

*Bekenstein Ölçütleri:
Bilgi ve Hesaplama Kuramlarına
Kara Delik Perspektifinden
Yeni Bir Yaklaşım*

Dr. Ahmet KOLTUKSUZ

Gündem

- *Planck Sabiti ve Ölçütleri*
- *Bazı Temel Fiziksel Sabitler*
- *Planck Birimleri, Türetilmiş Planck Birimleri*
- *Planck Birimleriyle Normalizasyon*
- *Kara Delik tanımı*
- *Bazı Kara Delik Parametreleri*
- *Kara Delik Termodinamiği*
- *Hawking Işınımı - Bekenstein –Hawking Entropisi – Bekenstein Sayısı*
- *Bilgi Depolamanın Sınırları*

Planck Sabiti (h)


- Planck sabiti (h); foton enerjisiyle (E), fotonun elektromanyetik dalga frekansı (ν) arasındaki oran sabiti olarak tanımlanır.

$$E = h.\nu$$

$$\text{Planck sabiti: } h = 6.6260755 \times 10^{-34} \text{ Js}$$

- Enerji ve frekans arasındaki bu ilişki, Planck ilişkisi olarak da tanımlanır.
- Öte yandan; Frekans ν , dalgaboyu λ , ve ışık hızı c iken $\lambda\nu = c$ olarak yazılabilir: Bu durumda:

$$E = \frac{h.c}{\lambda} \text{ olur.}$$



Planck Sabiti (h) için bir yaklaşım

- Heisenberg'ün Belirsizlik Prensibi doğrultusunda (principle of uncertainty):

Konum bilgisindeki belirsizlikle, momentum bilgisindeki belirsizliğin çarpımı;

Planck sabiti: $h = 6.6260755 \times 10^{-34} \text{ Js}$ 'den daha küçük olamaz.



Dirac Sabiti (\hbar)

- Dirac sabiti (\hbar); azaltılmış-küçültülmüş (reduced) Planck sabiti olarak da bilinir; ve

$$\hbar = \frac{h}{2\pi} \text{ olarak tanımlanır.}$$

Dirac sabiti $\hbar = 1.0545727 \times 10^{-34} \text{ Js}$

Dirac sabiti; frekans, radyan cinsinden (açısal frekans) verildiğinde kullanılır.

Bu durumda:

Açısal frekansı $\omega = 2\pi\nu$ olan bir fotonun enerjisi:

$E = \hbar\omega$ olur.

Planck zamanı (t_P)

- Bir Planck zamanı (t_P); ışık hızındaki bir fotonun bir Planck uzunluğunu kat etmek için harcadığı zamandır.

$$t_P \equiv \sqrt{\frac{\hbar G}{c^5}} \approx 5.39106 \times 10^{-44} \text{ s.}$$

ifadede :

$$\hbar = \frac{h}{2\pi}, \text{ Dirac sabiti}$$

$G =$ kütleçekim sabiti

$c =$ vakumda ışık hızı

$s,$ saniye – zaman birimi

Hatırlatma: Mayıs 2010 itibariyle ölçülebilen en küçük zaman aralığı: 12×10^{-18} sn'dir (12 attosaniye). Meraklısına: 1 attosaniye, 1 saniyenin milyarda birinin milyarda biridir.

Planck kütlesi (m_P)

- Planck kütlesi (m_P); Planck birimleri içinde tanımlanmış olan kütle birimidir.

$$m_P = \sqrt{\frac{\hbar c}{G}} = 2.17651 \times 10^{-8} \text{ kg.}$$

ifadede :

$$\hbar = \frac{h}{2\pi}, \text{ Dirac sabiti}$$

$G =$ kütleçekim sabiti

$c =$ vakumda ışık hızı

Planck uzunluğu (l_P)

- Planck uzunluğu (l_P); Planck birimleri içinde tanımlanmış olan uzunluk birimidir.

$$l_P = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^3}} \approx 1.616252 \times 10^{-35} \text{ m.}$$

ifadede :

$$\hbar = \frac{h}{2\pi}, \text{ Dirac sabiti}$$

$G =$ kütleçekim sabiti

$c =$ vakumda ışık hızı

SI birimleri olarak:

$$l_P = 16.163 \times 10^{-36} \text{ m.}$$

$$l_P = 16.163 \times 10^{-27} \text{ nm.}$$

Hatırlatma: bir Planck uzunluğu yaklaşık olarak bir protonun çevresinin $1/(10^{20})$ 'ne eşittir. Bu haliyle, teknolojik olarak henüz ölçülebilen bir uzunluk olmaktan çok uzak...

