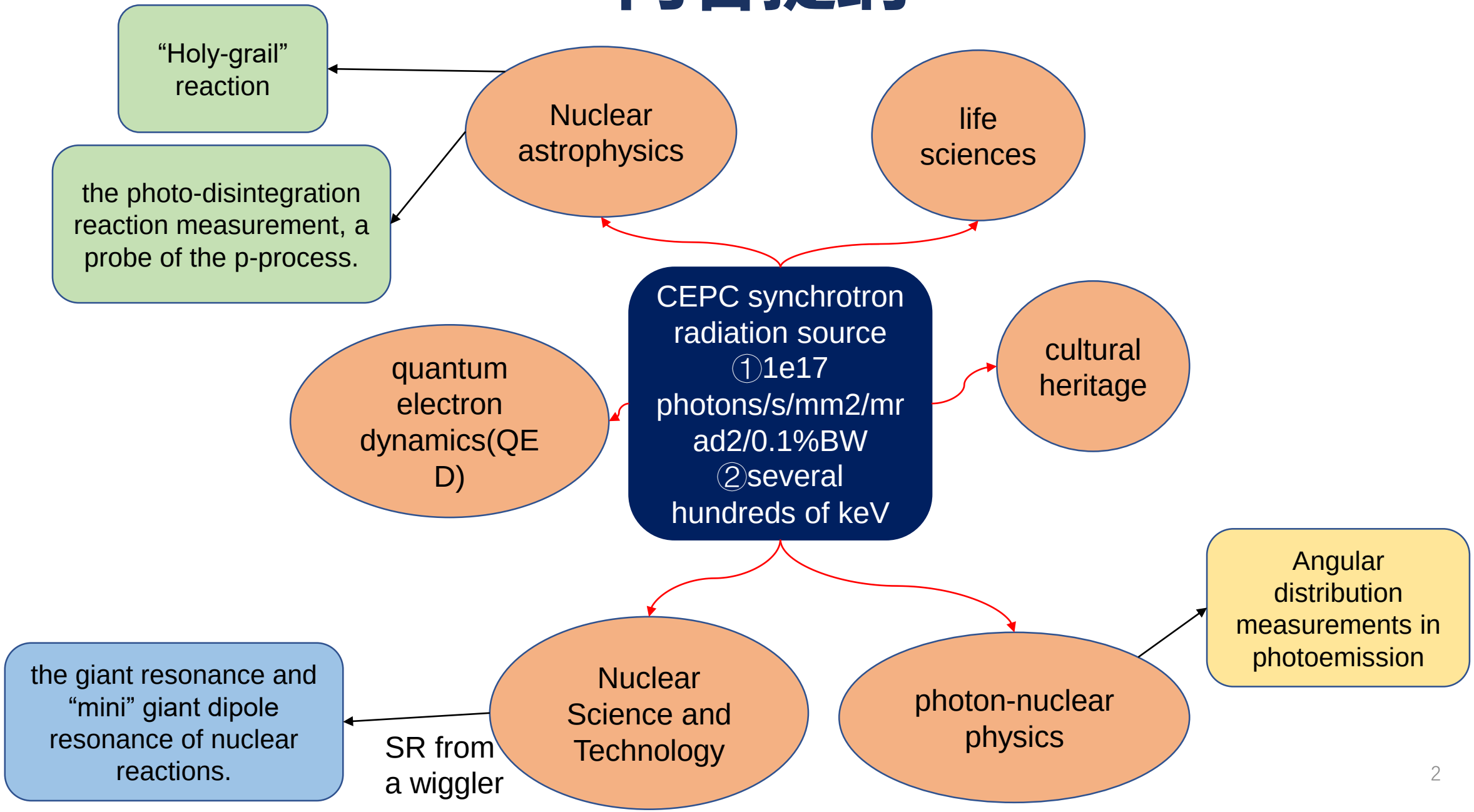
# Applications of the high intensity γ-ray source

调研整理-陈姗红

2022.10.18

# 内容提纲


"Holy-grail" reaction
the photo-disintegration reaction measurement, a probe of the p-process.
Nuclear astrophysics
life sciences
CEPC synchrotron radiation source ①1e17 photons/s/mm2/mrad2/0.1%BW ②several hundreds of keV
quantum electron dynamics(QED)
cultural heritage
Angular distribution measurements in photoemission
the giant resonance and "mini" giant dipole resonance of nuclear reactions.
SR from a wiggler
Nuclear Science and Technology
photon-nuclear physics

