

什么是因陀罗网？

出自《大方广佛华严经》

用一张网与无数宝珠

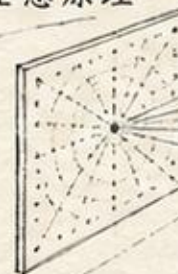
描述宇宙真实结构的核心意象

因陀罗网

是神话还是物理？

全息原理给出了答案。

全息原理



部分包含整体
信息无处不在
只不过分辨率不同

核心思想

一即一切

一切即一

每一颗珠子

映照并包含全部

大方广佛
华严经

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

A-A
A

1947年

匈牙利物理学家

加博尔

发明全息照片

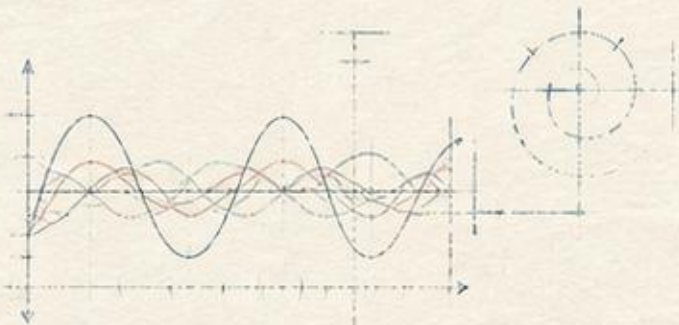


诺贝尔奖

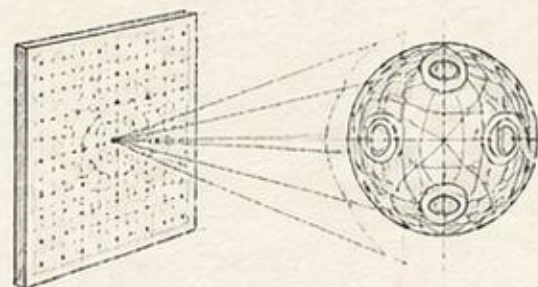
以表彰其
在全息技术方面
的贡献



真正让物理学家们坐不住的，
不是全息照片能拍出三维图像，
而是一个意外发现。

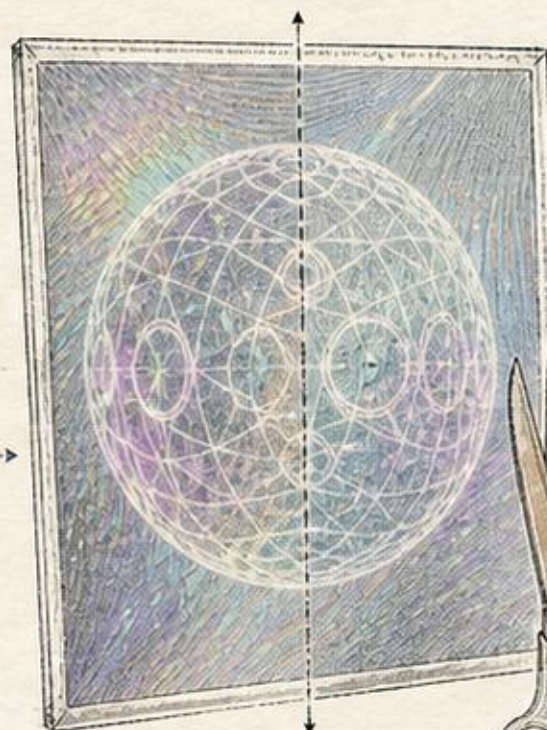


全息原理

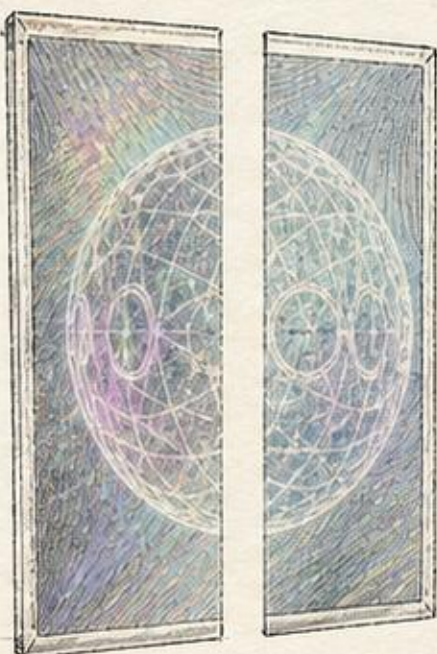


部分包含整体

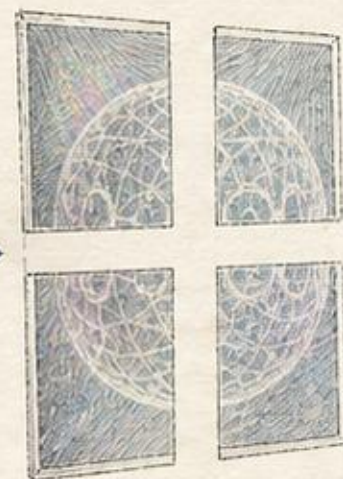
信息分布式存储
任何部分都携带整体信息



完整的全息底片



从中间剪开
每一半仍包含
完整的三维图像



再剪，再剪……
只剩一小块碎片
仍保存全部信息
(分辨率变低)

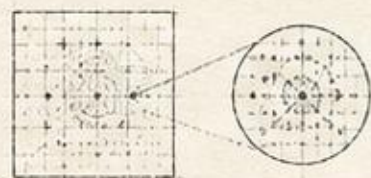
部分包含整体

这六个字，
在物理学里
炸开了一个
全新的方向。

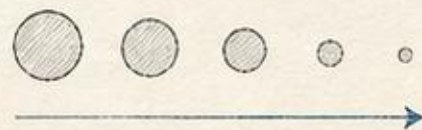
分辨率变化



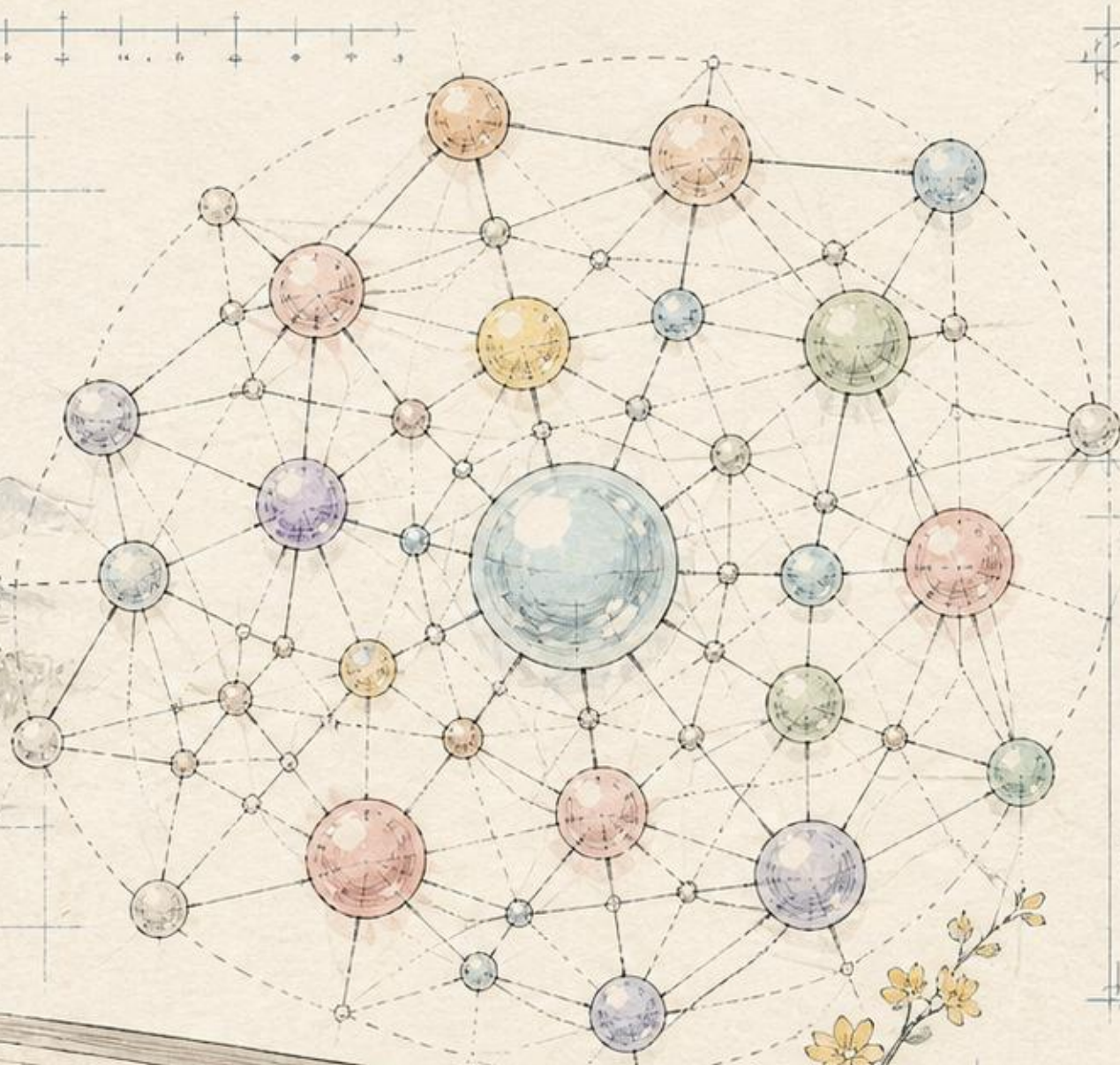
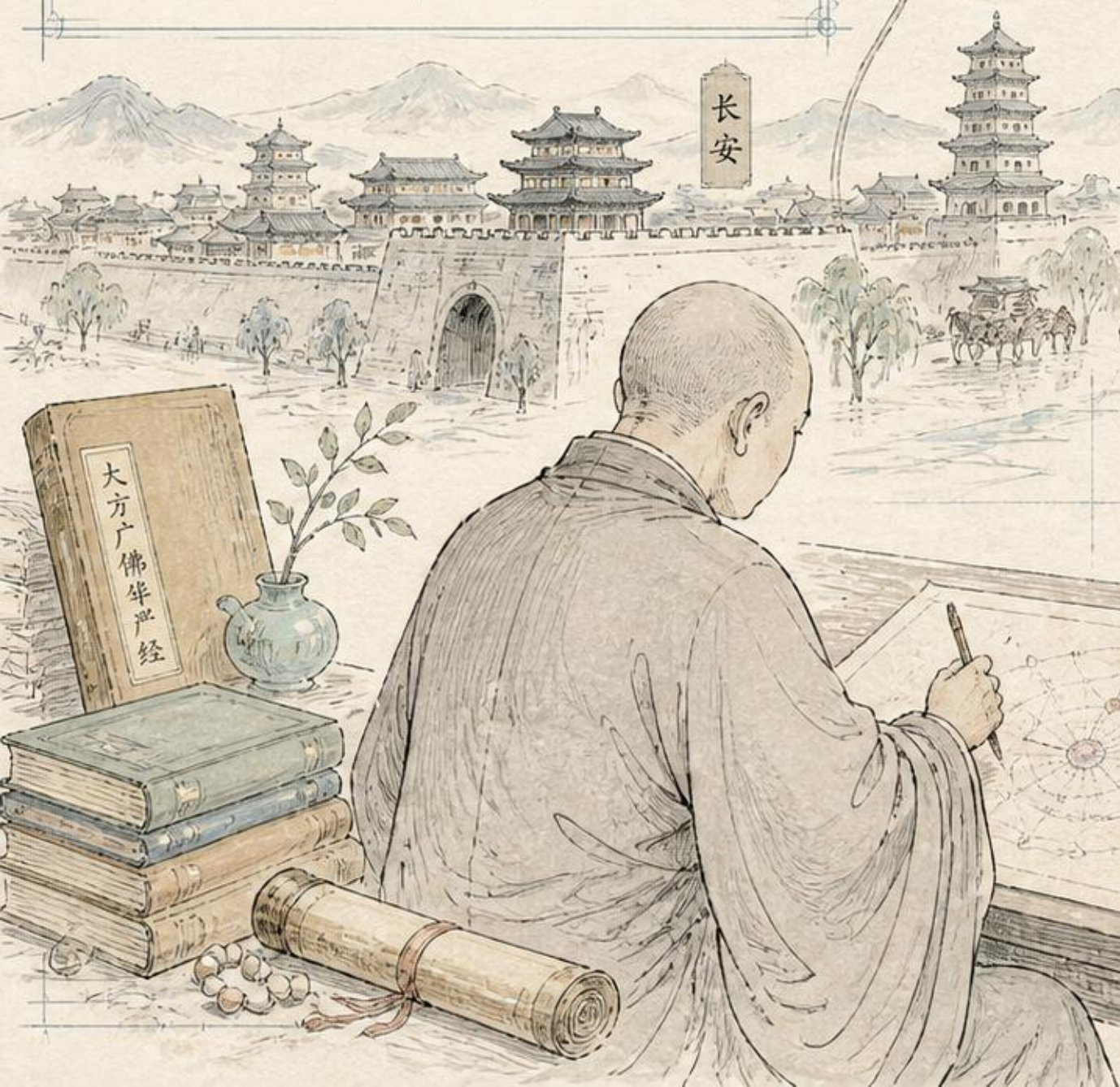
信息分布式存储



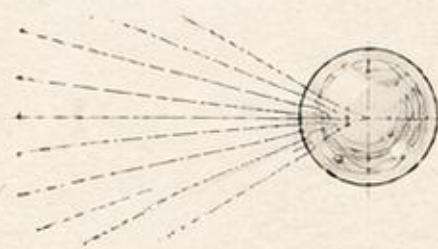
从整体到部分



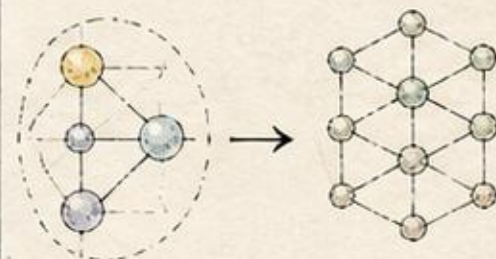
一千三百多年前的长安，
有一个和尚，在没有全息技术、
没有量子力学、没有任何现代物理学的条件下，
用一张网和一堆宝珠，
精确描述了**同一个结构**。