Planck kütlesi (m_P) için başka bir yaklaşım

- Bir Planck kütlesi (m_P); aynı zamanda: Schwarzschild yarıçapı bir Planck uzunluğuna (l_P) eşit olan, hipotetik bir kara deliğin kütlesi olarak da tanımlanır.

$$\text{Schwarzschild yarıçapı: } r_s = \frac{2Gm}{c^2}$$

$$\text{Planck uzunluğu: } l_P = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^3}} \approx 1.616252 \times 10^{-35} \text{ m.}$$

$$\frac{2Gm}{c^2} = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^3}} \approx 1.616252 \times 10^{-35} \text{ m.}$$

Temel Fiziksel Sabitler

- Planck birimleri (\hbar , t_P - m_P - l_P) fizikte 5 ayrı alanda karşılaşılan 5 temel ölçüm birimini 1'e normalize eden birimlerdir. 5 alan ve ilişkin ölçüm birimleri:

<u>ALAN</u>	<u>ÖLÇÜM BİRİMİ</u>
Genel görelilik, Newton kütle çekimi	Kütle çekim sabiti (G)
Kuantum mekaniği	Dirac sabiti (\hbar)
Özel görelilik	Vakumda ışık hızı (c)
Elektrostatik	Coulomb sabiti (C veya K)
Termodinamik	Boltzmann sabiti (k_B)

Temel Fiziksel Sabitler

TEMEL FİZİKSEL SABİTLER			
Sabit	Sembol	Boyut	Değeri (SI birimleri)
Vakumda ışık hızı	c	$L T^{-1}$	$2.99792458 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$
Kütle çekim sabiti	G	$L^3 M^{-1} T^{-2}$	$6.67384 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$
Dirac sabiti	$\hbar = h/2\pi$ h Planck sabiti	$L^2 M T^{-1}$	$1.054571726 \times 10^{-34} \text{ J s}$
Coulomb sabiti	$(4\pi\epsilon_0)^{-1}$ ϵ_0 geçirgenlik katsayısı	$L^3 M T^{-2} Q^{-2}$	$8.9875517873681764 \times 10^9 \text{ kg m}^3 \text{ s}^{-2} \text{ C}^{-2}$
Boltzmann sabiti	k_B	$L^2 M T^{-2} \Theta^{-1}$	$1.3806488(13) \times 10^{-23} \text{ JK}$

L = uzunluk
M = kütle
T = zaman
Q = elektrik yükü
 Θ = sıcaklık

Planck Birimleri (1899, Planck)

Temel Planck Birimleri

Birim	Boyut	İfade	Değer (SI birimlerinde)
Planck uzunluğu	(L)	$l_P = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^3}}$	$1.616\ 199(97) \times 10^{-35}$ m
Planck kütlesi	(M)	$m_P = \sqrt{\frac{\hbar c}{G}}$	$2.176\ 51(13) \times 10^{-8}$ kg
Planck zamanı	(T)	$t_P = \frac{l_P}{c} = \frac{\hbar}{m_P c^2} = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^5}}$	$5.391\ 06(32) \times 10^{-44}$ s
Planck yükü	(Q)	$q_P = \sqrt{4\pi\epsilon_0\hbar c}$	$1.875\ 545\ 956(41) \times 10^{-18}$ C
Planck sıcaklığı	(Θ)	$T_P = \frac{m_P c^2}{k_B} = \sqrt{\frac{\hbar c^5}{G k_B^2}}$	$1.416\ 833(85) \times 10^{32}$ K

Planck Birimleri (1899, Planck)

Bazı Türetilmiş Planck Birimleri

İsim	Boyut	İfade	Yaklaşık SI eşdeğeri
Planck alanı	(L ²)	$l_P^2 = \frac{\hbar G}{c^3}$	2.61223 × 10⁻⁷⁰ m²
Planck hacmi	(L ³)	$l_P^3 = \left(\frac{\hbar G}{c^3}\right)^{\frac{3}{2}} = \sqrt{\frac{(\hbar G)^3}{c^9}}$	4.22419 × 10⁻¹⁰⁵ m³
Planck momentumu	(LMT ⁻¹)	$m_{Pc} = \frac{\hbar}{l_P} = \sqrt{\frac{\hbar c^3}{G}}$	6.52485 kg m/s
Planck enerjisi	(L ² MT ⁻²)	$E_P = m_{Pc}c^2 = \frac{\hbar}{t_P} = \sqrt{\frac{\hbar c^5}{G}}$	1.9561 × 10⁹ J
Planck yoğunluğu	(L ⁻³ M)	$\rho_P = \frac{m_P}{l_P^3} = \frac{\hbar t_P}{l_P^5} = \frac{c^5}{\hbar G^2}$	5.15500 × 10⁹⁶ kg/m³
Planck açısal frekansı	(T ⁻¹)	$\omega_P = \frac{1}{t_P} = \sqrt{\frac{c^5}{\hbar G}}$	1.85487 × 10⁴³ s⁻¹