# CEPC γ-ray

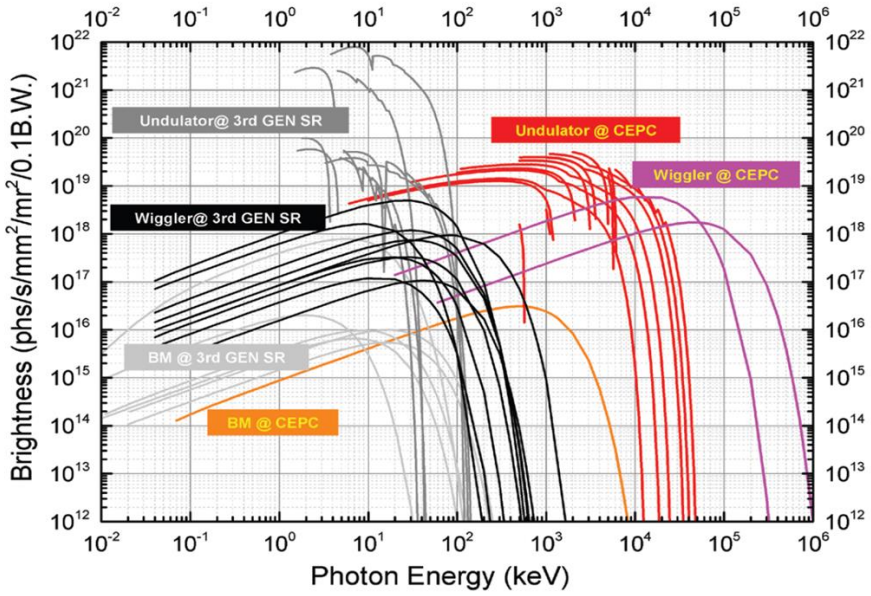



**Table A6.1:** Performance comparison between a CEPC gamma source and the main laser gamma sources in the world.

| **Source** | CEPC BM | CEPC Undulator | CEPC Wiggler | SSRF (China) | TUNL-HIGS (USA) | TERAS (Japan) | ALBL (Spain) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Gamma energy rang (*MeV*)** | 0.1~5 | 0.1~10 | 0.1~100 | 0.4-20<br>330-550 | 2-100 | 1-40 | 0.5-16<br>16-110<br>250-530 |
| **Energy resolution (*ΔE/E*)** | continuous | ~1% | continuous | 5% | 0.8~10% | | |
| **Flux (*phs/s*)** | $>10^{12}$ @0.1% | $>10^{13}$ @0.1% | $>10^{16}$ @0.1% | $10^{6}$ | $10^{8}$ | $10^{4}$~$10^{5}$ | $10^{5}$~$10^{7}$ |

Ref: Yongsheng Huang

# 光核反应

定义：光核反应包括(γ，n), (γ，2n)等，光核反应数据可描述光子和原子核的相互作用及粒子出射的物理过程。

局限性：完成光核反应的测量工作，要解决的关键问题在寻找合适的γ源

意义：

光核反应是研究核反应机制和核结构的工具；同时也为新的理论模型提供了实验根据。

在光核反应中，原子核吸收一个光子，其激发能就是入射光子的能量，不会有中子、质子核反应结合能的问题，也不会有带电粒子核反应中的库伦位垒的问题。因此，光核反应是研究核反应机制和核结构的较好工具。

光核反应是研究核力性质、核结构参数，核天体演化的一个独特工具，光核反应的基础是对电磁相互作用的清楚了解.

应用：

1. 辐射屏蔽设计和辐射输运分析。
2. 裂变反应堆和聚变堆的物理和技术。
3. 活化分析。
4. 防护和检验技术。
5. 放射疗法吸收剂量的计算。
6. 医用同位素的生产。
7. 核废料的嬗变。
8. 核天体物理。

# 光核反应

■ 光核反应按照能量分类：（别尔金，张礼等，低能光核过程，1960年）

（1）< 30MeV, 低能范围

（2）30MeV~ 130MeV, 中能范围

（3）130MeV~1100MeV，高能范围

（4）>1100MeV, 超高能范围

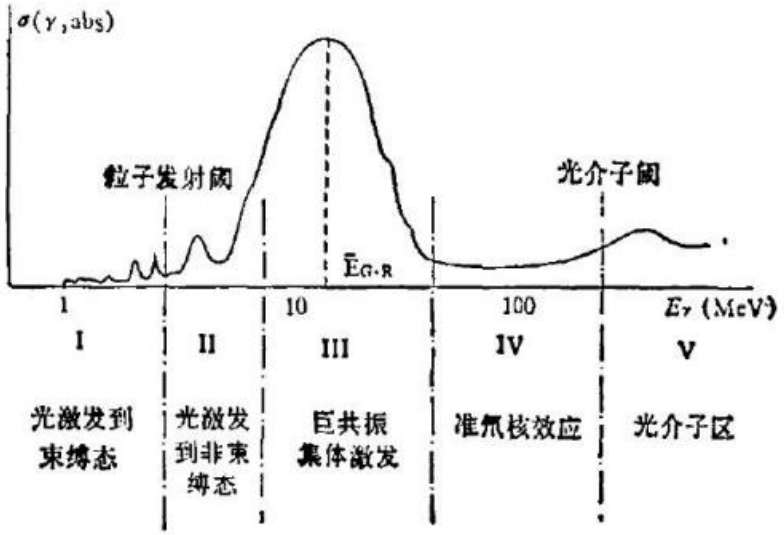



图 1　核吸收光子后的行为概括

$\bar{E}_{GR} \approx 15-20$MeV

■ 光核反应按照能量分类：（顾复华，光核反应研究概况，1982年第02期）

（1）Eγ< 9MeV, 单粒子束缚态和非束缚态的激发

（2）10MeV~ 30MeV, 巨共振区，集体模型的系统激发

（3）巨共振区以上，光介子阈(~140 MeV)以下为准氘核吸收区

（4）~140MeV, 核子共振区，会产生$\pi^{\pm}$介子。

# 光核反应-巨共振区

- 光核反应的巨共振能区是研究的热门区域；
  - 1：通过测量光核反应巨共振的激发函数，可以获得关于核变形的信息。
  - (原理)光核反应的激发函数与核形变参量之间存在关系：
  - (因此)通过测量光核反应巨共振的激发函数，可以获得关于核变形的信息。
  - 2: 巨共振吸收并非光核反应的唯一机制：通过测量（γ，p）和（γ，n）反应产率Y（γ，p）/Y（γ、n）的比值，表明其大于共振吸收机制预测的值。
  - 更重要的是，这可能是由于光核反应中存在直接相互作用过程，而巨共振吸收并不是唯一的过程。

- 高能量的γ-ray在这里的作用是：
- LCS-γ/CEPC γ-ray 单色性好，大幅度提高光核反应的实验精度。
- LCS-γ /CEPC γ-ray 可方便和准确的改变激光和电子束的能量进行调节，使得实验上测量光核反应的激发函数称为可能。

Ref: [1]VEYSSIERE A, BEIL H, BERGERE R et,al. A study of the Photofission and Photoneutron Processes in the Giant Dipole Resonance of 232Th, 238U and 237Np[J]. Nuclear Physcis A, 1973, 199(1): 45-64
[2] 张笑鹏. 强激光等离子体环境下天体核反应实验研究[D].上海交通大学,2018.DOI:10.27307/d.cnki.gsjtu.2018.000740.
[3] 王乃彦.激光与核——超高强度激光在核科学技术中的应用[J].原子能科学技术,2019,53(10):1989-1998.