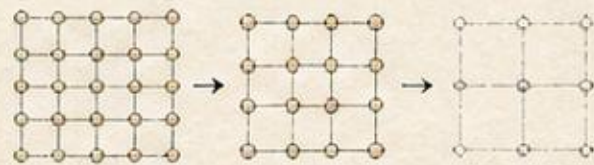
一网一珠
每一颗珠子都映照
着所有的珠子



部分包含整体
无论取出哪一部分
都包含着全部信息



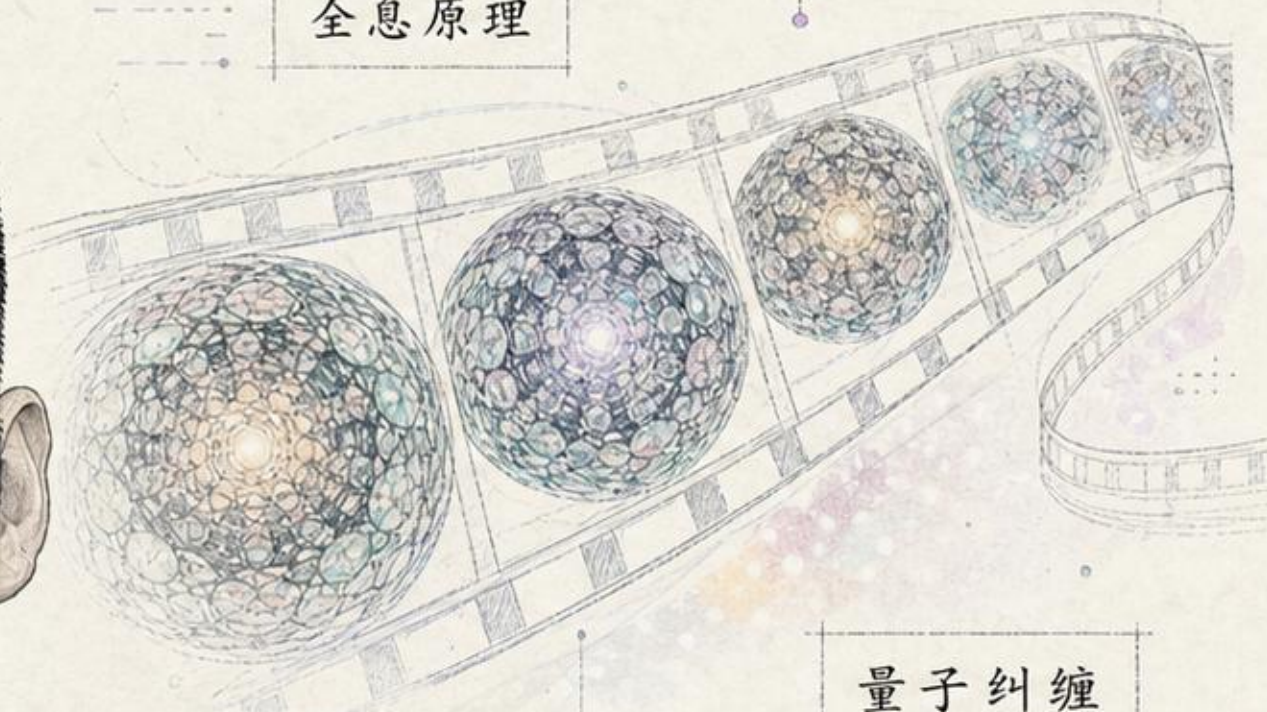
信息不灭，只是分辨率降低



因陀罗网



全息原理



量子纠缠



因陀罗网

到底是什么？



华严宗描述宇宙真实结构的核心意象

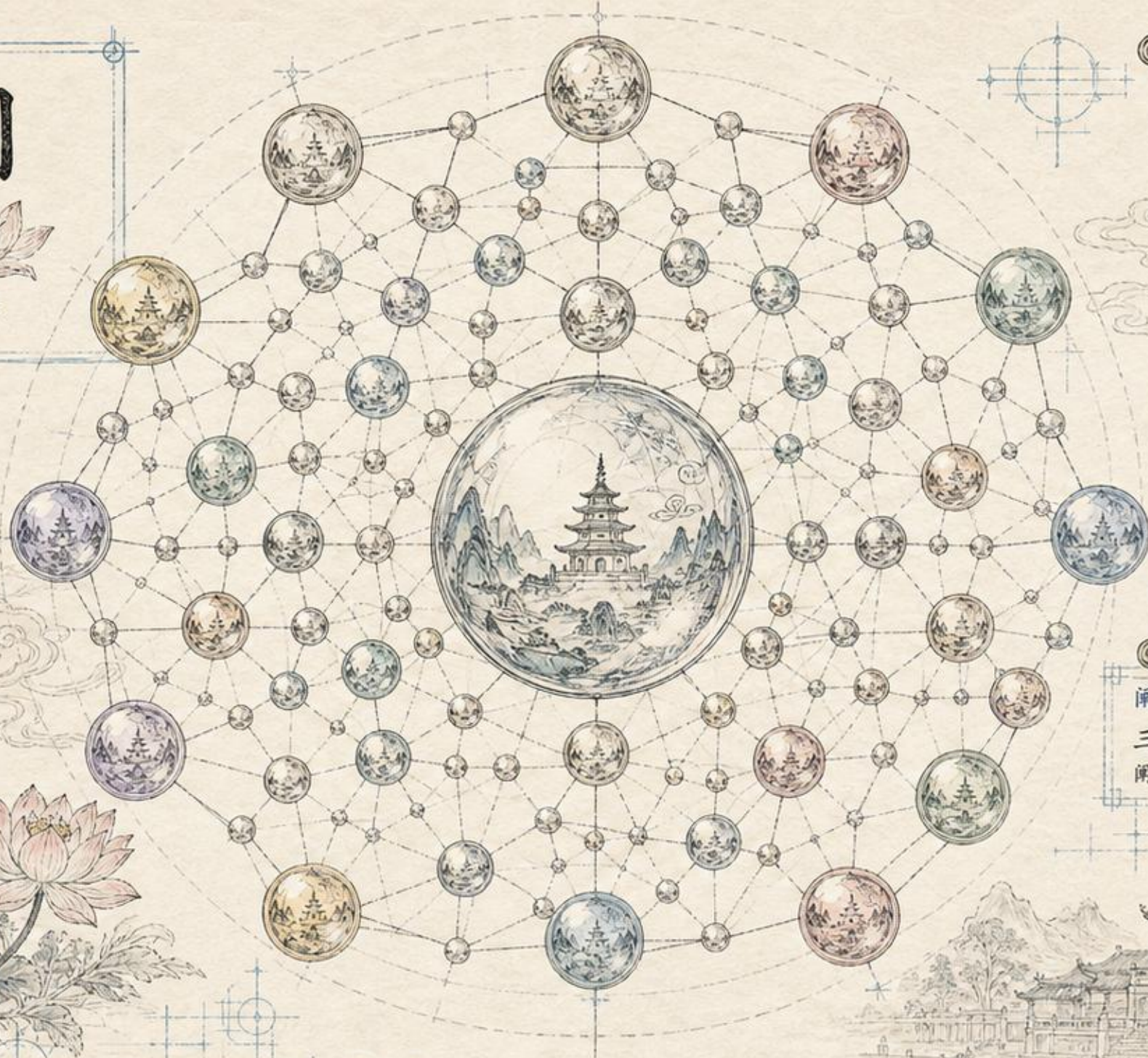
出自经典

大方广佛华严经
(八十华严)



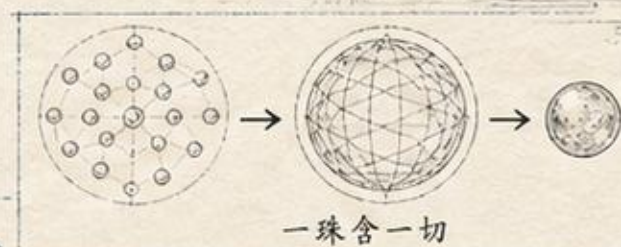
核心意象

一网一切，一切即一，
一珠含一切，一切现一珠。



宇宙观

万事万物互相映照、互相摄入、
互无遗余、周遍含容。



一珠含一切

华严宗三祖

法藏

生活在
唐代武则天时期



阐释者

三祖法藏大师

阐释因陀罗网的真实义理

结构特点

- 重重无尽
- 互相映照
- 互相摄入
- 互无遗余
- 周遍含容

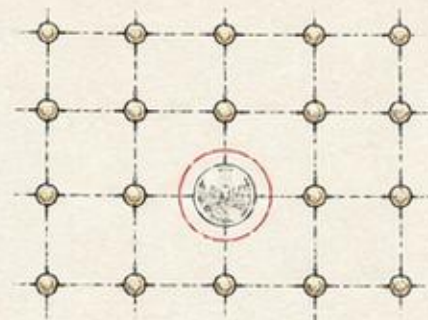
华严精神

随处现全体，
毫端含大千。
即事无碍，事事无碍。



想象帝释天的宫殿里
悬挂着一张无限大的网

网上的每一个节点
都镶嵌着一颗**宝珠**

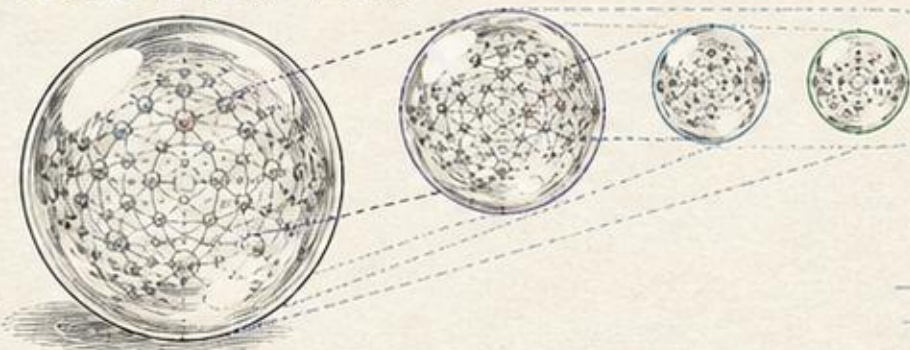


这些宝珠不是实心的
它们是**透明**的



每一颗珠子的表面
都**映照**着网上所有
其他珠子的影像

而那些映像里面
又包含着映像的映像



因陀罗网

一念一切、一切一念
重重无尽、互摄互入

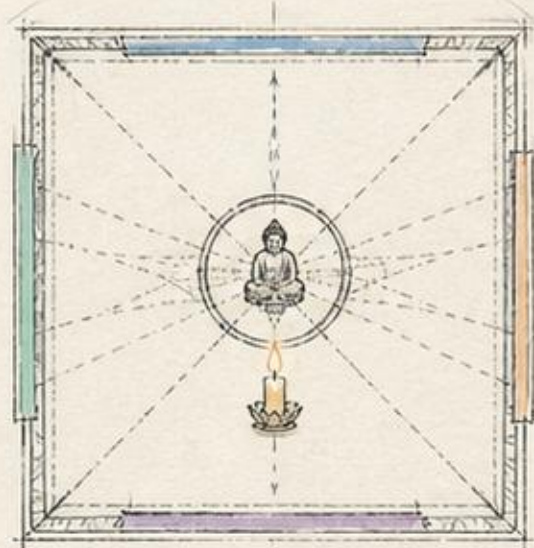
无穷无尽



法藏为武则天 做过一个著名的演示

- 房间的四壁
- 天花板
- 地板上
- 各安了一面大镜子
- 中间放一尊佛像
- 和一支蜡烛

俯视图



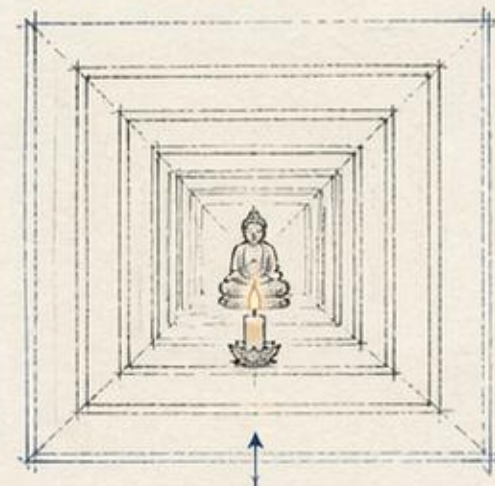
六面镜子互相映照，镜中有镜，镜中的镜中又有镜，层层叠叠看进去就是无穷。

陛下你看，
这就是法界的真实结构。

一即一切，
一切即一。

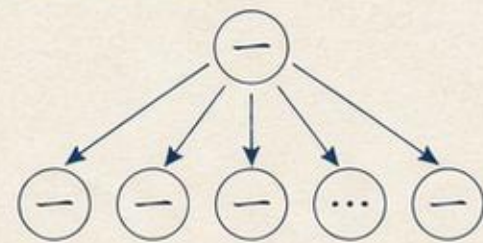


镜中无限递归



看向任何方向
都是无穷的映照

结构示意



一即一切，一切即一

因陀罗网的演示

从物理演示到宇宙真理



注意因陀罗网的三个关键属性

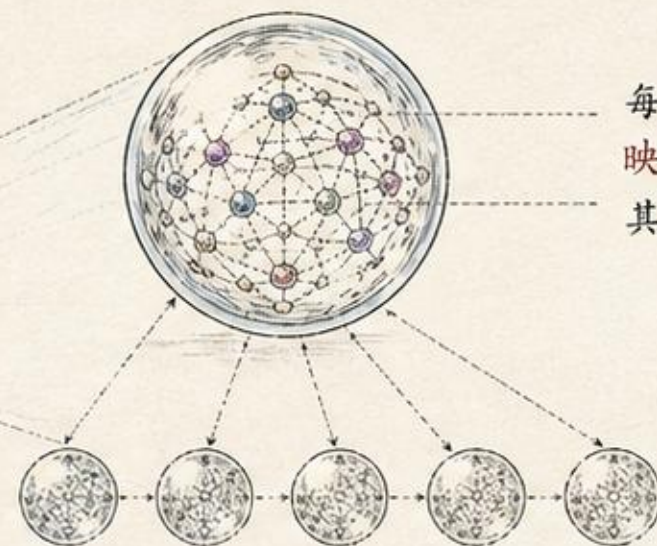
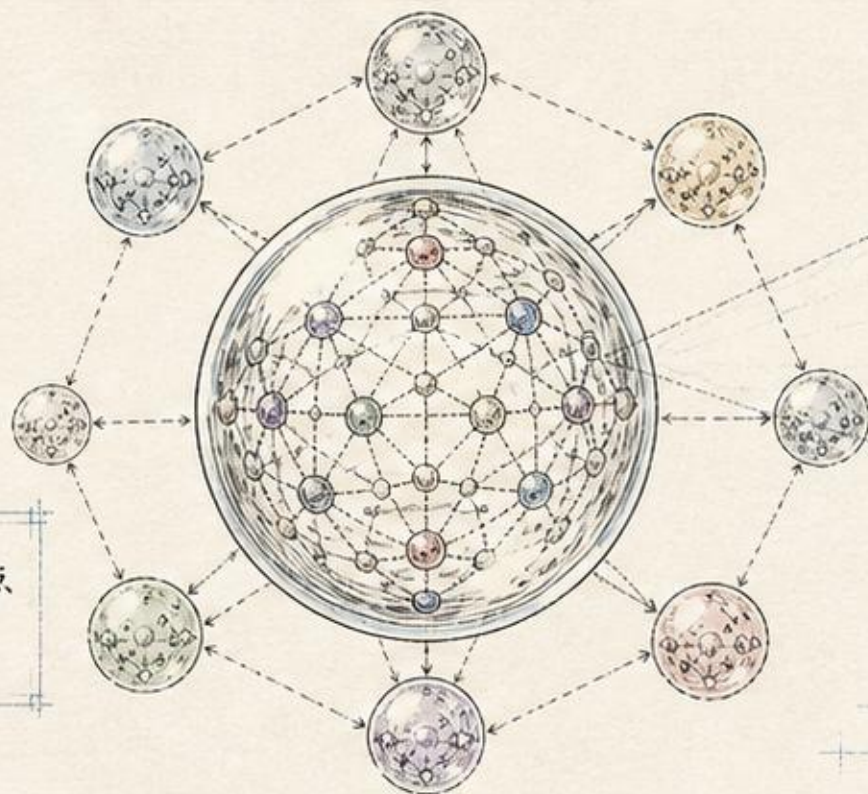


《华严经》：
“一即一切，一切即一”