Planck Birimleriyle Normalizasyon

Planck Birimleri Kullanımıyla İfadelerde Basitleştirme		
İfade	Geleneksel Biçim	Basitleştirilmiş (Boyutsuzlaştırılmış) Biçim
Newton'un evrensel çekim kanunu	$F = -G \frac{m_1 m_2}{r^2}$	$F = -\frac{m_1 m_2}{r^2}$
Einstein genel görelilik alan denklemi	$G_{\mu\nu} = 8\pi \frac{G}{c^4} T_{\mu\nu}$	$G_{\mu\nu} = 8\pi T_{\mu\nu}$
Özel görelilikte kütle-enerji eşdeğerliği	$E = mc^2$	$E = m$
Her parçacığın her bir serbestlik derecesi için termal enerjisi	$E = \frac{1}{2} k_B T$	$E = \frac{1}{2} T$
Boltzmann entropisi	$S = k_B \ln \Omega$	$S = \ln \Omega$
Planck enerji-açısal frekans ilişkisi	$E = \hbar \omega$	$E = \omega$
Bekenstein-Hawking kara delik entropisi	$S_{BH} = \frac{A_{BH} k_B c^3}{4G\hbar} = \frac{4\pi G k_B m_{BH}^2}{\hbar c}$	$S_{BH} = A_{BH}/4 = 4\pi m_{BH}^2$
	B: Bekenstein, H: Hawking A _{BH} : Bekenstein-Hawking olay ufku alanı m:kütle, c: ışık hızı k _B : Boltzmann sabiti A _{BH} =4πG	

Kara Delik nedir?

- Einstein Genel Görelilik Kuramı (GTR) için çözümler sunan Schwarzschild, Reissner-Nordström, Kerr ve Kerr-Newmann tarafından temel tanımları verilmiştir (Misner, Thorne ve Wheeler, 1973).

Kara Delik nedir?

1. Einstein'ın Özel Görelilik kuramından tanıdığımız uzayzamanı temsil eden, ancak içi ve sınırları uzayzamanın gerikalanından görünmez olacak şekilde sonlu bir spatyal bölgeyi tanımlayan ve Genel Görelilik kuramından (GTR) gelen bir çözümdür. İşte bu görünmeyen bölge Kara Deliktir.
2. Uzayzamanın dokusunda bir yırtık ya da Gravitasyonel soliton.

Kara Delik nedir?

- Görüldüğü gibi ilk tanım klasik yaklaşımı içeriyor, «Kara Deliğe düşen geri dönmez...» gibi.
- İkinci tanım daha astrofiziksel bir yaklaşım ve bu anlamda bir kara delik yeri belli olan bir objedir, hareket edebilir, evrende farklı bölgelere dağılmış olabilir., diğer nesnelere çekim kuvveti uygular... gibi.

Kara Delik nedir?

- Kerr-Newman Kara Delik Çözümü (=Kerr-Newman Black Hole-KNBH): Bir kara deliğin yapısı; onun kütlesi (=M), elektrik yükü (=Q) ve içsel açısal momentumu (=S) tarafından belirlenir.



Kara Delik parametreleri

M , (mass) kütle

Q , (electric charge) elektrik yükü

j , (angular momentum) açısal momentum

S , (intrinsic angular momentum) içsel açısal momentum

$a = \frac{S}{M}$ (angular momentum per unit mass)

birim kütle başına açısal momentum

Bu durumda:



Kara Delik parametreleri

1) Kısıt

KNBH olabilmesi için ancak ve ancak: $M^2 > Q^2 + a^2$

2) Sınır Değerler

$Q = 0$ Kerr geometrisi

$S = 0$ Reissner-Nordström geometrisi

$Q = S = 0$ Schwarzschild geometrisi

$M^2 = Q^2 + a^2$ Extreme Kerr-Newman geometrisi

olur (Misner, Thorne, Wheeler, 1973).

Kara Delik parametreleri (devam)

3) Statik limit

Bu nokta üzerinde veya içindeki her cisim KNBH ile birlikte ve aynı yöne doğru dönmeye başlar. Statik duruş biter, dönüş zorunlu hale gelir.

$$r \equiv M + \sqrt{M^2 - Q^2 - a^2 \cos^2 \theta}$$

4) Olay Ufku (event horizon)

Bu noktadan sonra geri dönüş olası değildir.

$$r \equiv M + \sqrt{M^2 - Q^2 - a^2}$$

(Misner, Thorne, Wheeler, 1973).

Kara Delik parametreleri (devam)

5) Olay Ufku Alanı (Area of Event Horizon)

- Schwarzschild geometrisi için tek parametre, m o halde Schwarzschild yarıçapı r_s :

$$r_s = \frac{2Gm}{c^2} \text{ tanımlanmıştır. } m = \text{güneş kütlesi için}$$

$$r_s \approx 3 \text{ km} \text{ (Bekenstein, 2001).}$$

- KNBH için alan

$$M = \frac{Gm}{c^2} \text{ ve } Q = \sqrt{\frac{Gq}{c^2}} \text{ ve } a = j \cdot \frac{1}{mc}$$