# 光核反应-放射性核药

## 背景

➢ “核药”，是指含有放射性同位素、用于医学诊断和治疗的一类 特殊制剂。

诊断和治疗放射性药物定义及性能要求

| 种类 | 定义 | 性能要求 | 常用放射性核素 |
|---|---|---|---|
| 诊断放射性药物 | 用于获得体内靶器官或病变组织的影像或者功能参数的体内放射性药物，又称为显影剂或者示踪剂 | 衰变方式：同质异能跃迁、电子俘获、湮灭辐射、发射γ光子或者X射线；<br>光子能量：100～250KeV；<br>有效半衰期：检查过程用时的1.5倍；<br>在靶器官或组织中积聚快，分布多，在血液清除快 | 锝99m($^{99}Tc^{m}$)、氟18（$^{18}F$）、$^{123}I$、$^{131}I$ |
| 治疗放射性药物 | 能高度选择性浓集在病变组织产生局部电离辐射生物效应，从而抑制或者破坏病变组织，发挥治疗作用的药物 | 衰变方式：β衰变、电子俘获（释放俄歇电子）；<br>光子能量：1MeV以上比较理想；<br>有效半衰期：数小时或数天；<br>靶/非靶比值越高越好 | 碘131（$^{131}I$）、钐153（$^{153}Sm$）、锶89（$^{89}Sr$）、磷32（$^{32}P$） |

资料来源中国医学会核医学分会，平安证券研究所

- $^{99m}Tc\left(T_{\frac{1}{2}}=6.02h\right)$标记的药物使用量约占SPECT临床显像药物的85%，是核医学中用量最多的放射性药物
- Tc99m主要是Mo99的衰变子体，主要是由反应堆生产的，通过U235裂变及Mo98俘获中子反应获得。

- 2016年，在华盛顿举行的第四届核安全峰会提出“最大限度地减少高 浓缩铀的使用、确保核材料安全”，对此各国已达成一致意见。未来高浓缩铀实验反应堆裂变法将逐步告别历史舞台
- 全世界对99mTc 的需求与日俱增，而中国到目前为止尚未能大规模生产。
- 如何满足99Mo/99mTc 日益增长的供应需求仍是未来核医学领域发展的瓶颈问题之一

Ref: [1] 中山大学贺远强，医用同位素制备，2020.04，东莞

# 光核反应-放射性核药

- 基于光核反应100Mo（γ，n）99Mo生产99Mo是一种候选解决方案
- 反应阈值为9MeV；14.5 MeV时的最大横截面为150 mb，如图2所示
- 使用CEPC的wiggler γ-ray能区，通量非常合适。

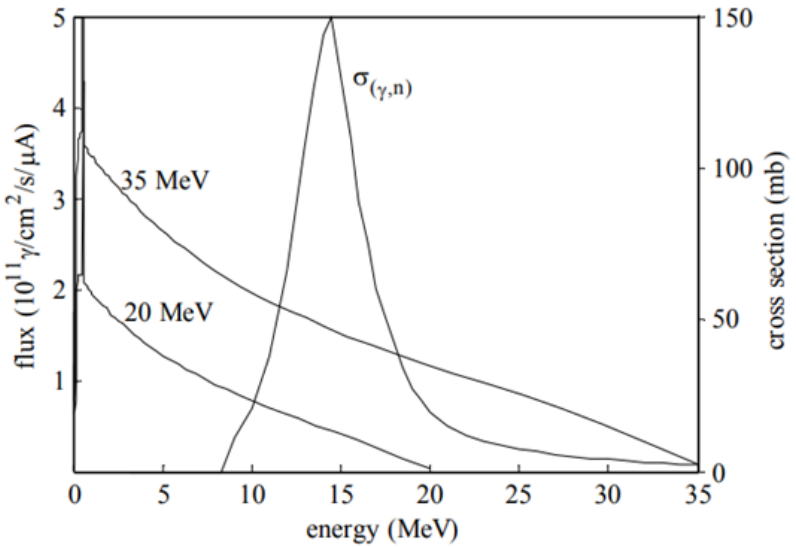
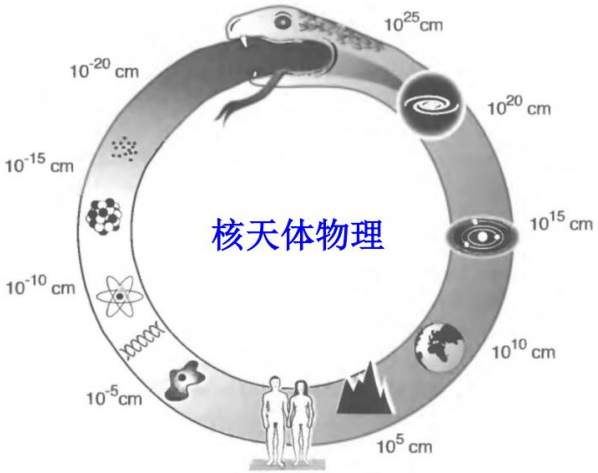