1. 透明

每颗珠子本身没有自己的颜色和内容，它的一切都来自于对其他珠子的映照。

没有任何一个节点有独立的自性



每颗珠子的表面映照出网上所有其他珠子的影像

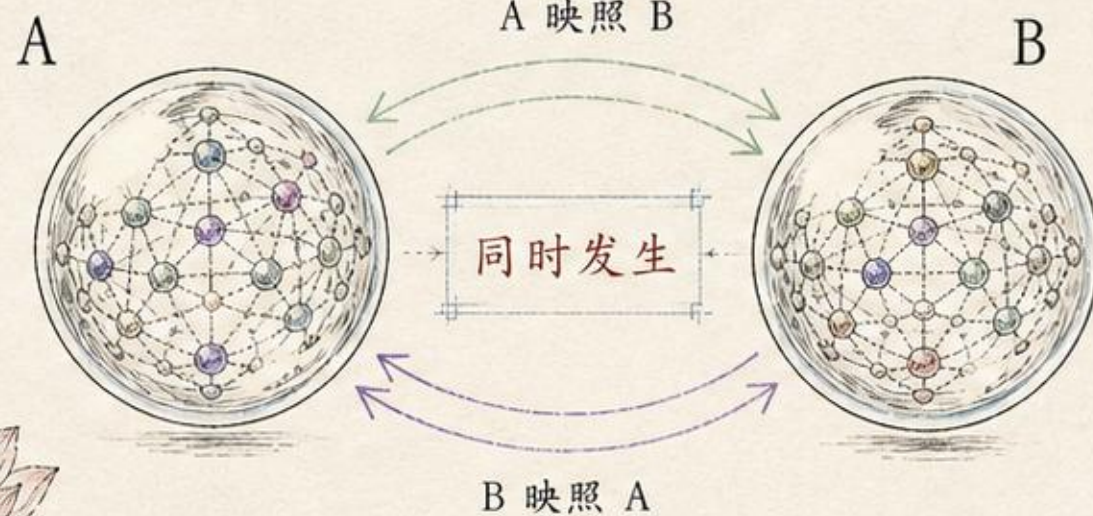
每一个影像里又包含着其他所有珠子的影像……

无穷无尽

2. 互摄

不是 A 先映照 B，然后 B 再映照 A，而是同时发生的。

A 和 B 相互定义，互为前提



相互包含，无法分割
一即一切，一切即一

顺序发生（非因陀罗网）



有先后，存在依赖

同时发生（因陀罗网）



无先后，相互定义



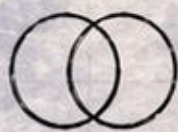
因陀罗网

从任何一颗珠子出发，
都能看到整个网络的完整信息。



透明

彼此映照，毫无遮蔽。



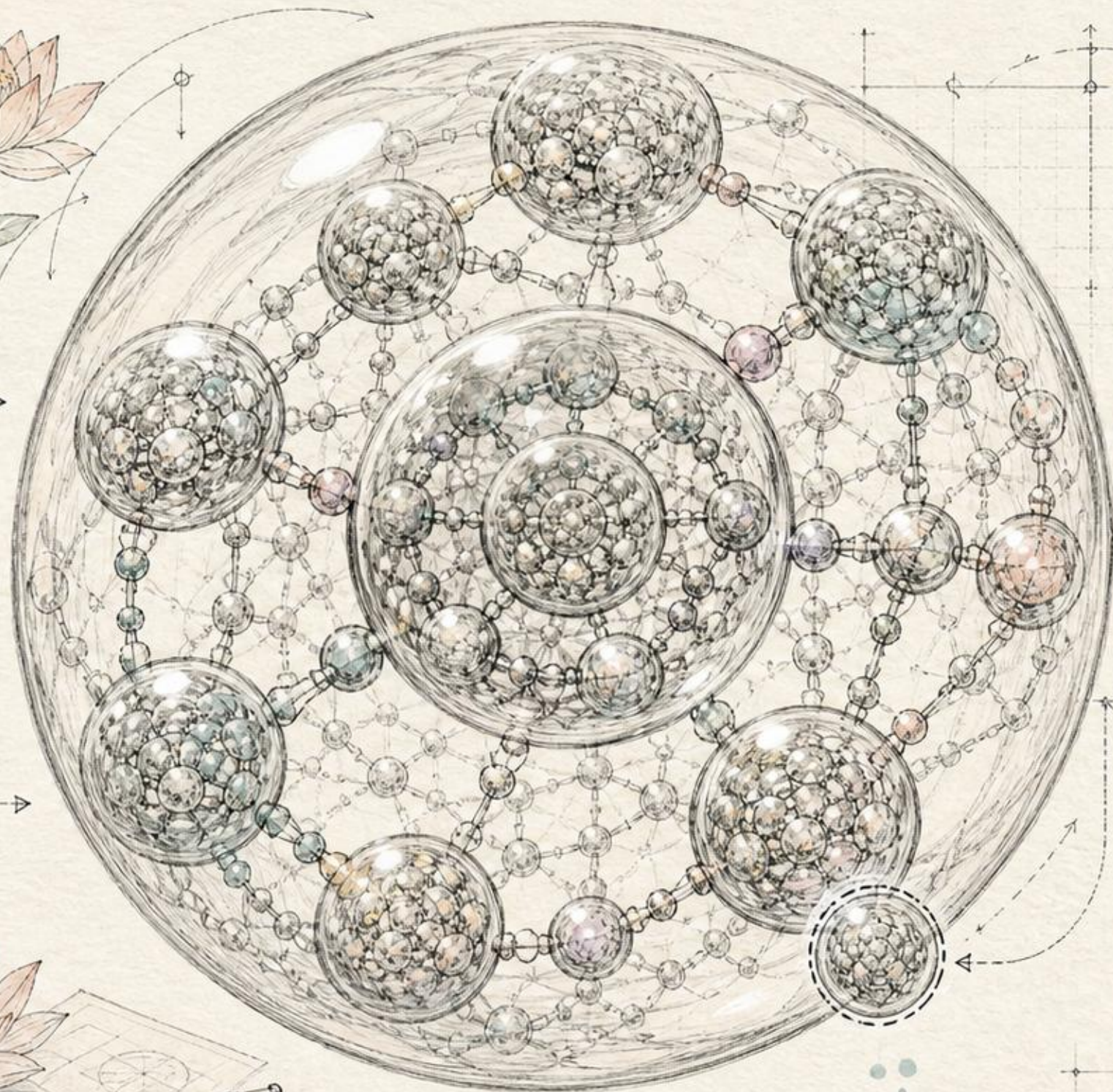
互摄

相互包含，无尽关联。



递归

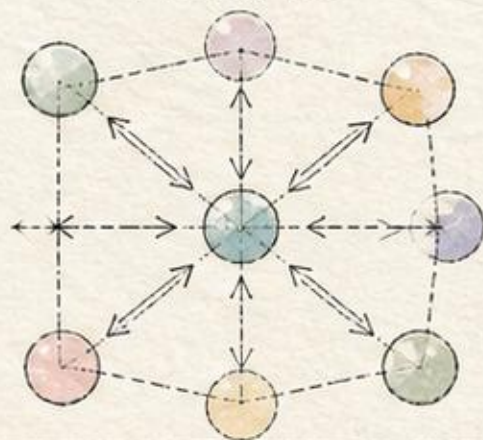
映像中有映像的映像。



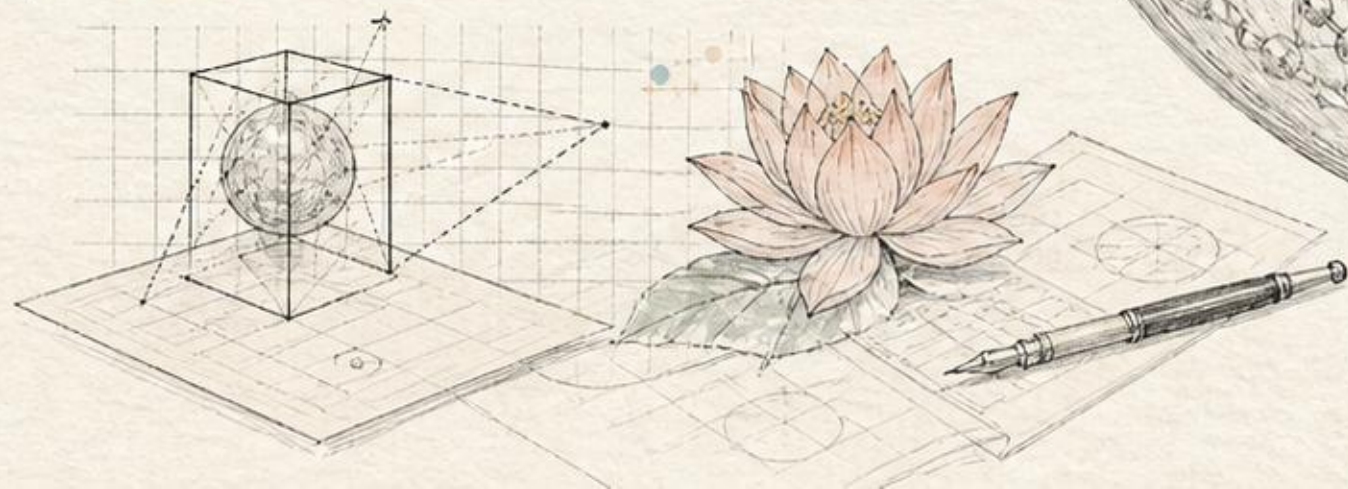
从你这个节点的角度投射

每个视角都不同，
但整体从未缺席。
视角改变，网络不变。
这就是递归的智慧。

节点视角示意



--- 映照关系
→ 信息投射



一千三百年前

- 没有显微镜
- 没有望远镜
- 没有粒子对撞机

因陀罗网

大毗卢遮那经
卷第二

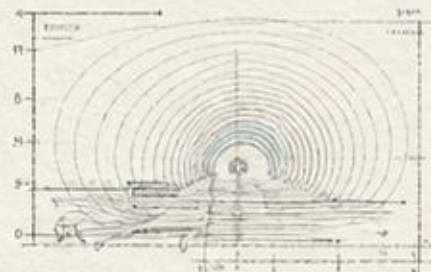
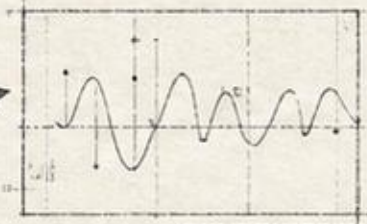
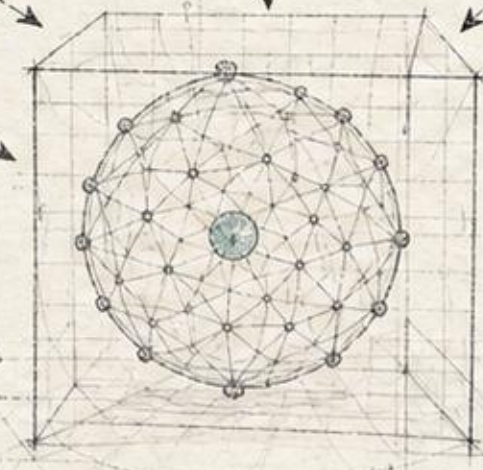
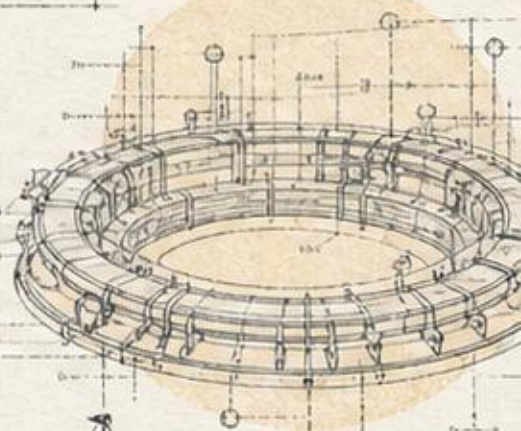
一即一切一切

怎么可能描述出
宇宙的真实结构呢？

别急着下结论

我们先看看物理学家们独立发现了什么。

现代物理学的探索
独立发现的线索



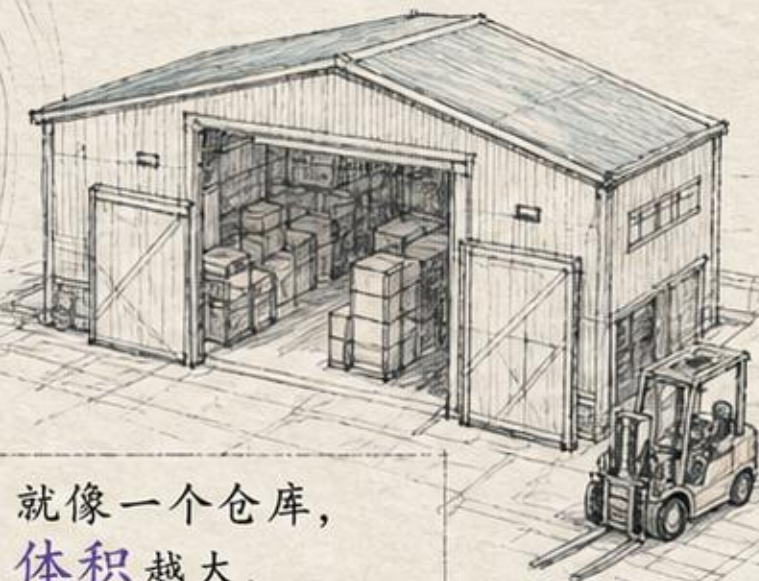
一九七三年

以色列物理学家
贝肯斯坦正在研究黑洞。

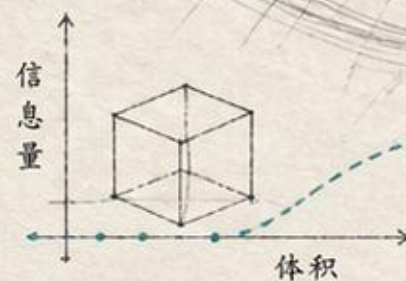
一个黑洞
能装多少信息？



直觉告诉你
信息量应该跟黑洞的
体积成正比。



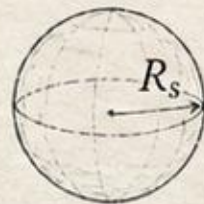
就像一个仓库，
体积越大，
能装的东西越多。



信息量
与什么成正比？

?

体积 $\propto$ 信息量



$$V = \frac{4}{3} \pi R_s^3$$

信息 $\sim V$

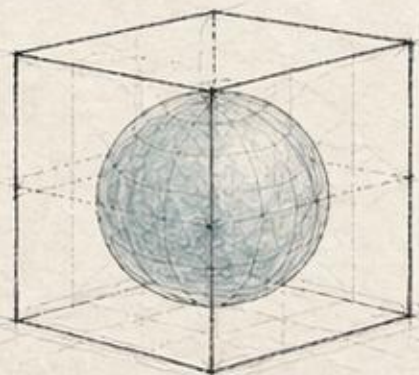
广义相对论
量子理论基础
热力学与信息
引力研究笔记

1973

$$S \leq \frac{kA}{4R_p}$$

直觉告诉我们
信息量 $\propto$ 体积

体积越大，能装的信息越多。



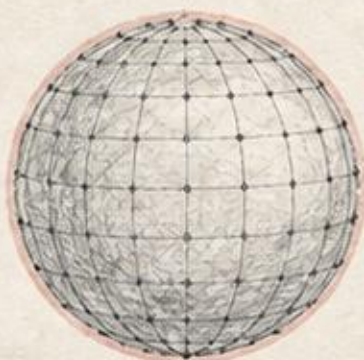
三维体积

信息量 $\propto V$

VS.

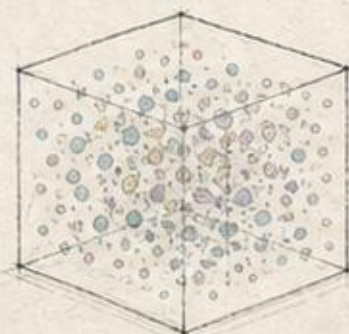
贝肯斯坦的结果
信息量 $\propto$ 表面积

信息被编码在边界上。



二维表面

信息量 $\propto A$



三维内部
海量信息

全部内容
被编码在



二维表面（视界）
有限编码

黑洞的信息悖论

关于黑洞内部一切的全部信息，
不是分布在三维的内部空间里，
而是被编码在了它的**二维表面**上。

视界

贝肯斯坦-霍金黑洞熵公式

黑洞的熵等于它视界面积的四分之一。

$$S = \frac{k_B c^3}{4\hbar G} A$$

S : 熵
 A : 视界面积
 k_B : 玻尔兹曼常数
 c : 光速
 $\hbar$: 约化普朗克常数
 G : 引力常数

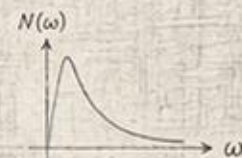
一个三维空间的
全部内容，
被一张**二维**的
表面装下了。

太反直觉了！

霍金的验证

用量子力学的方法
验证了这个结论。

$$\langle N \rangle = \frac{1}{e^{\hbar\omega/k_B T} - 1}$$



概率辐射 $\Rightarrow$ 熵



1960s-1970s
黑洞热力学的
诞生

1973年
贝肯斯坦提出
熵与面积的关系

1974年
霍金计算黑洞
辐射温度

最终结论
熵只与视界面积有关

● 体积（直觉）
● 面积（真实）
● 编码
● 验证

一九九三年

荷兰物理学家特胡夫特
把它上升为一条普遍原则，
叫**全息原理**。

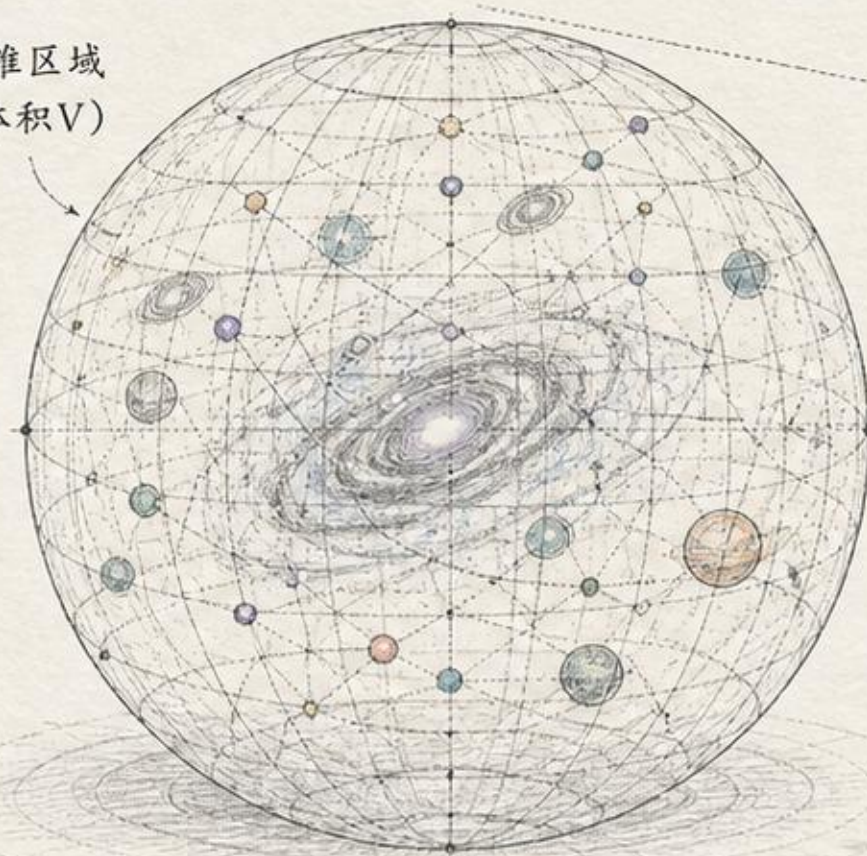
也许不只是黑洞。
也许整个宇宙都是
这样运作的。

发展脉络

- 1973年 贝肯斯坦熵
- 1974年 霍金验证
- 1993年 特胡夫特提出**全息原理**

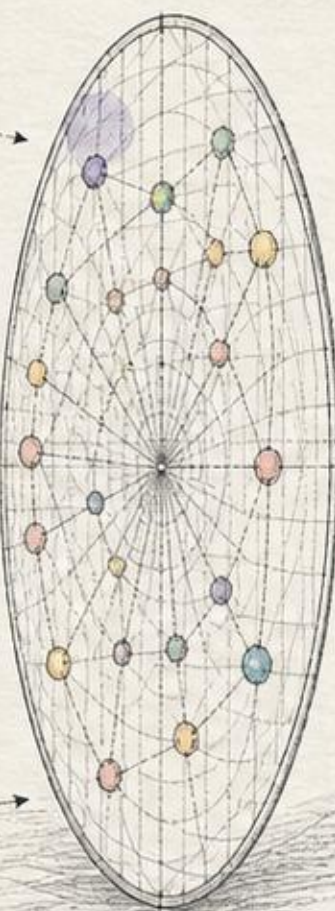
全息原理

三维区域
(体积 V)