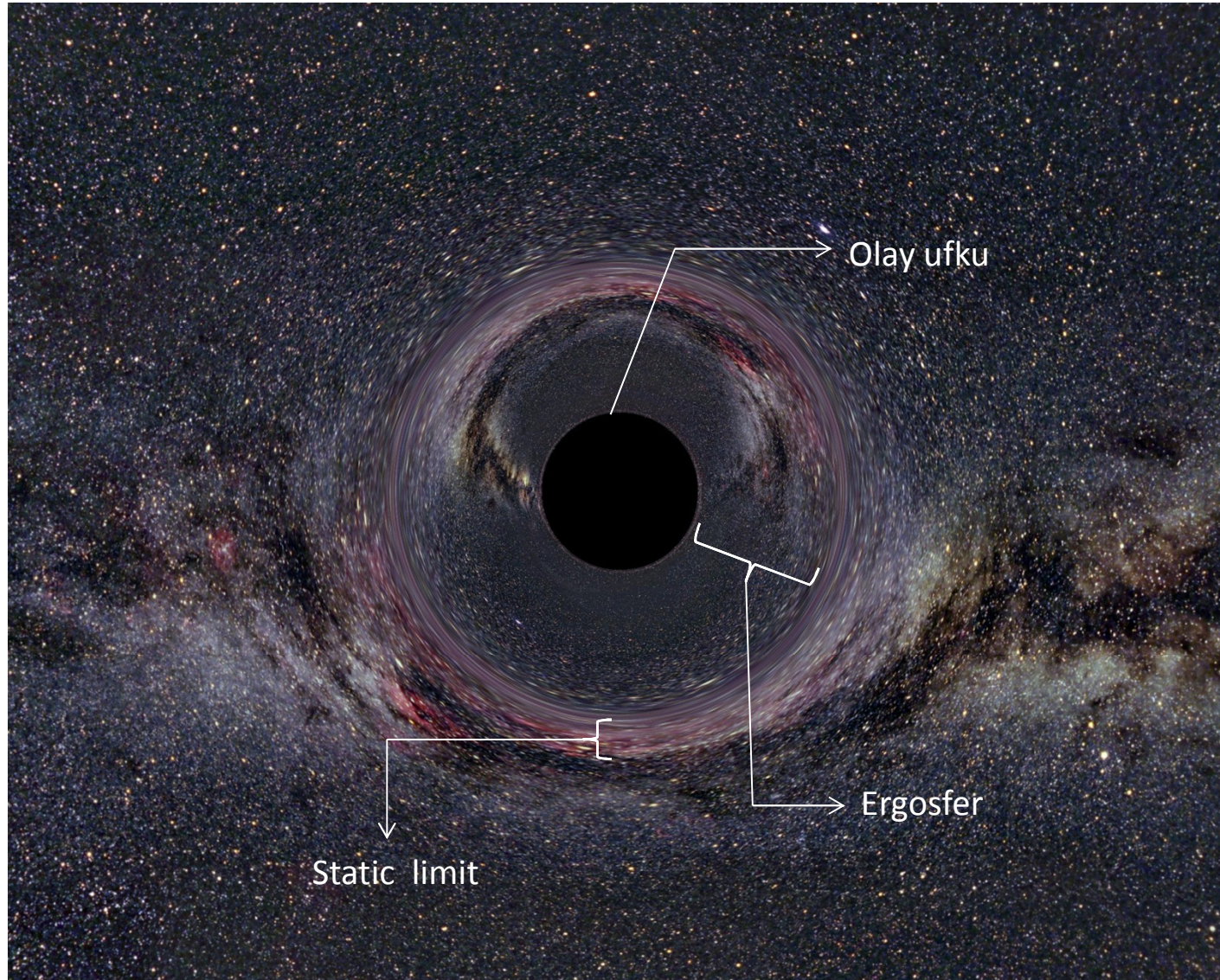
buradan :

$A = 4\pi(r^2 + a^2)$ olur ki, bir güneş kütlesi için

bu alan $\sqrt{\left(\frac{A}{4\pi}\right)}$ değerinin 1km katları olur

(Bekenstein, 2001).

Kara Delik parametreleri



Kara Delik Termodinamiği

- Kara deliđe dűŝen maddenin entropisi yerine, kara delik için M, Q ve S üzerinden giderek bir entropi tanımlamak (Bekenstein 2001).
- S_{BH} =Bekenstein-Hawking entropisi
- Christodoulou (1970) ve Floyd ve Penrose (1971): Kara Delik Olay Ufku alanı ($A=4\pi r^2$, kürenin yüzey alanı) klemez.
- $S_{BH} = f(A)$ ve $S_{BH} = \text{sabit} \times A$
- Burada *orantı sabiti* olarak $\frac{1}{l_P^2}$ katları alınır.

$$l_P \text{ Planck uzunluğu olup; } l_P = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^3}} \approx 1.616252 \times 10^{-35} \text{ m.}$$

(Bekenstein 2001).