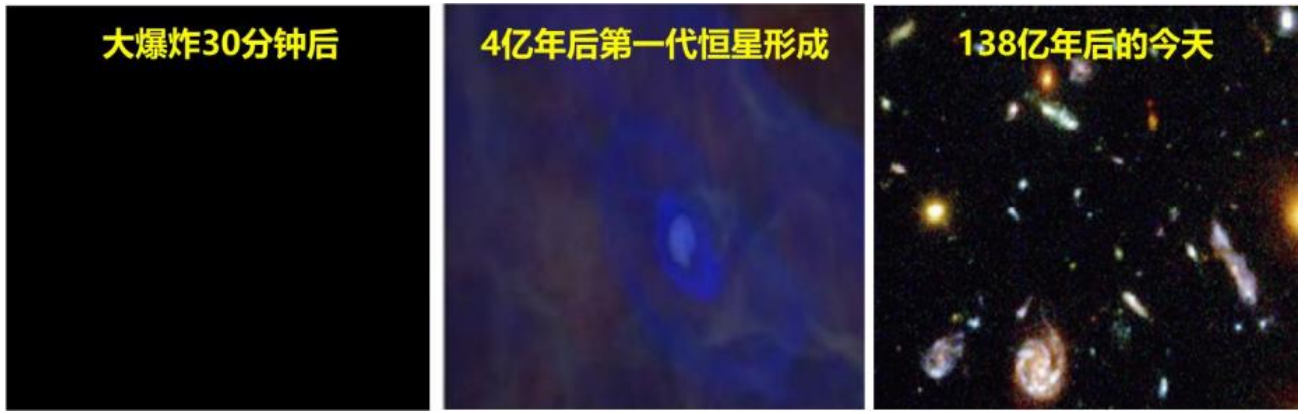

Fig. 100Mo（γ，n）光核反应截面和钼靶在２０、３５ＭｅＶ电子束作用下产生的轫致辐射谱


Ref: [1] 王怡,郭子方,王兰,李姣龙,焦力敏,高璇,翁汉钦,林铭章.电子加速器生产医用同位素钼-99的发展现状与展望[J]
[2] Activities for the production of 99Mo using high current electron linac at Argonne National Laboratory_2011

# 光核反应-核天体物理

核天体物理是什么?




- 核天体物理学旨在了解宇宙中元素的起源和演化、恒星演化的时间尺度、恒星环境和位置、热核过程中恒星的能量生成及其对恒星演化的影响以及驱动天体物理现象的机制
- 解决这些关键问题的致密恒星的结构和性质天体物理模型需要大量的核物理信息作为输入测量反应截面、核质量，其他核结构特性是天体物理模型的重要经验基础
- 通过天文观测和精确的核物理输入，可以更好地约束天体物理模型。
- CEPC同步辐射源的出现将提供比现有γ源高5~6个数量级的高能γ束，这将大大扩展光核物理的实验平台。


[1] 何建军，核天体物理实验研究 Doi: 10.7693/wl20130703.
[2] Smith M. S. Rehm K E. Annu. Rev. Nucl. Part. Sci., 2001,51:91.
[3] Wallerstein G, et. Al. Rev. Mod. Phys 89:995, 1997.

# 光核反应-核天体物理

光核作用1 —— 圣杯反应

■ 12C(α, γ) 16O的研究意义

$^{12}C(\alpha,\gamma)^{16}O$圣杯反应

圣杯(Hoyle grail)

- $^{12}C(\alpha,\gamma)^{16}O$反应在所有$M > 0.55\ M_{\odot}$恒星的演化中都起着关键作用，其反应截面对上至铁的中等质量核素的合成和大质量恒星后期的演化进程有决定性的影响，被誉为核天体物理的“圣杯”。
- 决定了C/O的丰度比

核天体物理中最重要的科学问题是确定氦燃烧过程所决定的碳氧C/O丰度比。

---摘自1983年威廉•福勒诺贝尔颁奖典礼上的演讲词

# 光核反应-核天体物理

光核作用1 —— 圣杯反应

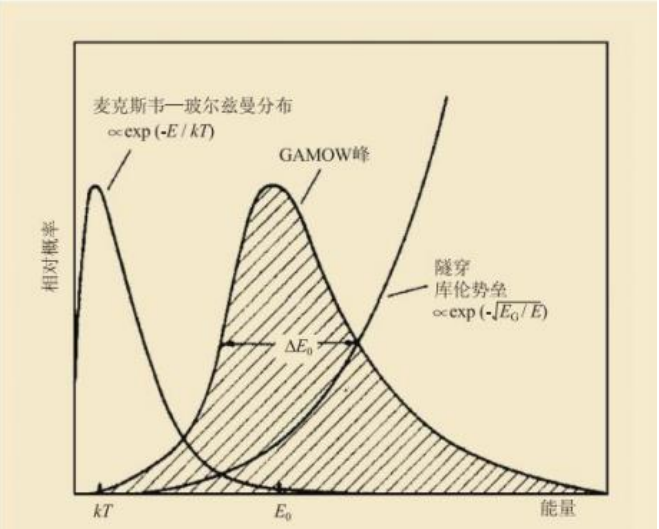


图2 带电粒子核反应Gamow峰及宽度示意图[1]

■ 12C(α, γ) 16O的研究难点

- 天体物理核合成演化模型要求该反应$^{12}C(\alpha,\gamma)^{16}O$的反应率误差要小于10%。
- $^{12}C(\alpha,\gamma)^{16}O$在天体物理感兴趣能区$E_{c.m.}$=300±80 keV反应截面极低$10^{-17}$ barn
- 反应机制非常复杂，这给实验测量和理论计算带来很大困难。

■ 12C(α,γ)16O研究方法

**直接测量：** **最可靠方法**

- **正运动学：** $^{12}C(\alpha,\gamma)^{16}O$
- **逆运动学：** $^{4}He(^{12}C,^{16}O)\gamma$