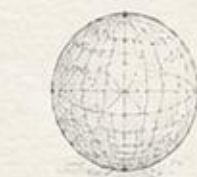


编码

二维边界表面
(面积 A)



信息与几何的关系



体积 $\propto V$

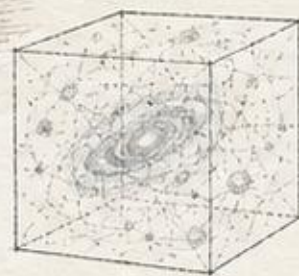


信息 $\propto$ 表面积 A

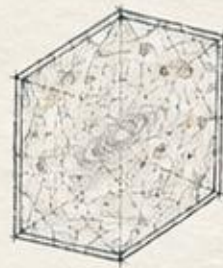
一个区域内
所有的物理信息，
都可以被完整编码在
这个区域的
边界表面上。

三维世界的全部内容，
可能就是二维边界的**投影**。

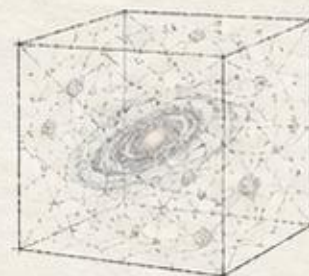
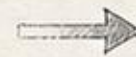
宇宙可能是一张全息图，
我们生活在它的投影中。



区域内的
全部物理信息



完整编码在
边界表面上



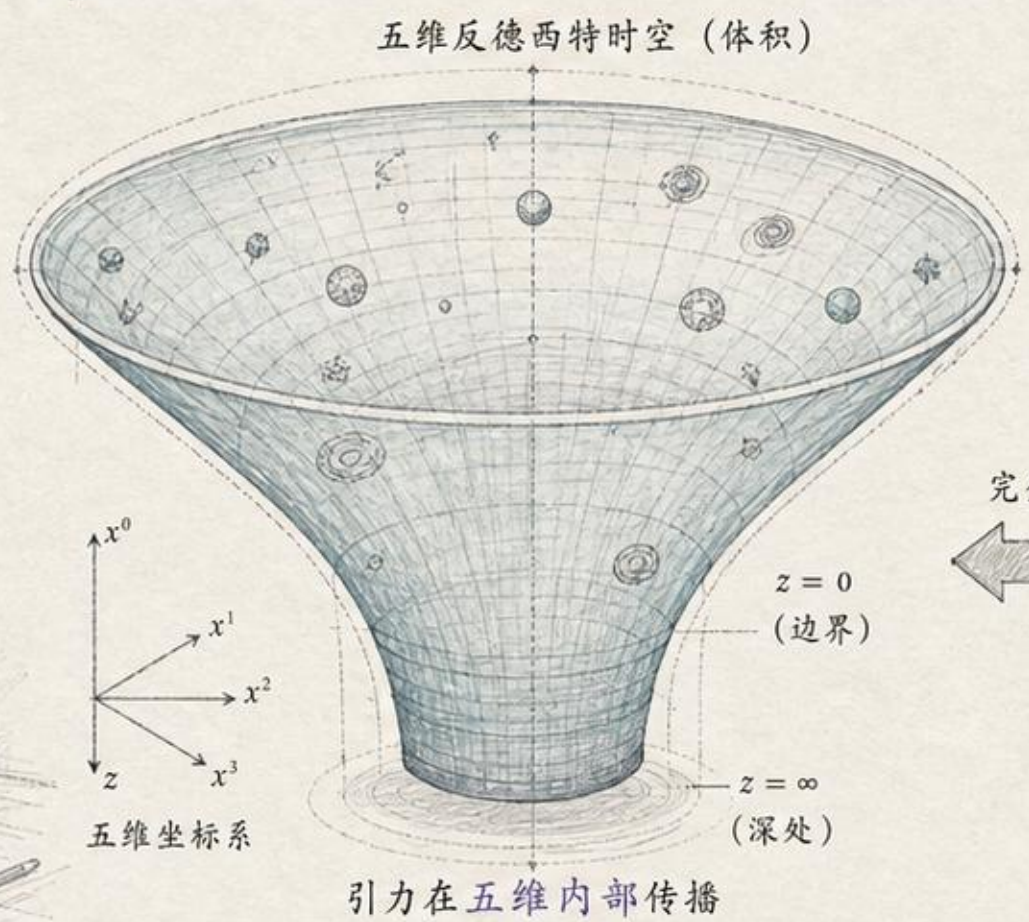
从边界解码后
重构三维内容

● 物质 ● 能量 ● 信息 ● 几何 ● 编码单元

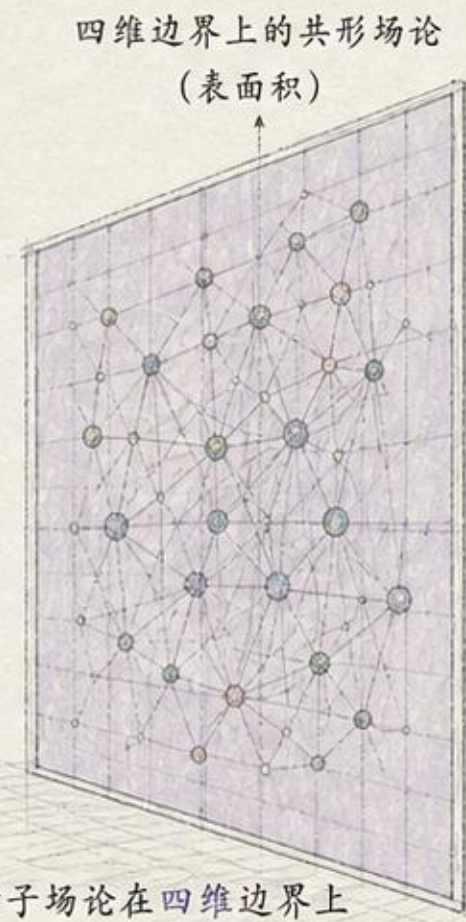
一九九七年

阿根廷物理学家**马尔达塞那**给出了全息原理迄今最精确的数学实现。

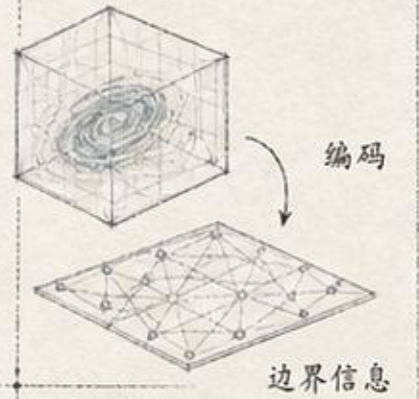
反德西特时空与共形场论的对偶 (AdS/CFT对应)



完全等价



高维内部的全部物理，可以用低维边界的信息完整重建。



直观理解

就像全息照片：三维物体的信息，完整地记录在一张二维的表面上。

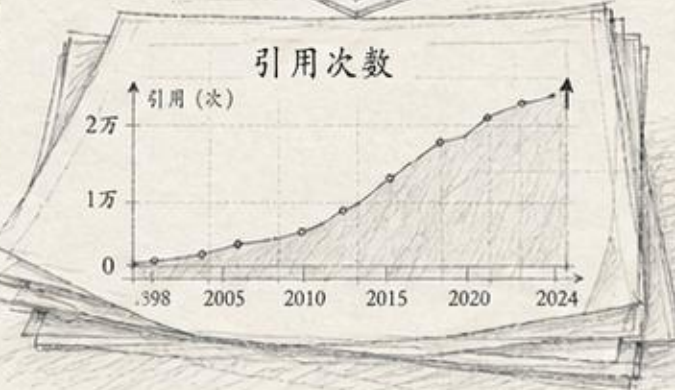


一句话概括：一个**五维时空**里的引力理论，完全等价于它**四维边界**上的量子场论。

信息如何重建高维物理？



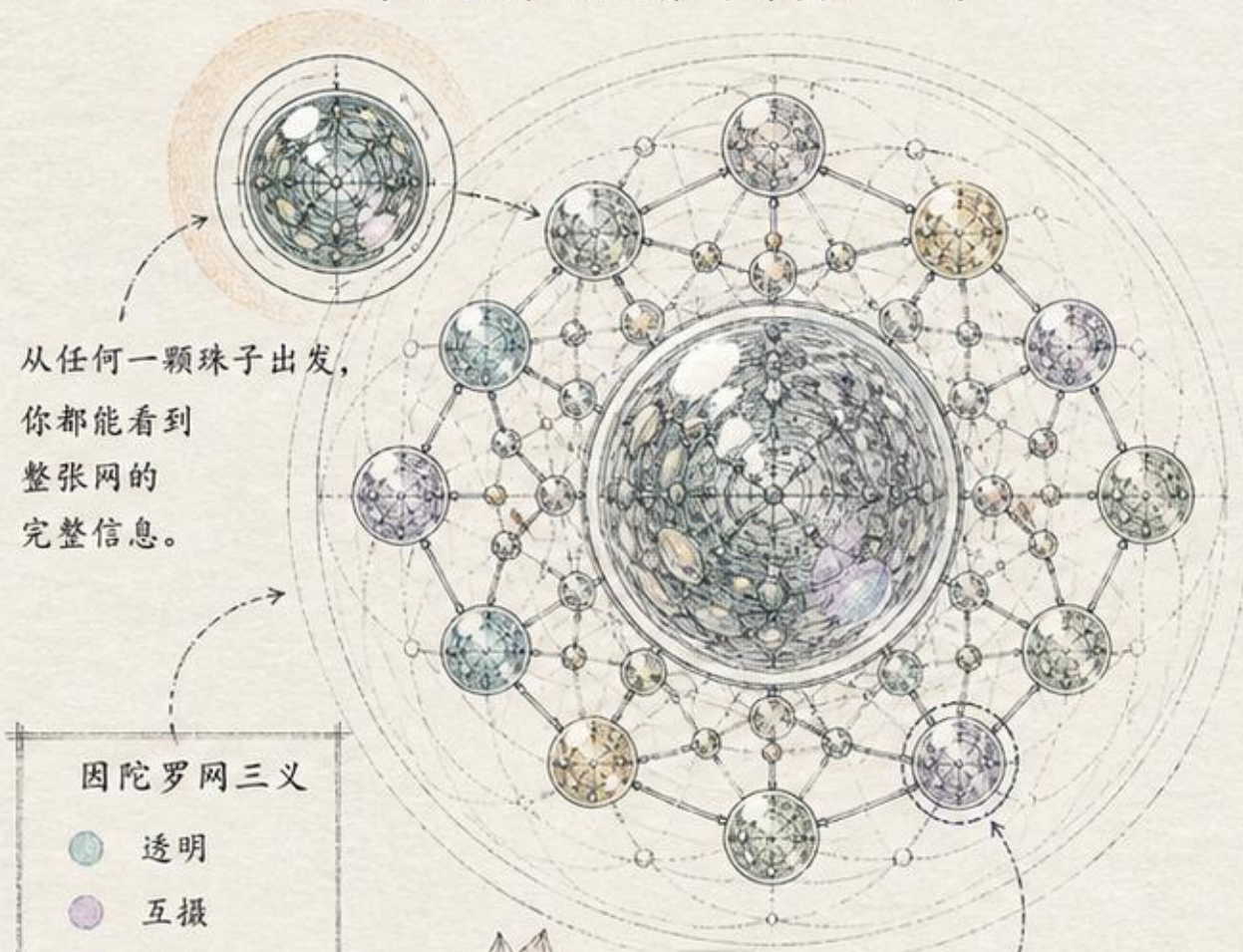
这篇论文被引用了超过**两万次**，是理论物理学史上被引用最多的论文之一。



- 引力
- 量子信息
- 几何
- 物质
- 能量
- 关系/结构

因陀罗网

每颗宝珠映照所有其他宝珠



因陀罗网三义

- 透明
- 互摄
- 递归



共同指向
整体信息
存在于
每一个局部

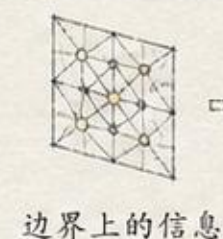
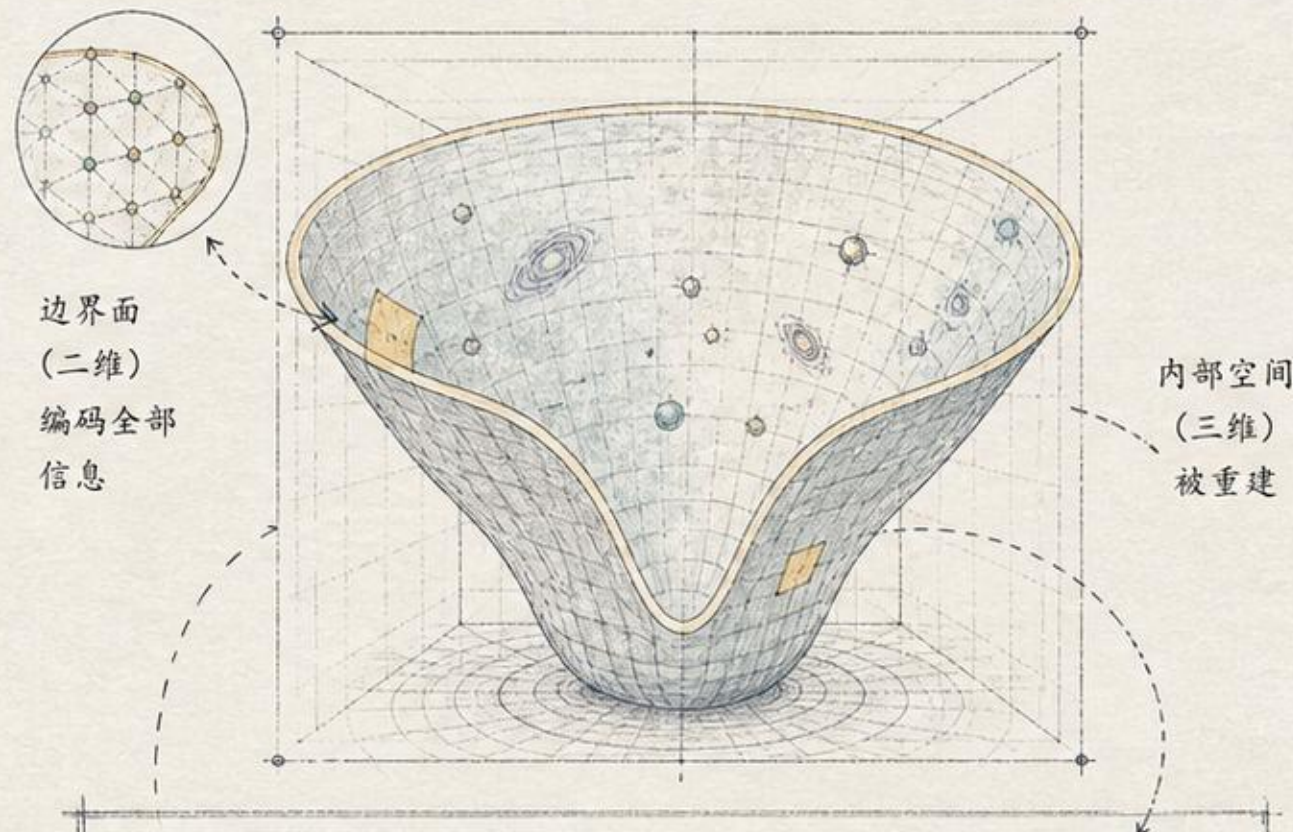