Kara Delik Termodinamiği

- O halde KNBH entropisi;
- $S_{\text{BH}} = \text{sabit} \times A$ ($A = \text{olay ufku alanı} = 4\pi r^2$)
- Kara deliđe dűŝen madde, kara delik olay ufkunda geniŝlemeye neden olur (Hawking teoremi, 1971). Bu durumda kara delik entropisi de (δS_{BH}) kadar artar.
- (δS_{BH}) , kara delikte kaybolan maddenin entropisinden daha fazladır. Bۆylece ikinci kanun da sağlanmış olur.
- **Genelleŝtirilmiŝ İkinici Kanun (generalized second law-GSL):
Kara deliğin dıŝındaki entropi ve kara delik entropisinin toplamları asla azalmaz (Bekenstein 2001).**

Kara Delik Termodinamiği

- Birden çok kara delik için entropi:

– Bağımsız sistemlerin entropisi toplanır (additive) olduğundan,

$$S = \sum_i f(A)_i \text{ yazılabilir.}$$

- Kara delik entropisi için bazı örnek değerler:

- Güneş kütleli bir kara delik için entropi: $S_{BH} \approx 10^{79}$

- Güneşin entropisi: $S_{BH} \approx 10^{57}$

- Kütleli 10^{15} g. olan bir kara deliğin entropisi,

10^{15} g 'lık herhangi bir maddenin entropisi kadardır.

- Ancak, kütleli 10^{15} g. olan bir kara delik, $\frac{1}{10^{13}}$ cm. çapındadır.

- 1cm çapındaki bir kara deliğin entropisi 10^{66} bit'tir. Bu ise;

bir kenarı 10 milyar km. olan, su dolu bir küpün entropisine eşittir.

Hawking Işınımı

- Kara delik entropisi ile olay ufku arasındaki orantı sabitini verir; buna göre:
- Bir kara deliğin entropisi; o kara deliğe ait ve Planck alanı cinsinden ölçülmüş olan olay ufku alanının (A) tam 1/4'üdür.

$$l_P = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^3}} \approx 1.616252 \times 10^{-33} \text{ cm.}$$

$$\text{Planck alanı} = l_P^2 = 1.61 \times 10^{-33} \text{ cm} \times 1.61 \times 10^{-33} \text{ cm} = 2.612 \times 10^{-66} \text{ cm}^2$$

(Penrose, Christodoulou, Ruffini, Hawking, 1971),

(Bekenstein & Mukhanov, 1995), (Bekenstein 2001).

Hawking Işınımı, Bekenstein-Hawking Entropisi

- Hawking Işınımı: Döner yada dönmez bir kara deliğin olay ufkunun yüzey alanı, o kara deliğin entropisini verir. Söz konusu entropi, Planck alanı cinsinden ölçülmüş olan alanın $1/4$ 'üdür.

$$A = \alpha l_p^2 n; \text{ ifadede: } (\alpha, n) \in \mathbb{Z}^+$$

$A = \alpha l_p^2 n$; gibi olay ufku yüzey alanına sahip bir kara delik 2^n farklı durum (state) içinde olabilir.

Bu durumda: $S_{BH} = \ln 2^n = \ln 2 \cdot (\alpha l_p^2)^{-1} A$ (Bekenstein 1999)

$$\alpha^{-1} \ln 2 = \frac{1}{4} \text{ (Hawking)}$$

o halde $A = 4 \cdot \ln 2 \cdot l_p^2 \cdot n$

Buradan; S_{BH} toplam entropisi $S_{BH} = \frac{k \cdot A}{4 \cdot l_p^2}$ olur.

Bekenstein Sayısı

- O halde; olay ufku yüzey alanı ayrık (discrete) parçalardan oluşmuş bir yapıdadır. Her ayrık parça 2 durumdan birinde olabilir (1 ya da 0 gibi).
- Bekenstein sayısı (\mathcal{N}): Her bir parçanın alanı ($4 \cdot \ln 2 \cdot \hbar$) olup, bir Planck alanınının 2.77 kat fazlasına tekabül eden sayıdır.

