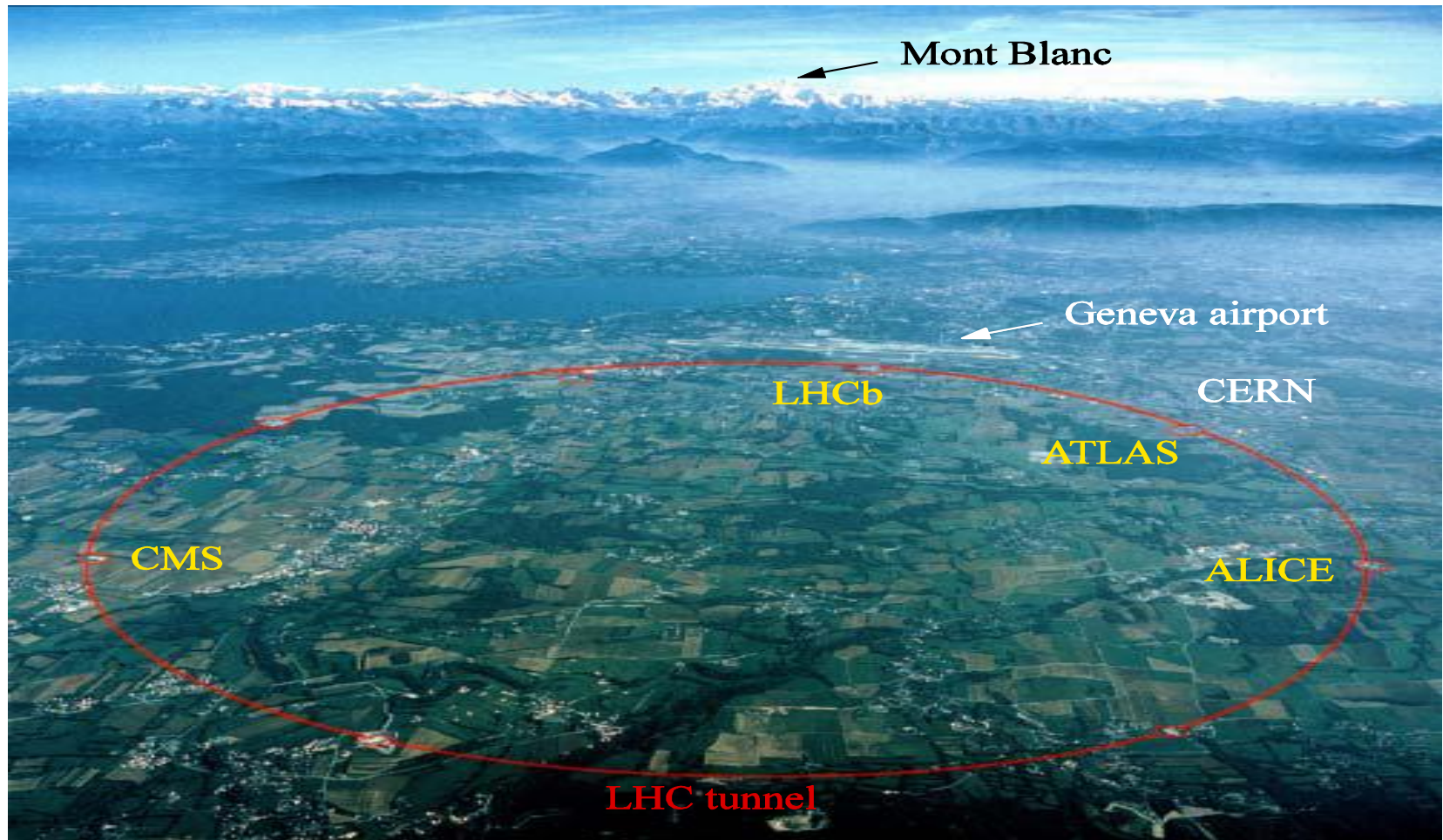
玻尔与五子



玻尔的儿子因为对核模型的研究获得了诺贝尔物理学奖

父子Nobel物理奖得主：布拉格父子；
汤姆逊父子；...

现在法国和瑞士边境线上的西欧核子研究中心
是当年玻尔倡导创建的。大型强子对撞机 (LHC)
就在CERN。



作业

- 杨福家 《原子物理》 第四版71页：
2,4,6,10,11