逆反应的截面在同样的质心系能量下比正反应大100倍。

**间接测量：**

(1) $^{12}C(\alpha,\alpha)^{12}C$弹性散射

(2) $^{16}N$ β衰变到$^{16}O$的激发能级研究$^{16}O$到$^{12}C$的α衰变

(3) $^{16}O$库仑离解方法

(4) α转移反应，例如：$^{12}C(^{6}Li,d)^{16}O$、$^{12}C(^{7}Li,t)^{16}O$反应

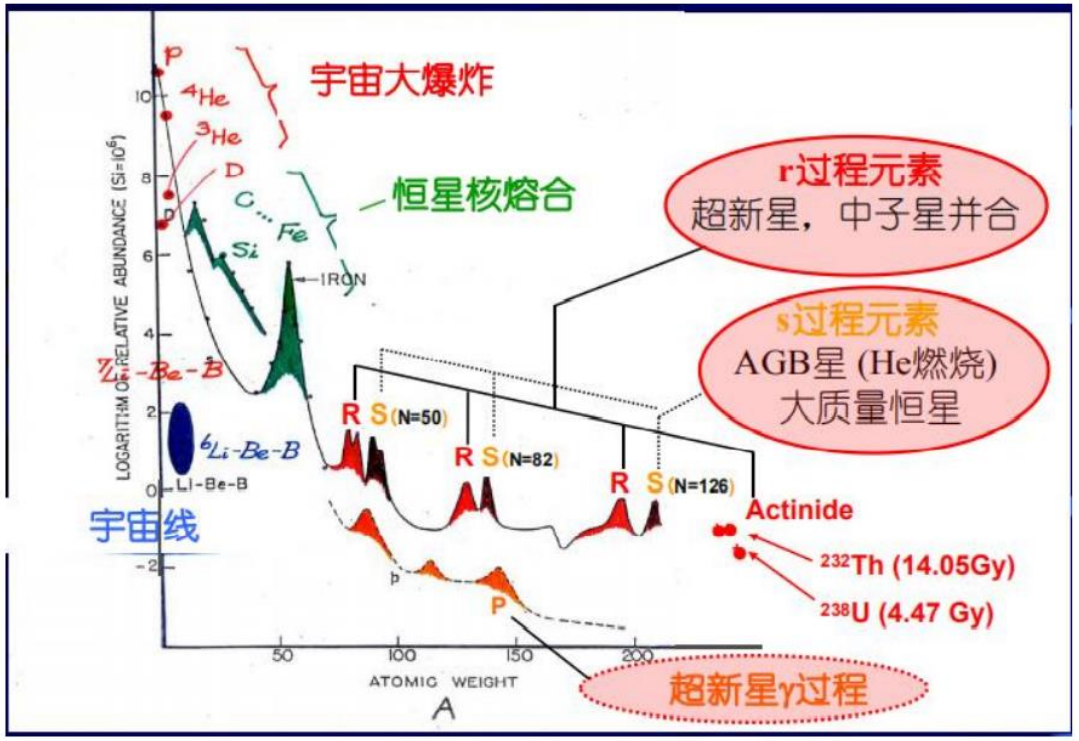

[1] ref: Kikuchi et al. 2015, Prog. Theor. Exp. Phys.063E01
[2] S. E. Woosley, A. Heger, and T. A. Weaver, Rev. Mod. Phys. 74, 1015 (2002).
[3] Y.Xu, W.Xu, et. al., A new study for 16O(γ,α)12C at the energies of nuclear astrophysics interest: The inverses of key nucleosynthesis reaction 12C(α, γ) 16O, 2007

# 光核反应-核天体物理

光核作用2 —— p process

p-process是什么，γ束在这里起到了什么作用

1. p-核素是指不能被快中子俘获和慢中子俘获的A大于等于74的缺中子稳定核素，合成p-核素的过程称为p-process，其中包含了大量的光致蜕变反应，即(γ,α),(γ,n),( γ,p)反应
2. 要解开p-核素形成之谜，需要将天体物理核物理的研究与天文观测进行比较；与p-process的相关光致蜕变反应需要将理论计算和实验提供的核物理输入量（反应截面、伽马强度函数、核质量、核能级密度）相结合，才能得到准确的结果。这些核物理输入量都需要实验测量得出。LSC/IHEP作为工具研究光致蜕变反应，将有望为p-process的网格计算提供更新的核物理输入量。



# backup

# 光核反应-核天体物理

## 光核作用1 —— 圣杯反应

12C(α, γ) 16O的研究意义，研究难点，γ束在这里起到了什么作用

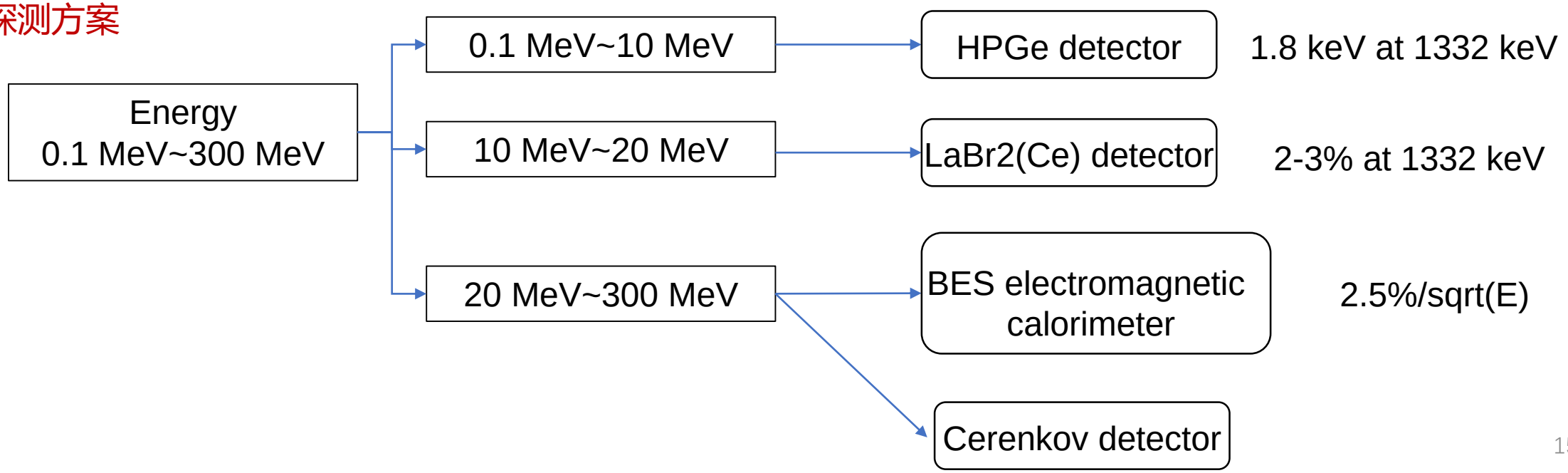
研究意义：圣杯反应决定了12C和16O的丰度比，决定了中等质量元素和重质量元素的形成。
研究难点：12C(α, γ) 16O反应发生在He燃烧的末期，发生的天体环境温度约为 $T_9 = 0.2$ ，根据Gamow理论，对应的质心系能量为E=0.3MeV，期望的反应率不确定要优于10%。因为复杂反应机制和库伦势垒的作用，使得在此的截面为1e-17量级，不能达到期望的精确度。
γ束在这里起到了什么作用：在关于12C(α, γ) 16O反应截面测量中，实验上可分为直接方法和间接方法，其中直接方法分为：正运动学和逆运动学两种途径。逆反应的截面在同样的质心系能量下比正反应大100倍。