Olay ufku yüzey alanı ayrık parça alanı = Bekenstein sayısı N

$$N = 4 \cdot \ln 2 \cdot l_p^2$$

veya

$$N = 4 \cdot \ln 2 \cdot \hbar$$

Bekenstein Sayısı

Olay ufku yüzey alanı ayırık parça alanı = Bekenstein sayısı N

$$N = 4 \cdot \ln 2 \cdot l_p^2 \text{ veya } N = 4 \cdot \ln 2 \cdot \hbar$$

$KNBH$ toplam entropisi

$$S_{BH} = \frac{k_B \cdot A}{4 \cdot l_p^2}$$

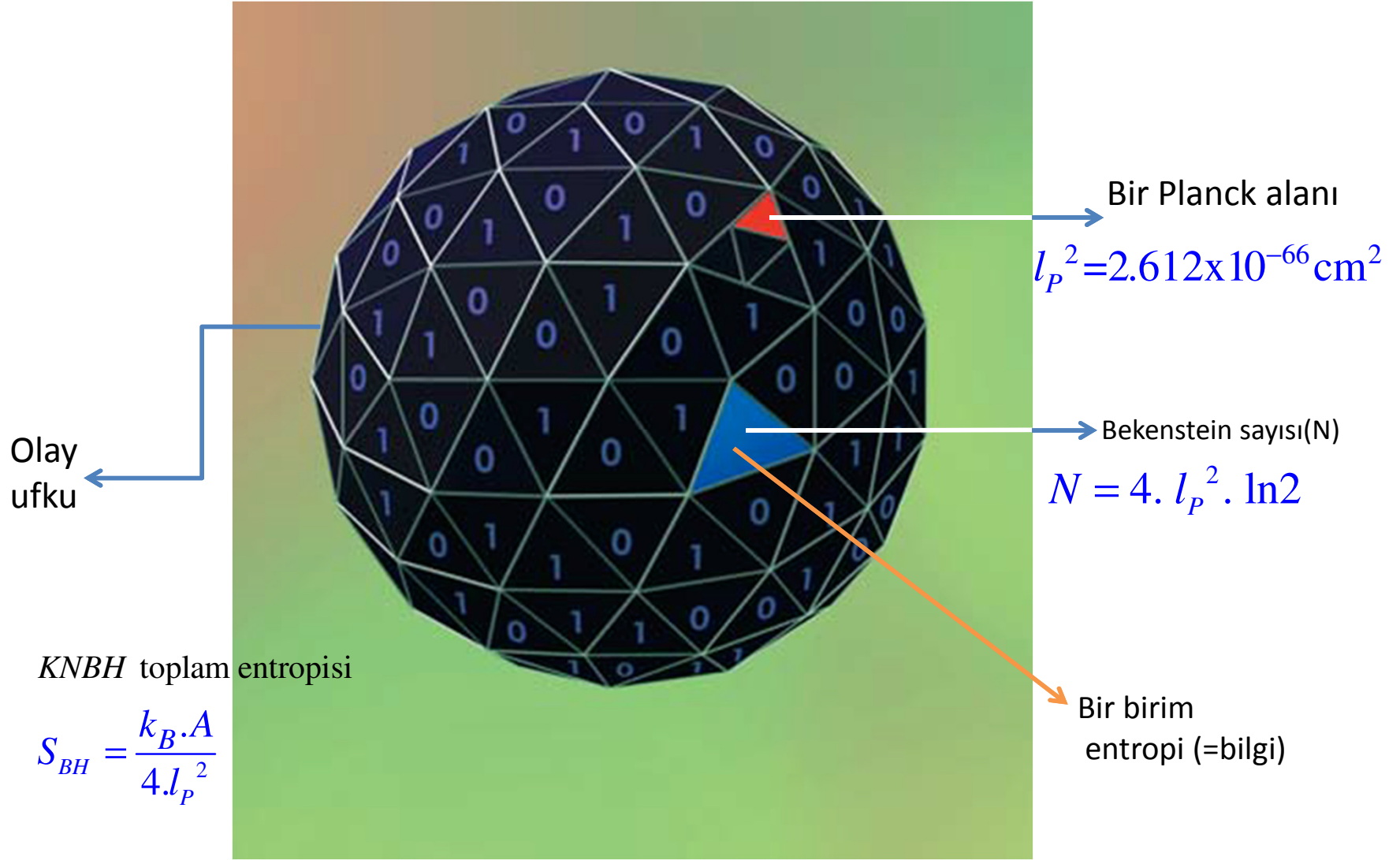
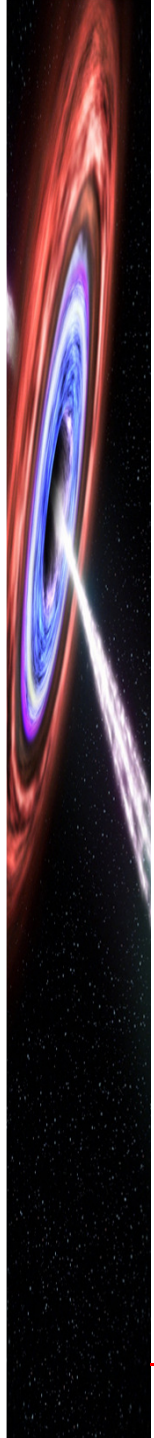
$A = 4\pi r^2$ kürenin yüzey alanı, olay ufku alanı,

$$l_p^2 = \frac{4\pi r^2}{4 \cdot N}$$

yerine koyalım

$$S_{BH} = \frac{k_B \cdot A}{4 \cdot l_p^2} = \frac{k_B \cdot 4\pi r^2}{4 \cdot \frac{4\pi r^2}{4 \cdot N}} = k_B \cdot N$$

Kara Delik Ölçütleri



Bilgi Depolamanın Sınırları

- 1cm³ hacminde, herhangi bir malzemedен yapılmış bir cisme, herhangi bir yolla, maksimum ne kadar bilgi depolanabilir?
- Atomik manipölasyon ile ileri teknoloji kullanılarak 10²⁰ bit olası (Bekenstein 2001).
- Örneğin atom çekirdeğine bilgi depolamak olası olacaktır.