从任何一个局部出发，你都能重建整体。



全息原理

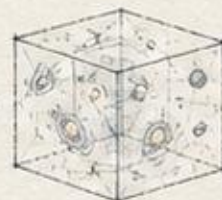
每一块边界面都编码了整个空间的全部信息



边界上的信息

101010
010101
101010

编码



重建内部空间

全部物理信息
由边界完整
编码

两条看似不同的道路，通向同一个洞见
信息的本质是全息的

透明 互摄 递归 边界 信息 空间

因陀罗网

整体信息分布于每一个局部

- 去中心化
- 分布式信息
- 互为映照
- 无核心之核心
- 拓扑结构同构

结构笔记

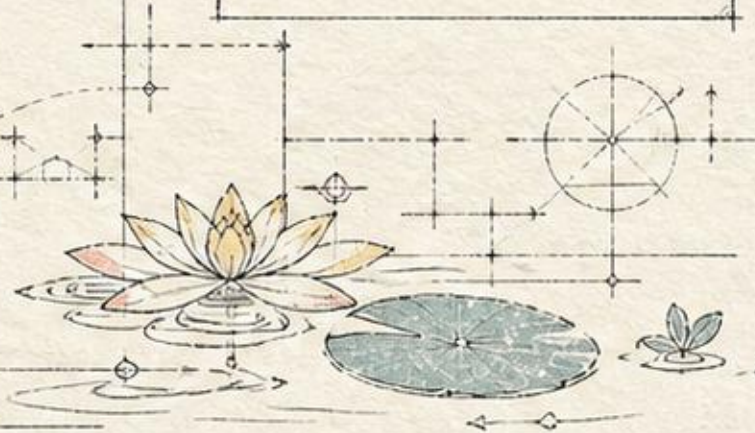
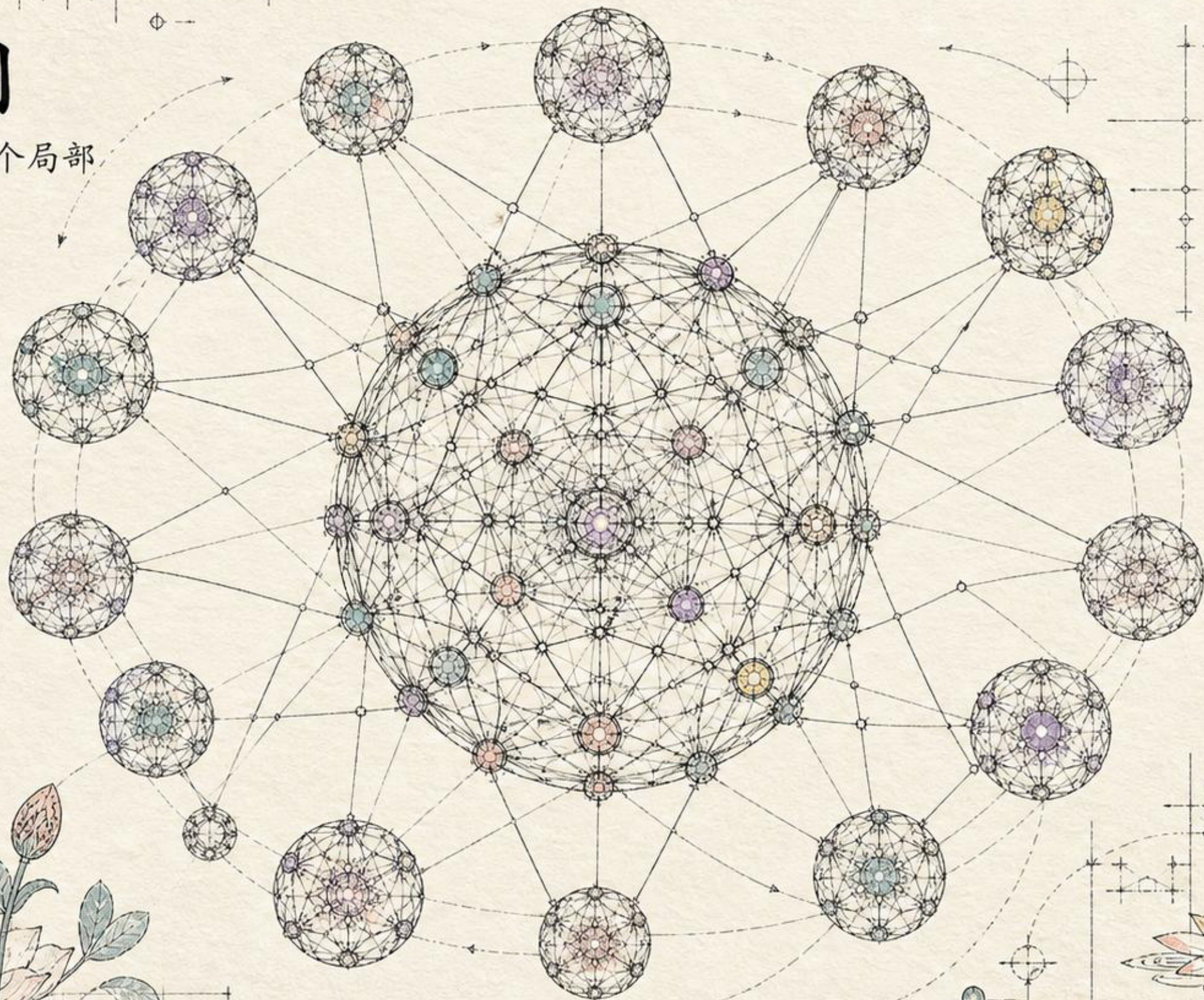
没有哪一个节点
比其他节点更特殊、
更核心。

命题

整体的信息不是
集中存储在某个中心，
而是分布式地铭刻在
每一个局部里。

结论

这不是隐喻层面的相似。
这是拓扑结构的同构。



一九四七年

爱因斯坦致玻恩的私人信件

“量子力学对
物理实在的描述，
看来是不完备的……
这表现为一种
幽灵般的超距作用。”

——爱因斯坦

他不接受非定域性，
认为理论一定不完备。

量子纠缠：超距而不违因果

- 非定域性
- 幽灵般的超距作用
- 实验检验与实证

二零二二年

诺贝尔物理学奖
授予三位实验物理学家



阿斯佩
(Alain Aspect)



克劳泽
(John F. Clauser)



蔡林器
(Anton Zeilinger)