# A6.3: Detection Methods of High-Intensity CEPC-SR γ-ray

- 候选探测器

| Detectors type | Energy range | Energy resolution |
|---|---|---|
| Si-PIN | 5-30 keV | 3 keV at 59.5 keV(-5℃) |
| CdZnTe detector | 5 keV-2 MeV | <6% at 662 keV counting rate 2000-20000 Hz |
| SiC detector(SBD) | | 9.49% at 59.5 keV(25℃~125℃) |
| prototypes | | |

- 探测方案



# Synchrotron radiation

同步辐射是由电子在通过弯转磁铁、扭摆磁铁（wiggler）和波荡器（undulator）这三类磁场时产生的。弯转磁铁使电子在一个弯曲的轨道上运动，从而在切线方向上发射出具有连续光谱的同步辐射光。扭摆磁铁和波荡器也叫插入件（insertion device），一般由 $2N$ 个短的二极铁组成，其磁极交替排列。扭摆磁铁可以产生与二极铁一样的光谱，但光通量是二极铁的 $2N$ 倍。而波荡器可以产生具有分立光谱的部分相干的同步光，且光通量为二极铁的 $N^2$ 倍。

秦庆-高能环形加速器物理 第五章

（4）插入元件 所谓插入元件是指在储存环的直线段上插入的扭摆磁铁（Wiggler）和波荡器（Undulator）等等。它们的作用是在不提高储存环的能量和束流强度的条件下能够得到更短波长和更高通量的同步光，并可以在Undulator的辐射中得到准单色的光束。因此在近十年来已经运行的不少同步辐射机器上采用增加Wiggler和Undulator来拓宽同步辐射应用范围，在新设计的同步光源的方案中均考虑插入元件的设计，甚至有的方案提出全部由超导Wiggler和Undulator产生同步辐射光。下面将分述Wiggler和Undulator。

1）扭摆磁铁Wiggler一般是超导磁铁，其磁感应强度为5T左右，也有的采用普通磁铁，其场感应强度为1.8T左右，多由三个磁极组成，如图8.31所示。磁场设计满足 $\int Bdl = 0$ 条件，所以带电粒子通过Wiggler后不改变原来轨道，仅在Wiggler磁铁中轨道被扭曲，从而产生很强的同步辐射。从Wiggler磁铁中辐射出来的同步光同从储存环中的二极铁辐射出来的光一样，都是连续光谱，仅仅因为磁场提高了，同步光的特征波长更短和辐射功率提高。