Bilgi Depolamanın Sınırları

- Bir mesajın Shannon entropisi, o mesajın kodlanması için gereken bit sayısıdır.
- Termodinamik entropi ile Shannon entropisi kavramsal olarak eşdeğerdir.
- Belirli bir düzenleme yapabilmek için Boltzmann entropisinin belirlediği düzen sayısı, aslında Shannon bilgisi olarak oluşur.
- Her ikisi arasındaki en önemli fark ise birimlerdir. Termodinamik entropi JK^{-1} birimiyle verilirken, Shannon entropisi birimi bit'tir ve boyutsuzdur.

Bilgi Depolamanın Sınırları

- 1Gigabyte kapasiteli bir bellek (RAM), 10^{10} bit Shannon entropisine sahiptir. Öte yandan aynı malzemenin oda sıcaklığındaki termodinamik entropisi 10^{23} bit civarındadır.
- Aradaki farkın nedeni; entropilerin farklı serbestlik derecelerine göre hesaplanıyor olmasından kaynaklanır.
- Shannon entropisi, söz konusu RAM'de yer alan **her bir** transistörün 1 ya da 0 olması ile ilgilendir; bu da tek serbestlik derecesine tekabül eder.

Bilgi Depolamanın Sınırları

- Halbuki termodinamik entropi; her transistörü oluşturan milyarlarca atom ve onların elektronlarının durumları (state) ile ilgilenir. Bu hesapta bir çok serbestlik derecesi yer alır.
- Bu aşamada teknolojinin gelişimindeki hedef: Her atomun tek bir bit bilgi tutacak (var veya yok, 1 veya 0) şekilde kullanılabilmesidir. Böylece RAM'in Shannon-bilgi entropisi ile o RAM'in yapıldığı malzemenin termodinamik entropisi birbirine yaklaşacaktır.

Bilgi Depolamanın Sınırları

- Susskind yaklaşımı:
 - Kara delik olmayan bir küre, A alanına sahip kapalı bir yüzeyin içine konulsun.
 - Küre, kara delik haline gelirse; olay ufku yüzeyi, altında bulunduğu yüzey A 'dan küçük olur.
 - Bu durumda: yeni oluşan kara deliğin entropisi $< (A/4)$
 - O halde: Yüzey alanı A ile sınırlandırılmış bir izole fiziksel sistemin entropisi $(A/4)$ 'den küçük olacaktır.

Bilgi Depolamanın Sınırları

- Bu durumda oluşan sonuç:

**Olası maksimum entropi, cismin hacmine değil,
o cismi sınırlandıran yüzey alanına bağlıdır.**

Bilgi Depolamanın Sınırları

- O halde

Olay ufku yüzey alanı (A)

1. Ayrık
2. Bekenstein sayısı kadar
3. 1 bitlik bilgi (=entropi)

barındıran parçalardan oluştuğuna göre;

Kara deliğin

1. Bekenstein sayısı $\longrightarrow N = 4 \cdot l_p^2 \cdot \ln 2$

ve

2. maksimum entropisi $\longrightarrow S_{BH} = \frac{k_B \cdot A}{4 \cdot l_p^2}$

bilgi depolamanın üst sınırını belirlemiş olmaktadır.

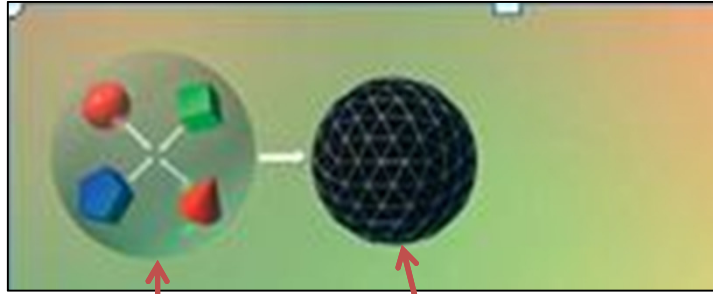
Bilgi Depolamanın Sınırları



- RAM ler üstten A yüzeyi ile sınırlıdır. Sayıları arttıkça bilgi entropileri artar (daha çok transistör).
- Ama termodinamik entropileri daha da hızlı artar.
- Sınır, RAM sayısıyla (hacim) değil, sınırlayan A yüzeyi tarafından belirlenir.
- Sonuçta, aşırı sayıda artan RAM'ler gravite nedeniyle içe doğru çökerek bir kara delik oluşturur.
- Bu aşamadan sonra kara deliğe her yeni eklenen RAM, kara deliğin kütlesi ve yüzey alanını arttırır, böylece GSL de sağlanmış olur.