几十年实验，堵住每一个理论漏洞，
最终证明：量子纠缠是真实的。



无论距离多远，
测量结果瞬时相关。

爱因斯坦关于局域实在论的直觉，
被实验彻底否定了。

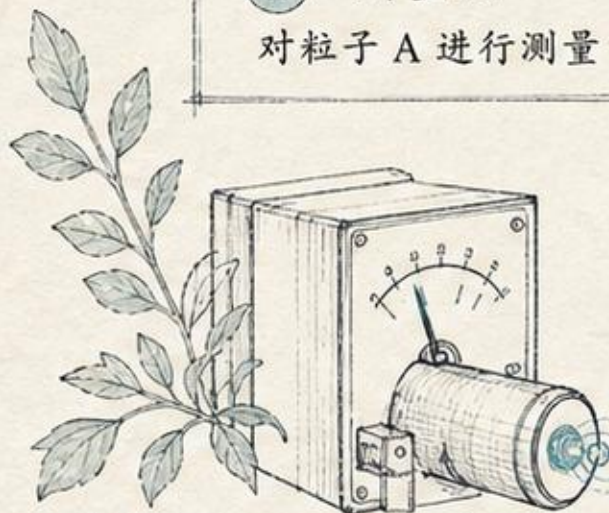
实验
证实

量子力学
量子信息
实验物理学

量子纠缠：一个不可分割的整体

1 测量 A

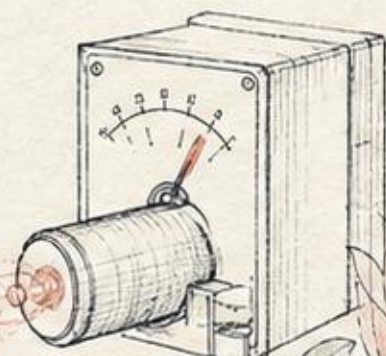
对粒子 A 进行测量



测量结果：向上

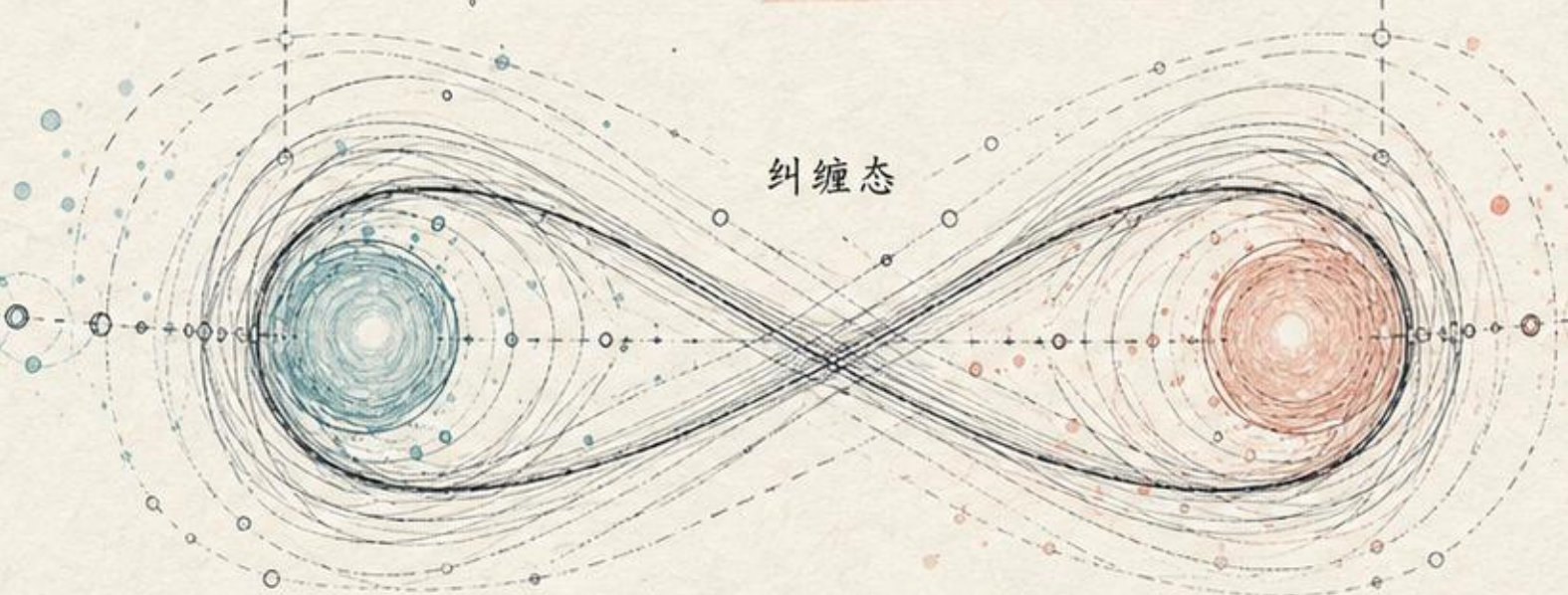
2 瞬间确定 B

无论相隔多远



结果必然：向下

两个粒子一旦发生了纠缠，
它们是一个不可分割的整体。



关键特性



无论距离多远



瞬间确定对方状态

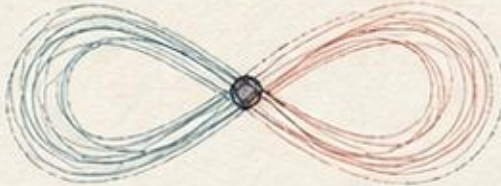


不能再被当作两个
独立的个体

不是两个有关联的东西



而是一个不可分割的整体



纠缠的本质：
整体先于部分，
关系先于独立。

实验验证的历程



爱厄斯坦
质疑非定域性

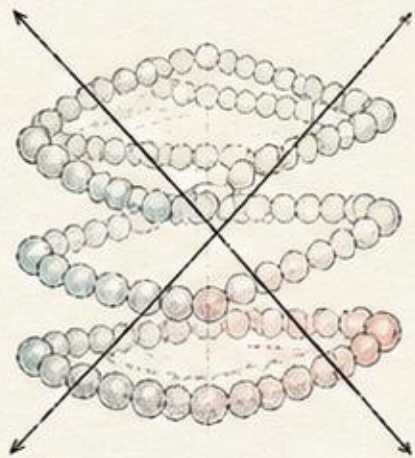
实验不断逼近
堵住理论漏洞

实验结论
纠缠真实存在



不是先独立存在

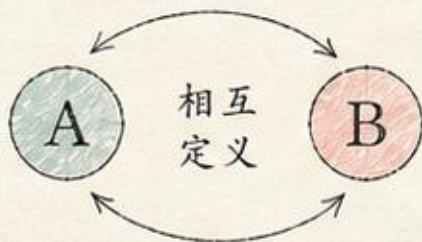
A 和 B 不是先独立存在，
再建立关系。



先有 A 后有 B
再建立关系

相互定义

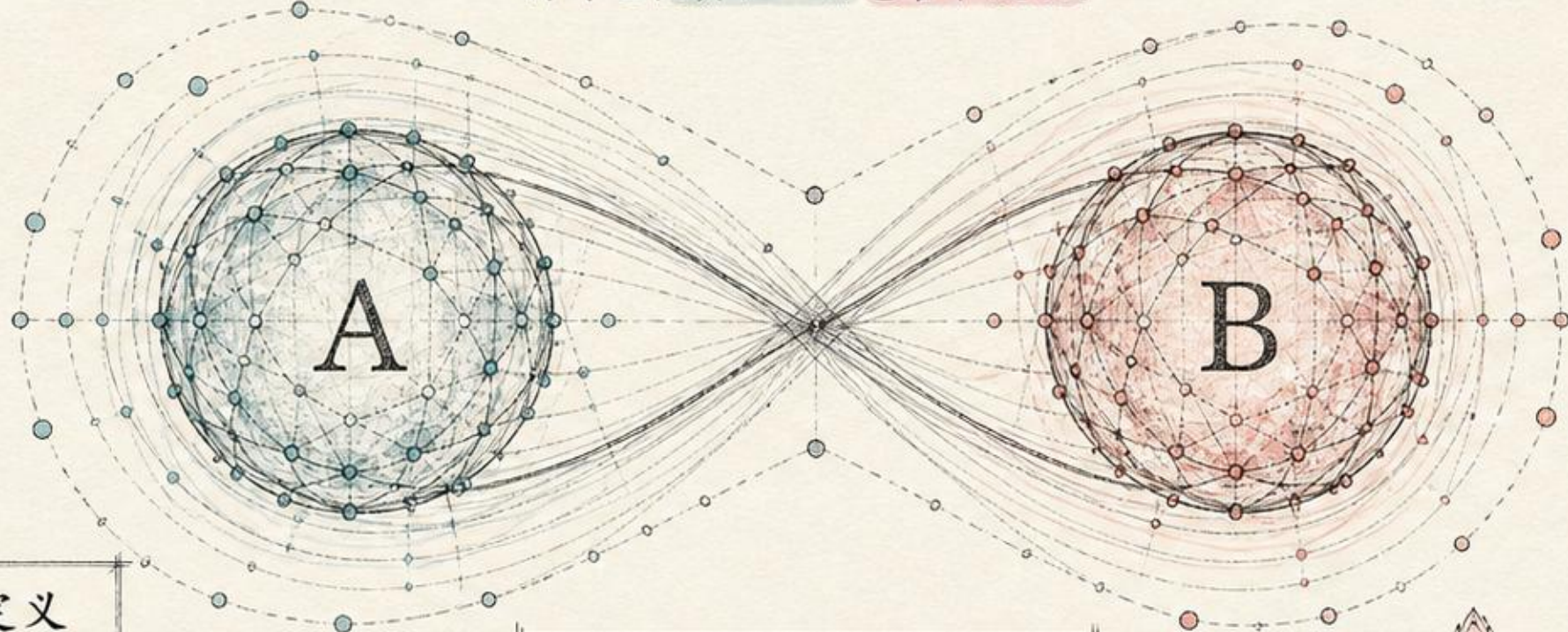
A 的存在以 B 为条件，
B 的存在以 A 为条件。



因陀罗网的第二个属性

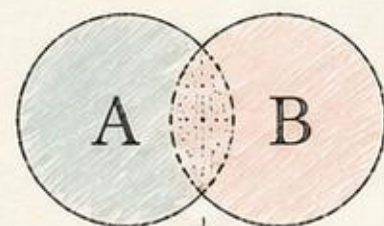
互摄

每一个存在都包含并反映着其他一切，
同时也被其他一切包含和反映。



互为前提

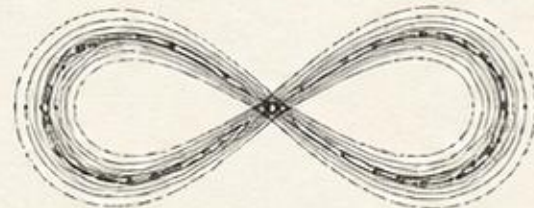
A 和 B 是彼此成立的前提，
缺一不可。



前提条件

不可分割

它们不是两个有关联的东西，
它们是一个不可分割的整体。



整体 > 部分之和

这不就是量子纠缠的
字面描述吗？

没有 A，就没有 B；
没有 B，也没有 A。



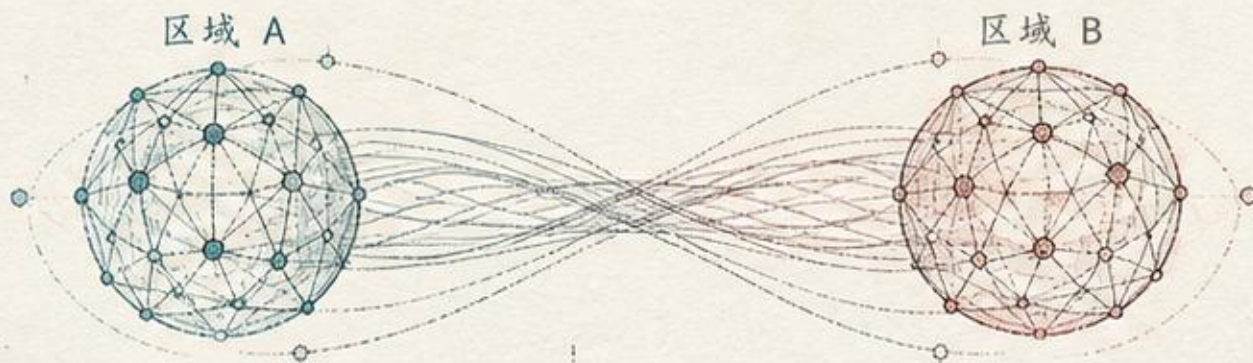
二零一零年 范拉姆斯东克的思想实验



范拉姆斯东克
(Veronika Van Raamsdonk)
加拿大物理学家

全息原理的框架下

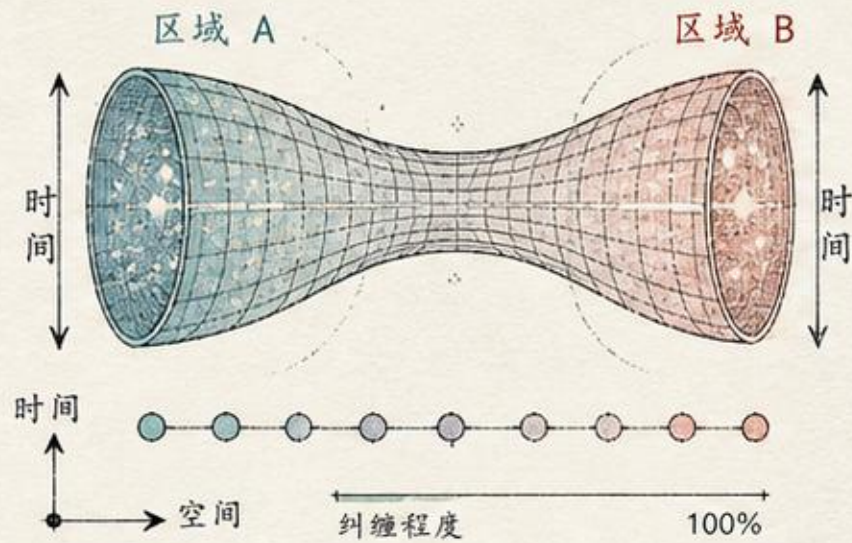
一个简单的问题：如果我们逐步解除两个区域之间的量子纠缠，会发生什么？



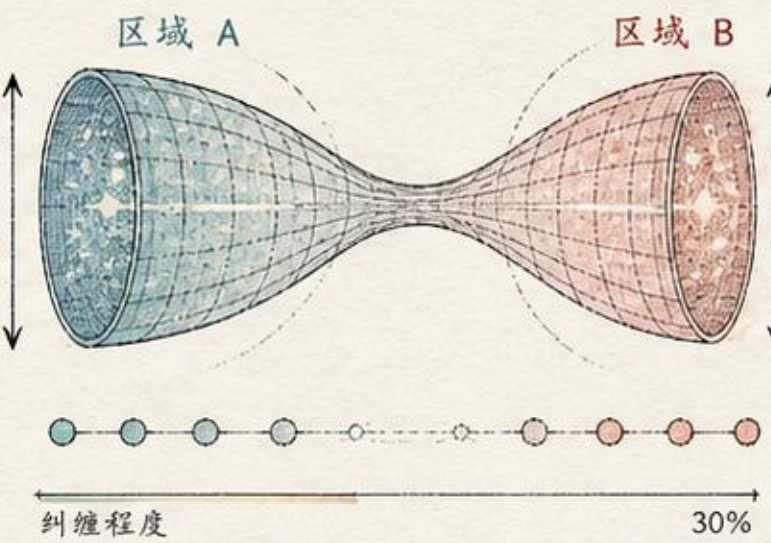
因陀罗网式结构的
物理后果



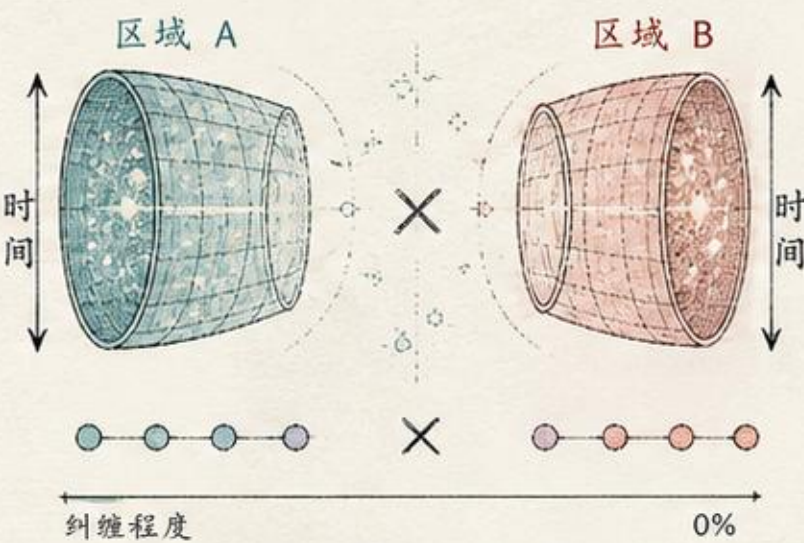
1 强纠缠：时空连通



2 中等纠缠：时空收缩、变窄



3 无纠缠：时空断开



结论

纠缠消失了，
时空就断了。

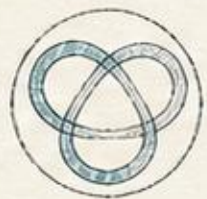
时空的连通性，
由量子纠缠决定。

关键洞见

时空不是先验的舞台，
而是量子信息关系的涌现。



这个结论的分量



纠缠不仅仅是
粒子之间的某种关联。



纠缠可能就是
时空本身的黏合剂。



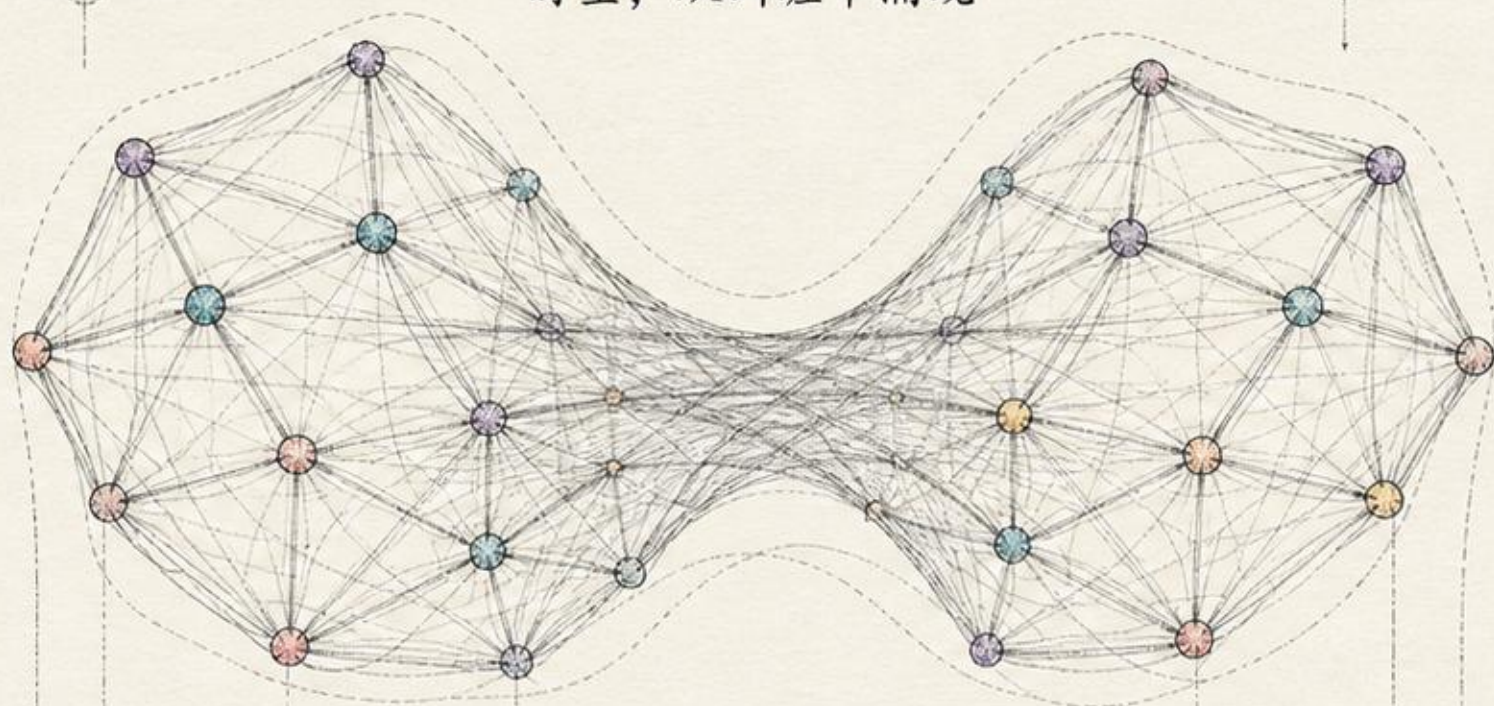
没有纠缠，
就没有连续的时空。



纠缠消失，
时空就断裂。

纠缠：时空的黏合剂

时空，从纠缠中涌现



纠缠关系编织成时空的连续性



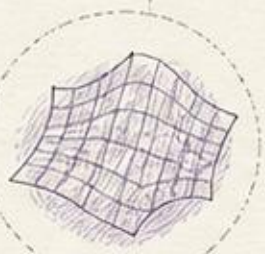
粒子



纠缠关系

+

=



时空结构

空间本身，可能就是由
粒子之间的纠缠关系
编织而成的。

思想实验：解除纠缠的后果



强纠缠：
时空连通



逐步解除：
时空收缩、
变窄



无纠缠：
时空断开

全息原理的启示



纠缠是更基本的存在。



时空是从纠缠中涌现的结果。



因陀罗网，或许就是物理现实的隐喻。

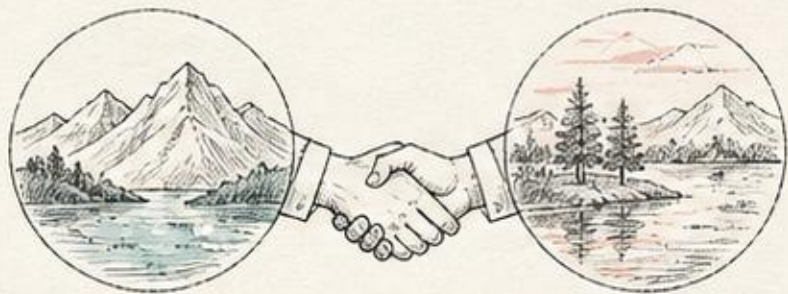
“

空间不是一个预先存在的舞台，
让粒子在上面表演。

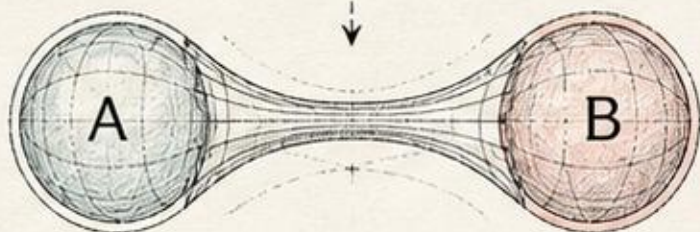
”

二零一三年

马尔达塞那 & 苏斯金德
提出大胆猜想

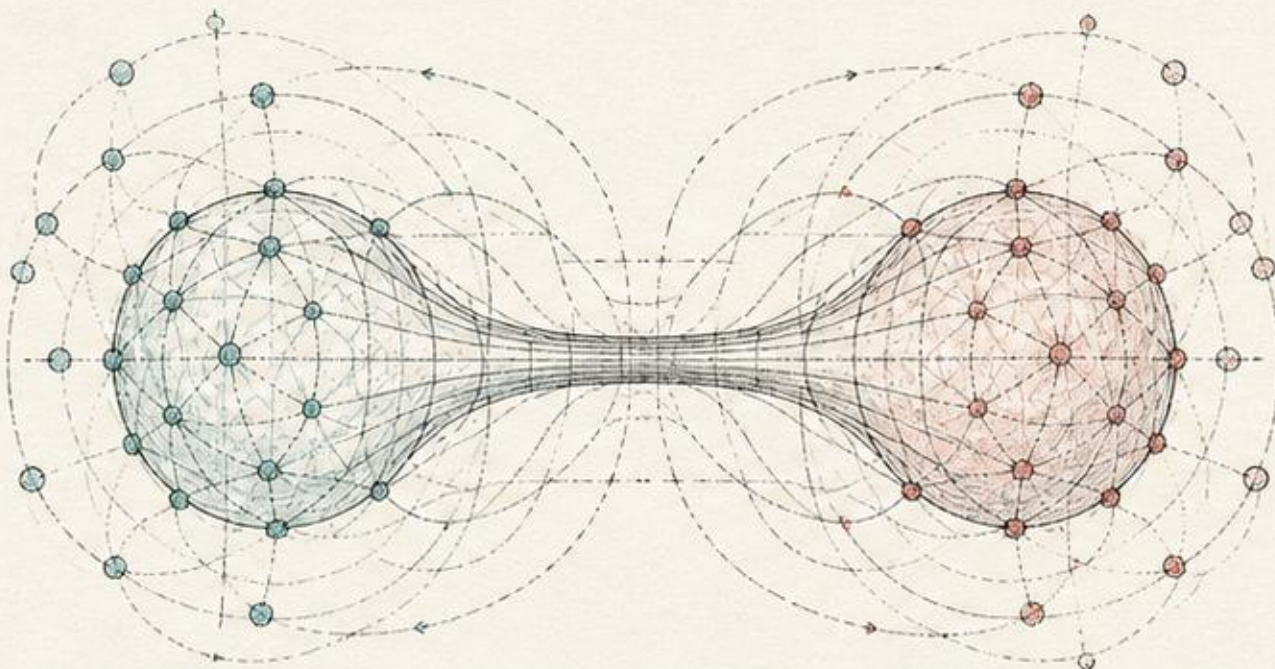


任何一对纠缠粒子之间，
都有一条**微型的虫洞**连接着它们。



虫洞连接

纠缠 = 时空连通性



虫洞

=

纠缠

=

时空连通性

“
纠缠关系等于时空连通性。
虫洞等于纠缠。
”

二零二四年

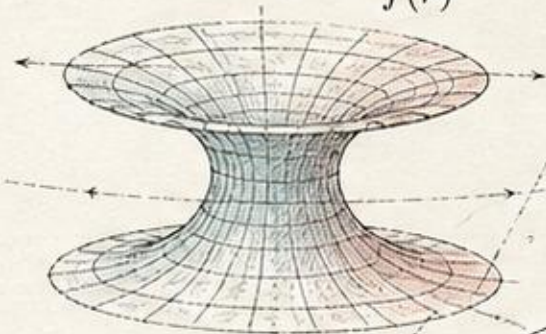
蒋鑫等人发表最新论文
首次从量子纠缠的**数学结构**中，
直接推导出了虫洞的几何形状。