陈佳洱-加速器物理基础 第八章 第八节

# Synchrotron radiation

陈佳洱-加速器物理基础 第八章 第八节

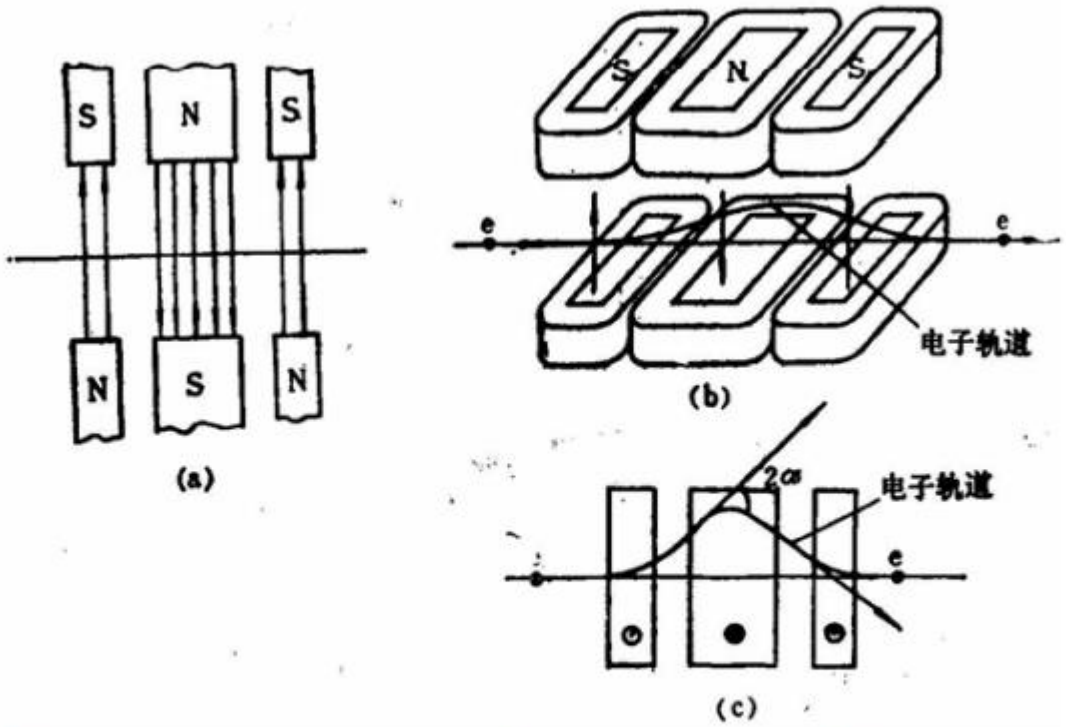



图8.31 常规Wiegler磁铁以及电子在Wiggler中的轨迹示意图

2）波荡器 当Wiggler磁铁的磁极数增加时，同步光将产生相干辐射，使某些波长的辐射功率明显提高，而其余范围的辐射反而减小，使图8.32所示的连续辐射谱呈准单色光谱。

# 整理 Synchrotron radiation lines in the CEPC collider ring-王毅伟

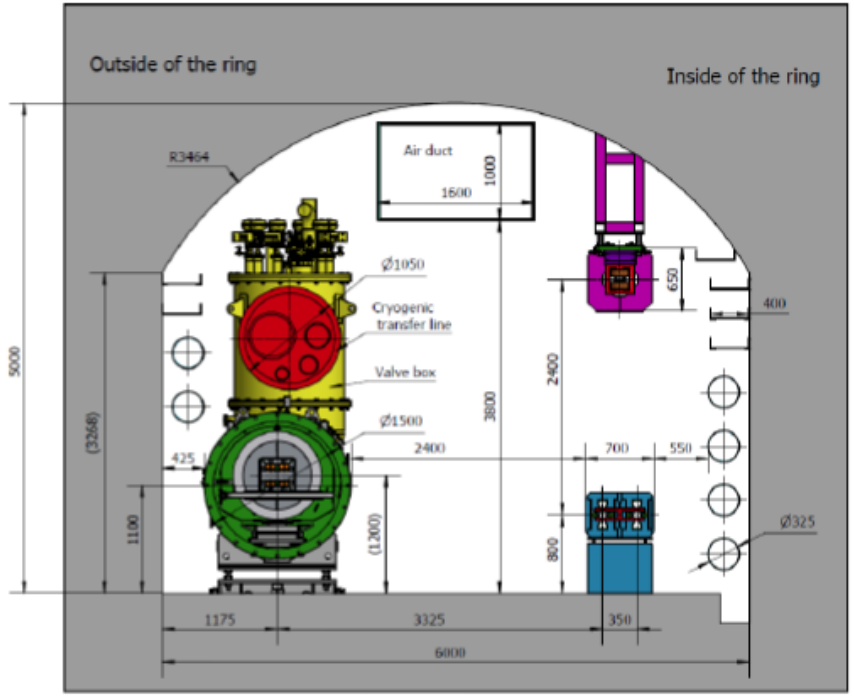



Figure 4.3.9.6: Tunnel cross section in the arc-section

弧区隧道的横截面示意图

弧区隧道宽6000mm，高5000mm
隧道中，碰撞环紧贴内壁，SPPC靠近外壁。两墙附近的操作空间约半米，足以容纳一人
CEPC 和 SPPC之间的隧道为2400mm，用以运输、安装、校准等操作

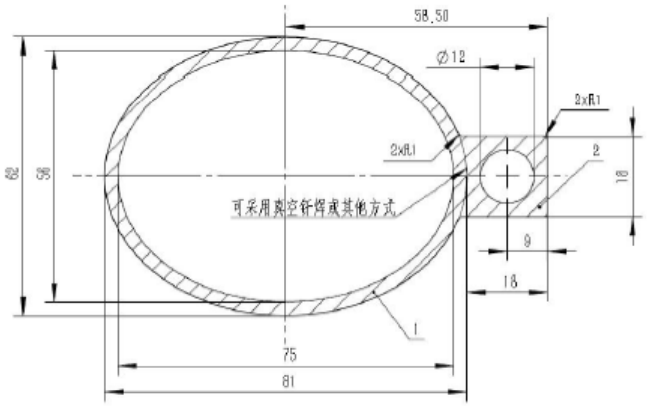
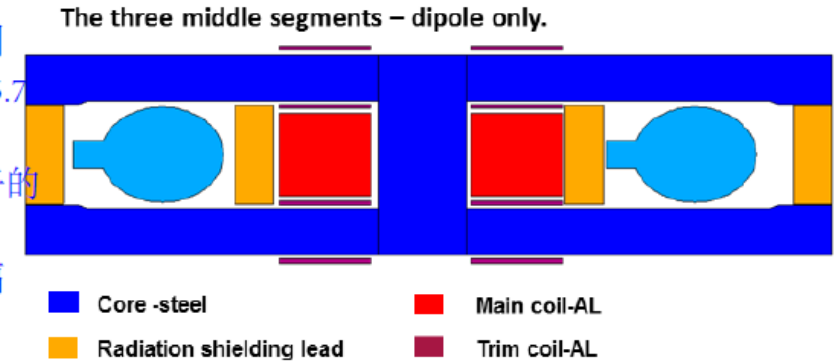



Figure 4.3.6.1: Copper dipole vacuum chamber

真空室横截面椭圆形
宽75mm，高56mm，壁厚3mm，长6m
正电子环由铜制成，真空法兰由不锈钢制成

dvc=0.075/2 m; ! distance from the gamma ray to the inner wall of vacuum chamber
dwall=4.5 m; ! distance from the gamma ray to the wall

为了便于双孔径的偶极子的制作，磁芯被分为5段，每段约5.7米长
为了便于安装真空室，偶极子的极隙增加到70mm；
为了屏蔽高能正负电子束的辐射，将用30mm厚的铅砖




双孔径偶极子的横截面。

Figure 4.3.3.1: Cross section of the dual aperture dipole.