Bilgi Depolamanın Sınırları

Susskind Yaklaşımı



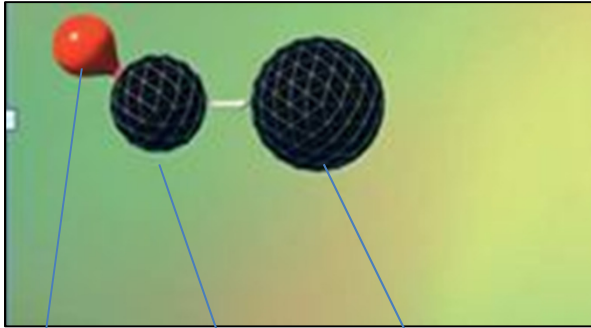
Yüzey alanı A

Kara delik

- A yüzey alanı ile sınırlanmış uzaydaki tüm bilgi, küresel bir cisimde olsun.
- Bu cisim kara delik haline geldiğinde, kara deliğin yüzey alanı A dan küçük olacaktır.
- O halde kara deliğin entropisi de $A/4$ den küçük olacaktır..
- Entropi azalamayacağından, ortamdaki entropi (=bilgi) $A/4$ den küçük olacaktır.
- Uzayın bir bölgesindeki maksimum bilgi miktarı(=entropi) o bölgenin hacmi ile değil, yüzey alanı ile sınırlıdır.

Bilgi Depolamanın Sınırları

Susskind Yaklaşımı



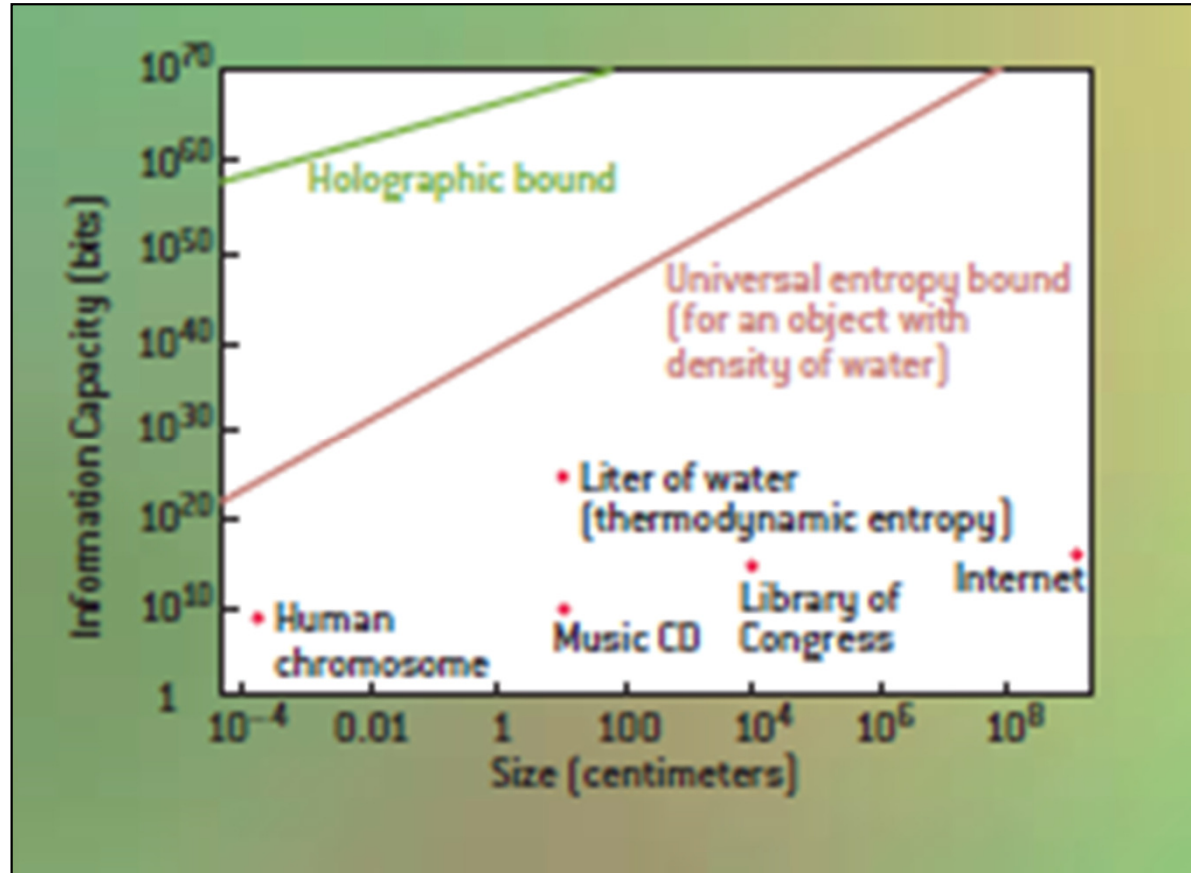
Çevresi d ,
kütlesi m
olan cisim,
kara delik
içine çekiliyor

Çekimden
sonra
kara delik
Kütlesi $M+m$

Çekimden
Önce
kara delik
Kütlesi M

- Evrensel entropi sınırı; kütlesi m çevresi d olan bir cisim tarafından ne kadar bilgi taşınabileceğini tanımlar.
- Malzemenin kendisinden pek de büyük olmayan bir kara delik tarafından yutulma durumu bunu açıklamaktadır.

Bilgi Depolamanın Sınırları





"You both have something in common. Dr. Davis has discovered a particle which nobody has seen, and Prof. Higbe has discovered a galaxy which nobody has seen."



Sabır ve İlginize çok teşekkür ederim.

A. Koltuksuz