纠缠的数学结构

$$|\Psi\rangle = \sum_i \sqrt{\lambda_i} |i_A\rangle |i_B\rangle$$

推导出虫洞几何

$$ds^2 = -f(r) dt^2 + \frac{dr^2}{f(r)} + r^2 d\Omega^2$$



① 从猜想到理论



纠缠让两个粒子相连，
虫洞提供了几何图像。

② 从数学到几何



纠缠的数学结构，
推导出虫洞的形状。

③ 从类比到构成



纠缠不再只是时空的类比，
它正在成为时空的**微观构成**。

核心启示

时空，可能从纠缠中诞生；
纠缠，可能编织出宇宙。

解除纠缠，
时空就断裂。

关系就是距离的底层。

时空断裂

信息失联
距离无限大

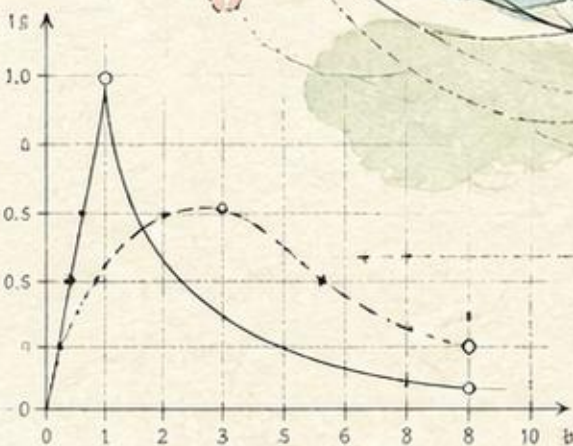
空间变薄，
变透明。

哪怕近在咫尺，
也像隔了一个宇宙。

纠缠态
信息共享
距离趋近

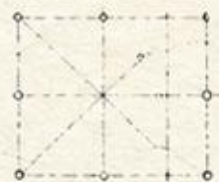
关系先于空间，
关系决定距离。

纠缠破裂
信息断联
时空断裂



关系编织时空，
而不是被时空容纳。

纠缠存在



纠缠消失



纠缠消失，
时空断裂。

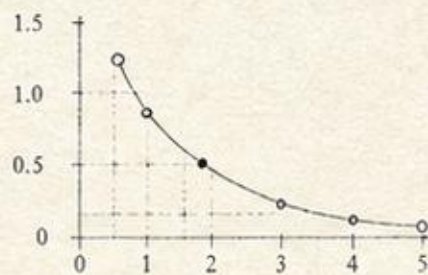
关系
是距离的底层

时空
不是基本的

关系
才是基本的

关系存在
距离具有意义

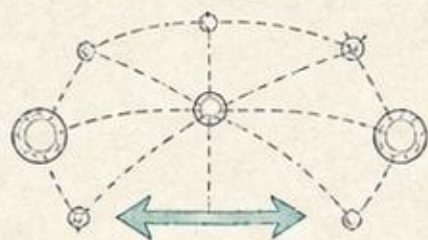
关系消失
距离无限大



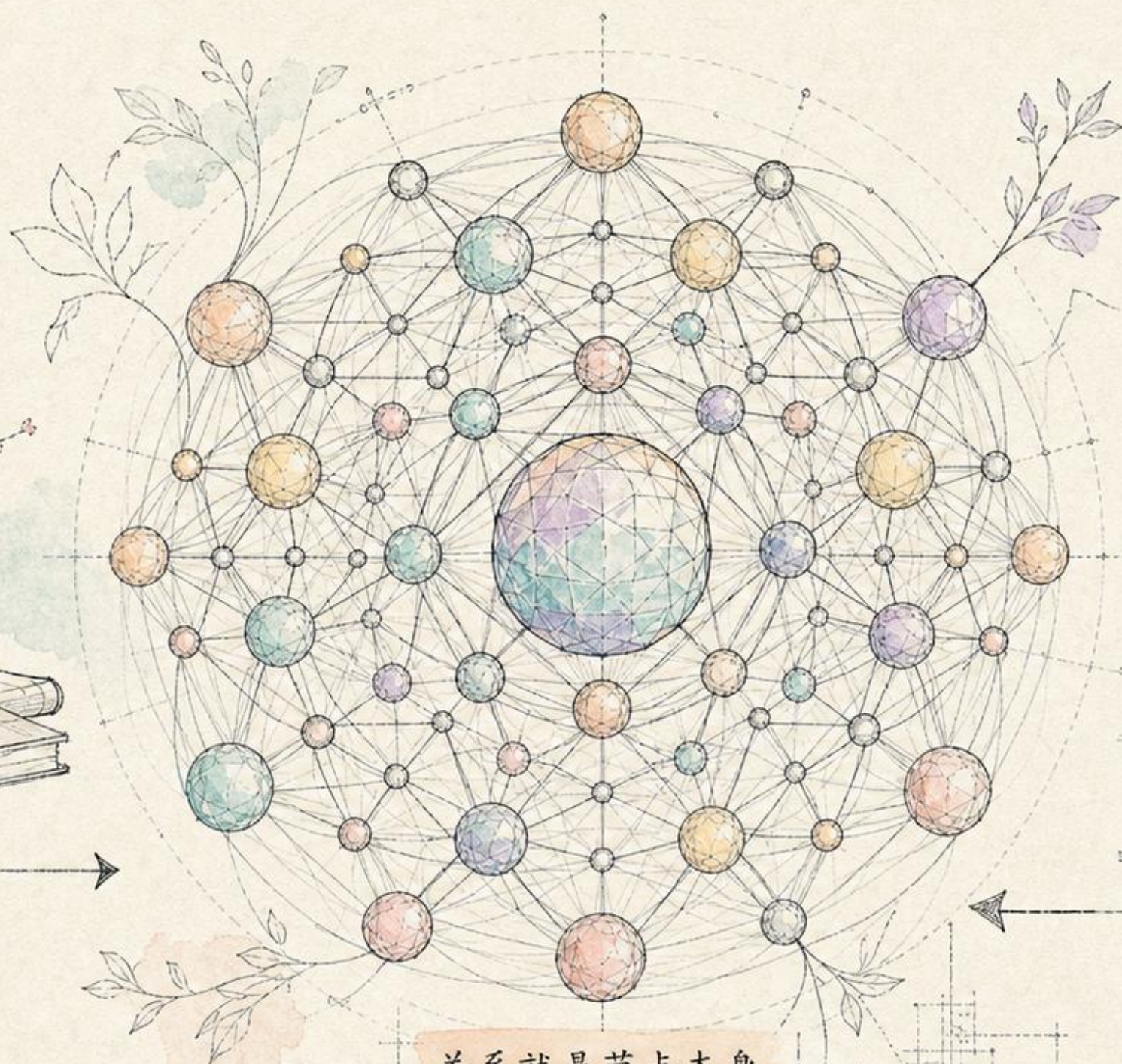
一千三百年前，
法藏用因陀罗网
说的是同一件事。



映照关系本身
就是宝珠存在的方式。



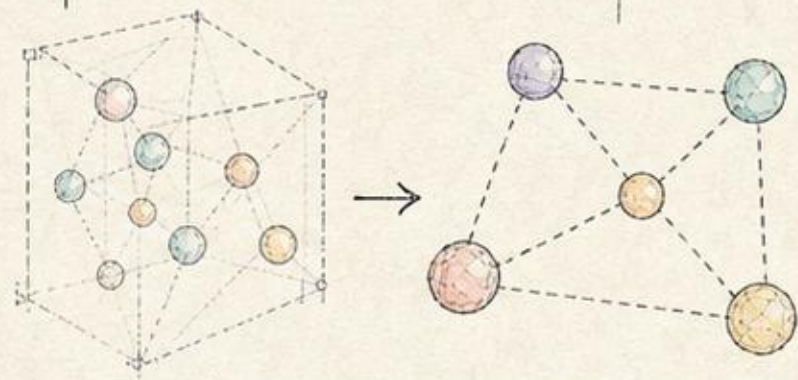
关系 = 存在的方式



关系就是节点本身

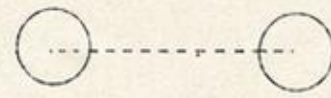
关系 = 节点

宝珠不是先存在于
某个空间里，
然后彼此映照。

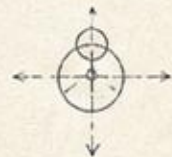


映照关系本身就是
宝珠存在的方式。

关系不是节点之间的
附属品。



关系就是节点本身。



戴维·玻姆 (David Bohm)

1980年提出 隐缠序 理论



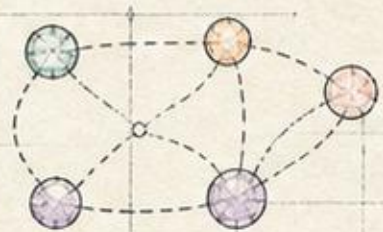
隐缠序

更深层的、卷入的、不可分割的秩序

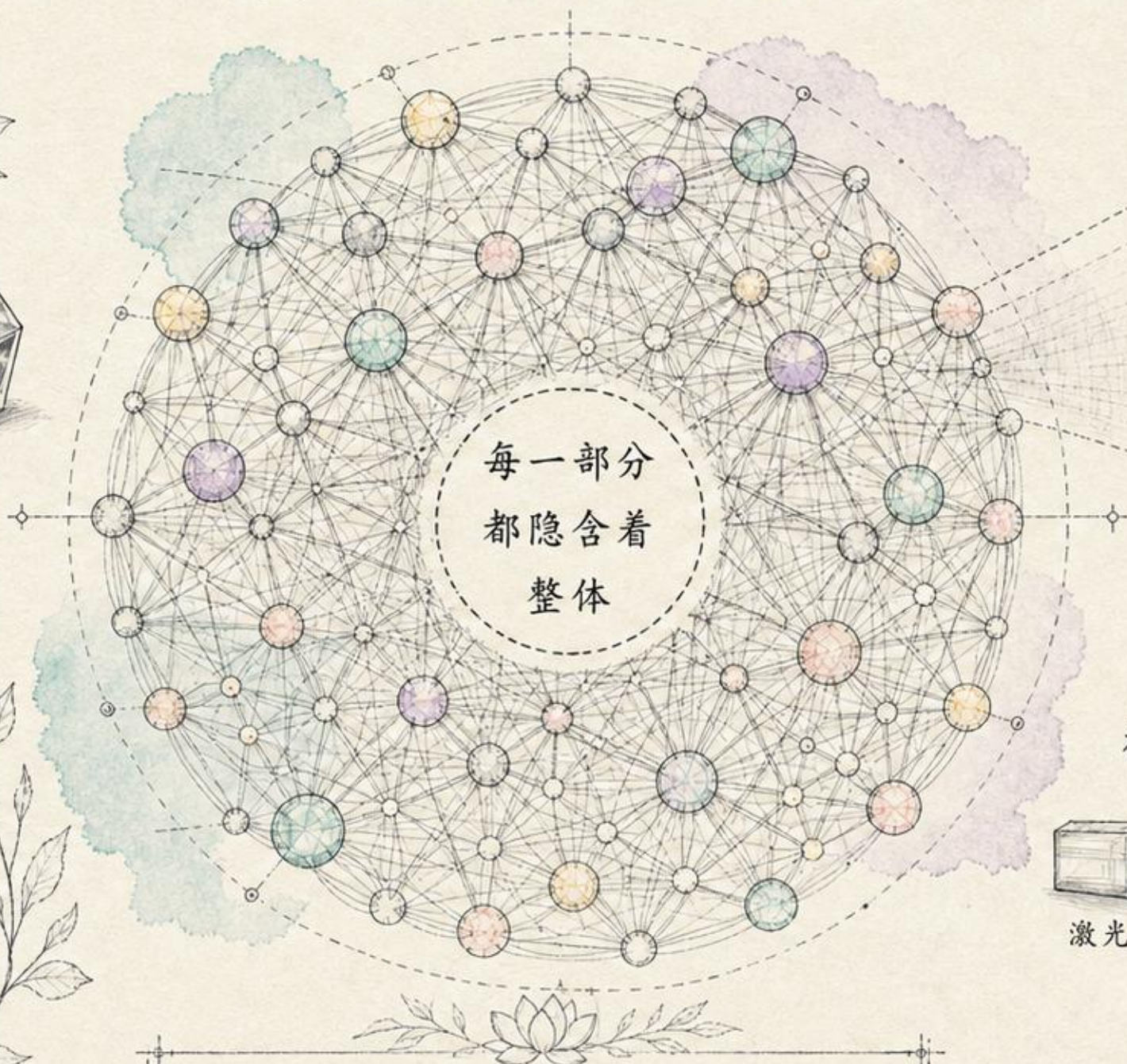
投影
我们看到的世界



底层结构：
一张相互卷入的
信息网络

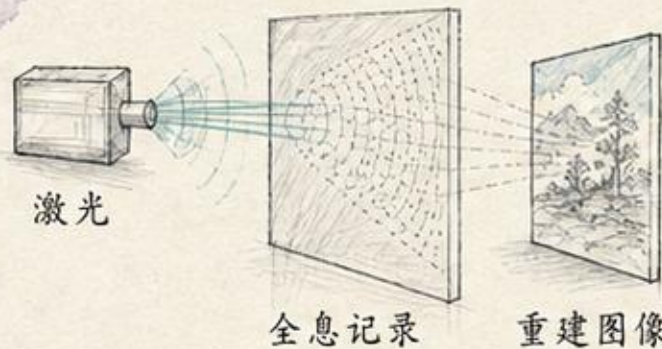


● 相互卷入
● 不可分割
● 信息网络



● 展开的
● 分离的
● 有边界的世界

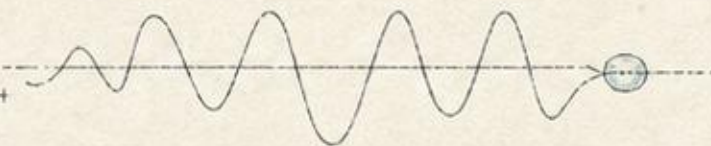
核心隐喻：全息照片



即使碎片中，
依然包含
完整信息。

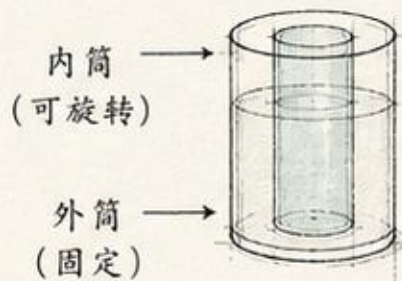


关系不是附属品，关系就是本身。



玻姆的墨水实验

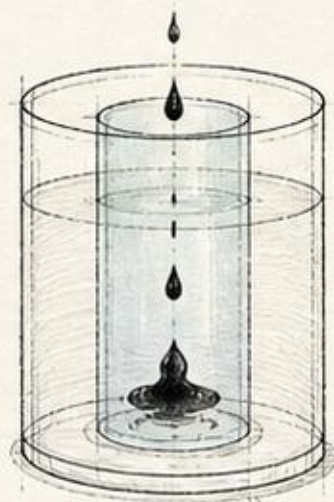
两个套在一起的圆筒，
中间填满高粘度的甘油，
然后滴入一滴墨水。



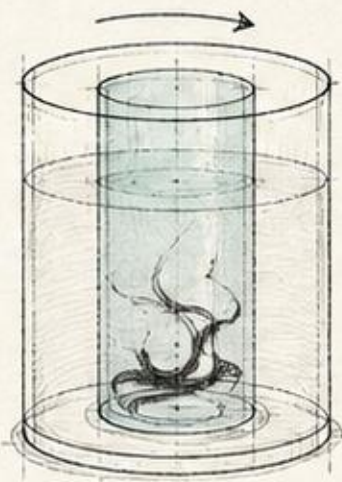
甘油(高粘度)