CEPC CDR page 134,167,110

加速器磁铁是环形正负电子对撞机中的基础设备，也是种类、数量最多的设备，主要作用是提供电磁力，对正负电子束流进行偏转和聚焦等[1]。我国在规划的环形正负电子对撞机(CEPC)中，对撞环(主环)周长约 100 km，共有约 9 370 台磁铁，其总长度约占对撞环周长的 80%。磁铁系统中包括二极磁铁、四极磁铁、六极磁铁和校正磁铁等多种。因此，特别需要考虑降低磁铁造价和功率损耗。对撞环中大部分二极磁铁的磁场强度都比较低，四极磁铁、六极磁铁具有中等磁场强度，因此均选用常规的电磁铁方案。CEPC 可工作在 TT (182.5 GeV)、Higgs(120 GeV)、W(80 GeV)、Z(45.5 GeV)等多种模式，因此必须要确保磁铁在不同运行能量下的磁场性能满足设计要求[2]。

CEPC 是一台双环对撞机，正负电子束流间距为 350 mm。对撞环大部分二极磁铁和四极磁铁采用双孔径磁铁方案[3-4]。相比于传统的单孔径磁铁方案，可大大降低磁铁数量、造价和功率损耗。CEPC 对撞环共有双孔径二极磁铁约 2 400 台，双孔径四极磁铁约 2 400 台，六极磁铁约 1 900 台。双孔径二极磁铁、四极磁铁需要解决两个孔径内磁场的耦合干涉问题，保证每个孔径内的磁场性能满足设计要求；同时二极磁铁和四极磁铁长度长，磁场精度要求高，其设计、研制、磁场测量难度均较大。

CEPC 主环二极磁铁、四极磁铁采用铝导线绕制励磁线圈，设计中采用低电流密度和大线圈横截面降低工作电流和功耗。部分二极磁铁还要求同时产生六极磁场，即采用二六极组合磁铁方案[5]，用于降低独立六极磁铁的磁感应强度和功率损耗。

在 CEPC 对撞环磁铁的设计中，考虑了束流同步辐射对线圈造成的损坏，因此在磁铁线圈绕组旁预留了空间来放置辐射防护吸收体。在二极磁铁、四极磁铁和六极磁铁的设计中，磁场计算和优化使用电磁场软件 OPERA 进行。

高杰-高能粒子加速器关键技术

# 整理 Synchrotron radiation lines in the CEPC collider ring-王毅伟

## Summary

- Position of the SR stations in the ring are near the injection regions.
  - Two with wigglers and two with normal bends
- The angle between gamma ray and the vacumn chamber and bend is very small.
  - The vacumn chamber, bend at these regions need to be carefully design to solve the problem of geometry conflict and impedance.
- The growth of radiation power is not acceptable with field 2T.
  - Field around 0.2T is more practical. Another way is to reduce the length of wiggler.
- Beam size at the wigglers and bends are got.
- Geometry near the wigglers and bends are got.

- 几点结论：
- γ射线与真空室和弯管之间的角度非常小。
  - 真空室在这些区域弯曲，需要仔细设计，以解决几何冲突和阻抗问题
- 对于2T区域，辐射的增长无法接受
  - 方法之一：减少wiggler长度

高杰-高能粒子加速器关键技术

双孔径二极磁铁的铁芯分为5段，每段的长度为5.7 m；中间3段为纯二极磁铁，即在每个孔径内只产生二极磁场。除不产生六极磁场外，其他设计要求与前面所述的二六极组合磁铁相同。

双孔径二极磁铁两个孔径中心距离为350 mm，左、右孔径的中心磁场方向一致，大小相同，可通过调整线圈进行单独微调整。线圈采用纯铝为线材，采用水冷方式进行冷却。双孔径二极磁铁整体采用"工"字形结构，两个孔径共用一个主线圈，与两个单孔径磁铁并排放置相比，功率减小50%。两个孔径内真空盒的水冷孔朝向一致，线圈两侧屏蔽铅块厚度为30 mm，如图2-9所示。

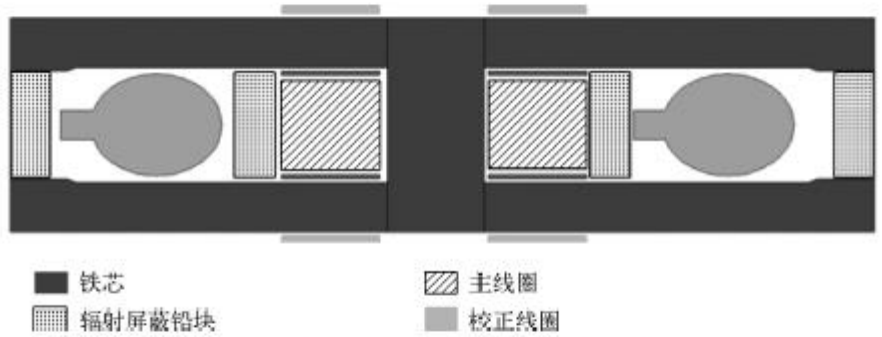



图2-9　双孔径二极磁铁截面示意图

双孔径二极磁铁的铁芯采用实心电工纯铁(DT4)，磁铁极面主体部分为平面，方便加工，极面开口侧带有梯形垫补以改善磁场质量。为降低输电线缆上的功耗，主励磁线圈设计为两匝，导线规格为60 mm×27 mm，中心水冷孔直径为7 mm。对应束流能量为182.5 GeV，磁铁最大工作电流为1 605 A，每台磁铁功率为1.2 kW。通过水冷对导线进行冷却，线圈绝缘采用对铝块进行阳极氧化处理，使铝块表面产生一层阳极氧化膜；导线匝与匝之间的接触面采用镀银工艺处理降低接触电阻，减少发热。二维磁场分析得到的磁力线分布