① 滴入墨水

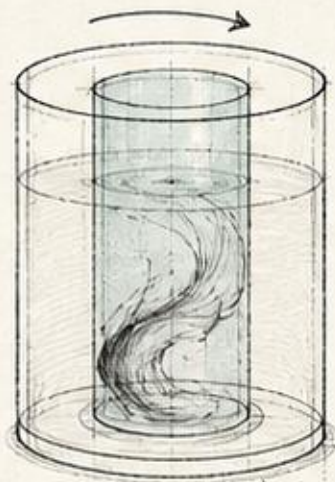


② 转动内筒



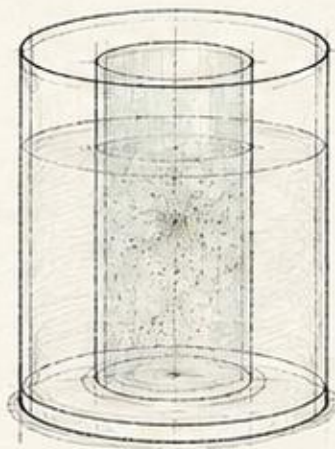
慢慢转动内筒

③ 拉伸、弥散

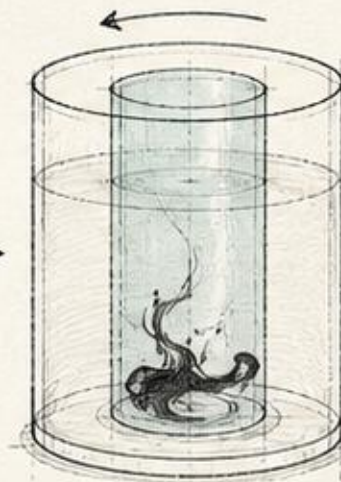


墨滴被卷入隐含的秩序，
看不见了。

④ 完全消失



⑤ 反向转动



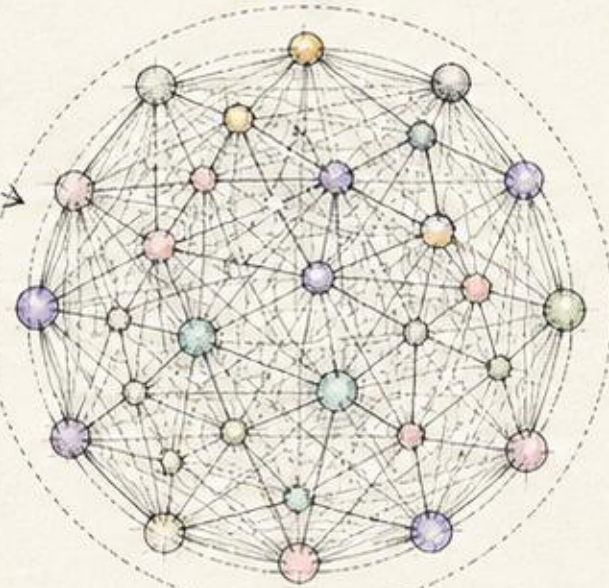
墨滴重新聚合还原，
它没有消失。

被卷入的秩序

墨滴并未消失，它只是
被卷入了隐含的秩序中。



隐含的秩序



整个宇宙就是这样运作的。

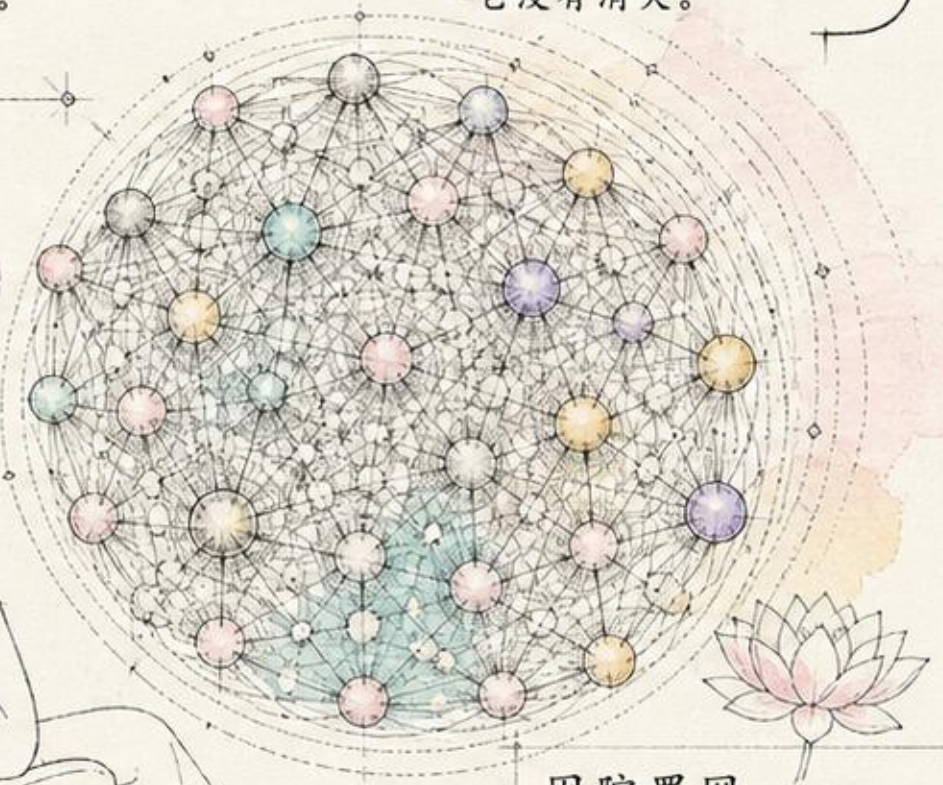
更深层的、卷入的、不可分割的秩序

玻姆与因陀罗网

据学生回忆：

玻姆后来读到华严经
对因陀罗网的描述，
沉默了很久，然后说：

这就是我试图
用数学表达的东西。



因陀罗网

每一颗宝珠都映照彼此，
每一颗宝珠都包含整个网。

关系不是附属品，关系就是本身。

华严经

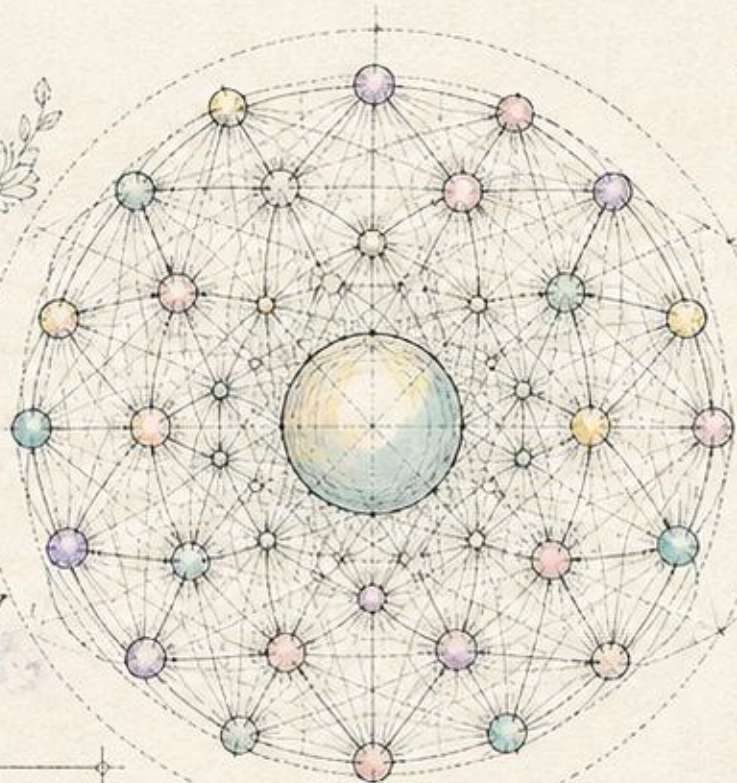
佛学的存在论

它们在结构上趋同了

全息原理

物理学的数学定理

因陀罗网
一即一切，
一切即一。

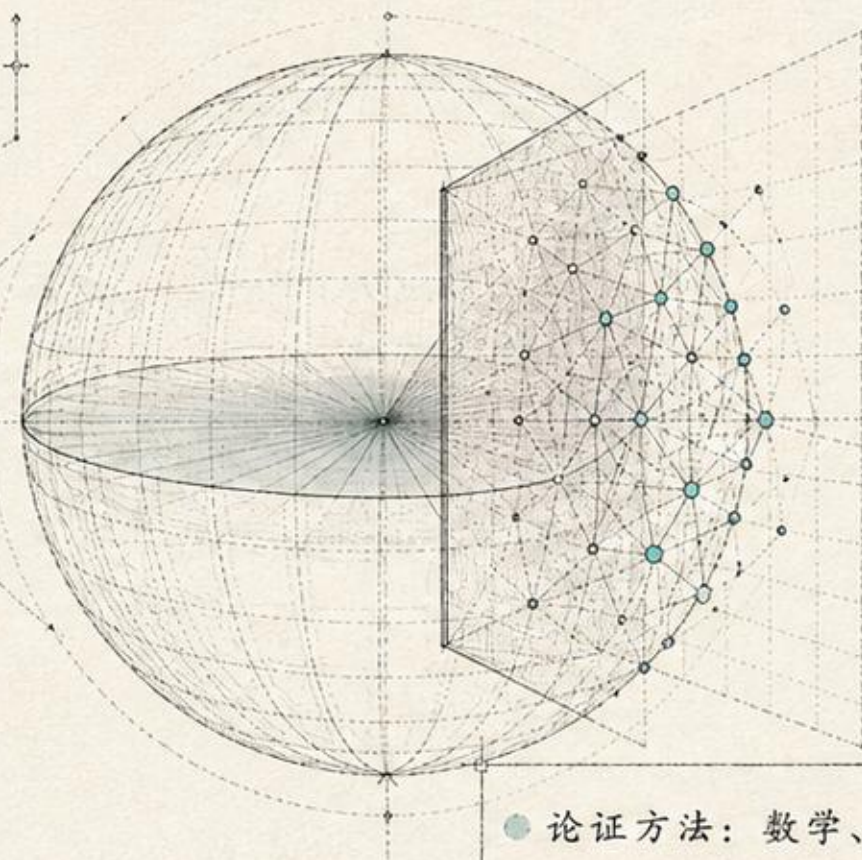


不同的路径
相同的结构

结构
趋同

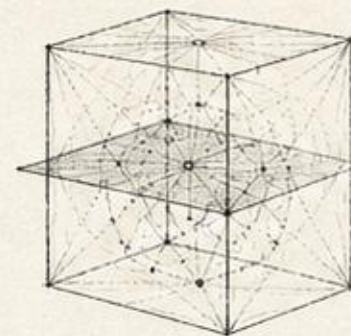
共同指向

关系是本原，
整体在部分中显现。



全息原理

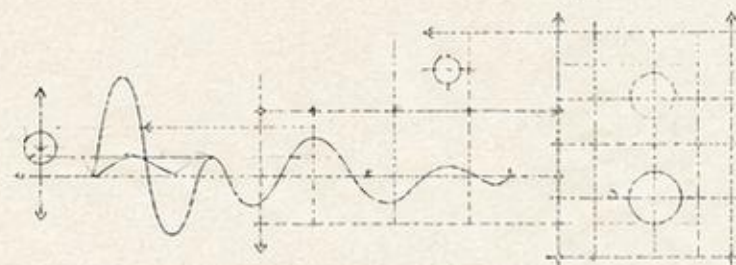
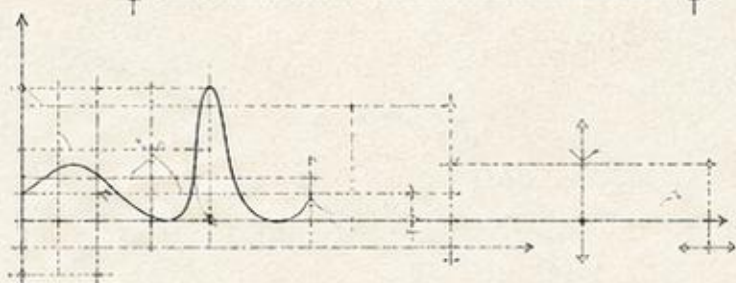
边界编码体积，
整体投影于部分。



- 论证方法：直观、禅观
- 证据标准：体悟、证量
- 适用范围：存在与经验
- 核心：关系即存在

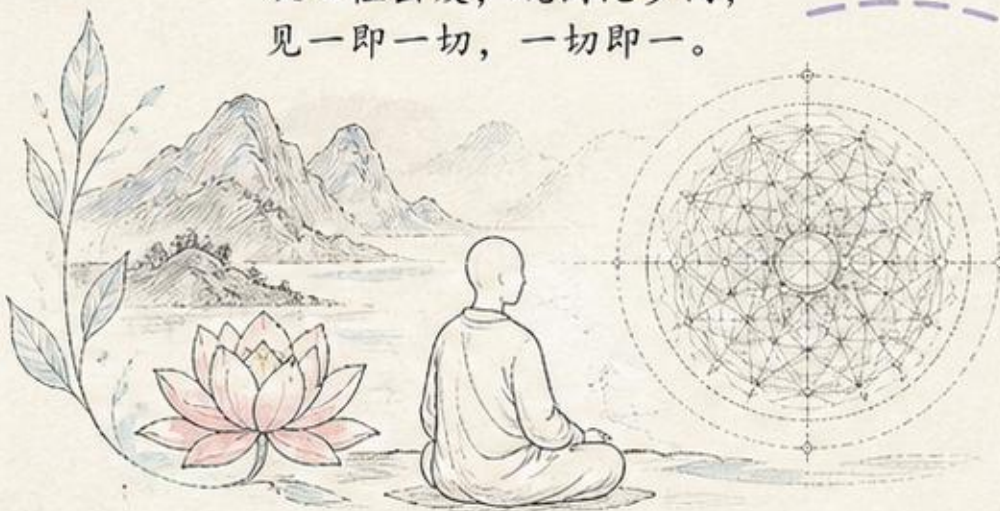
- 论证方法：数学、逻辑、演绎
- 证据标准：可检验、可重复
- 适用范围：物理系统与时空
- 核心：信息即结构

我不是在说华严经预言了全息原理。



① 七世纪 法藏的禅观

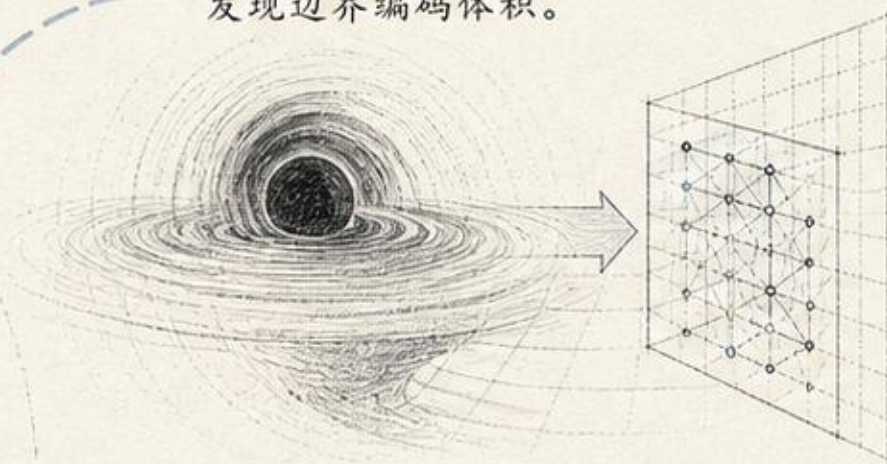
从心性出发，观因陀罗网，
见一即一切，一切即一。



四条完全独立的认知路径， 指向同一个结构

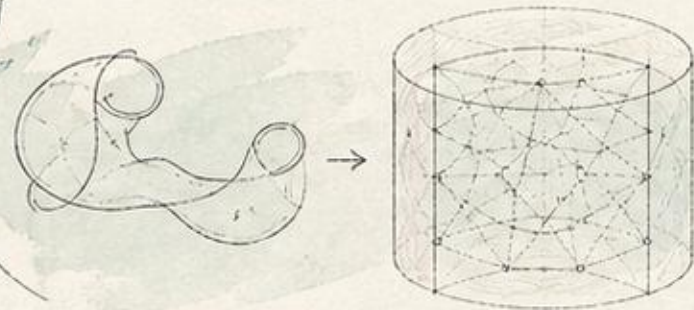
② 二十世纪 贝肯斯坦的黑洞计算

从广义相对论出发，计算黑洞熵，
发现边界编码体积。



③ 马尔达塞那的弦论对偶

从弦论出发，提出 AdS/CFT 对偶，
时空由边界的量子场论决定。



④ 范拉姆斯东克的纠缠实验

从量子信息出发，发现纠缠解除，
时空几何随之断裂。



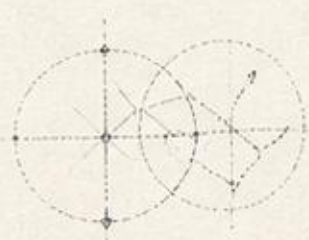
同一个
拓扑结构

整体信息铭刻
在每一个局部里

关系先于实体

局部即全体

没有任何一条知道
另外三条的存在，
但全部指向了
同一个拓扑结构。



因陀罗网

存在论层面的
相互依存

触碰同一个东西

全息原理

信息与边界的
数学关系

$$S = \frac{A}{4G\hbar}$$

$$\rho(x) = \sum_i e^{-\beta E_i} |i\rangle\langle i|$$

$$\psi(x) = \int d^3x' K(x,x') \phi(x')$$

趋同值得认真对待

- 层面不同
- 证据链不同
- 不能简单画等号

跨维度的趋同才更让人着迷

内观

需要在禅定中
体验

方程式

可以写成
方程

假设一：空间是容器
一个预先存在的空间在装着你和他

假设二：空间是关系
你和他之间的关系编织出了空间

空间的底层
到底是什么？

?

关系节点

- 纠缠
- 信息
- 影响
- 共同性

预先存在的
空间容器



- 距离是既定的
- 坐标是固定的
- 你与他被放置其中

- 距离是涌现的
- 连接先于空间
- 关系编织出距离

真正的问题
没有标准答案
但值得追问

你和他之间的空间
是被装在容器里，
还是被关系编织出来的？

关系
编织
现实

0 1 2 3

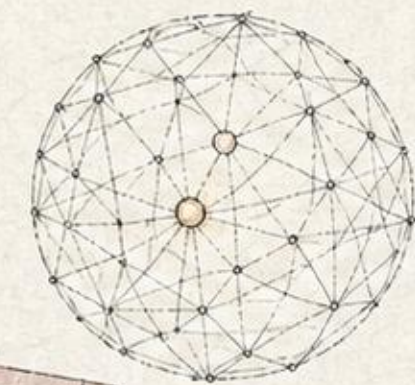
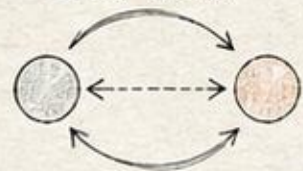
因陀罗网

你不是网外的观察者，
你是网上的一个节点。

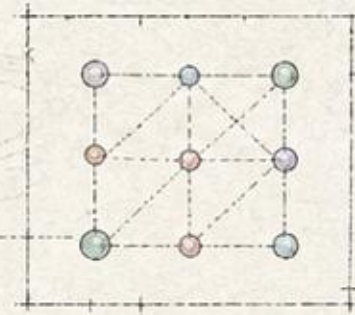
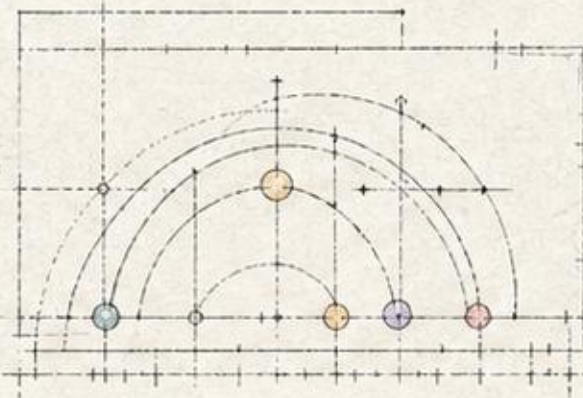
- 映照
- 关系
- 存在
- 共生

你正在映照一切，
而一切也正在映照着你。

互为映照



一即一切
一切即一
相即相入



因陀罗网

[全息]

下期见